

## CARACTERIZACIÓN MINERALÓGICA Y MINERALOGÍA DE PROCESOS APLICADA A LA MINA DE VETA “LA ESPERANZA”, UBICADA EN LA VEREDA CEDEÑO PARTE ALTA DEL MUNICIPIO DE TÁMESIS, ANTIOQUIA.

*Carlos Andrés Cañola Gómez<sup>1</sup>\*, Alba Nury Gallego Hernández<sup>2</sup>, William Bolívar García<sup>3</sup>*

1: Ingeniero de Materiales, Universidad de Antioquia. Medellín, Colombia.

2: Ingeniera Geóloga, Universidad de Antioquia. Medellín, Colombia.

3: Ingeniero Investigador, Universidad de Antioquia. Medellín, Colombia.

\* e-mail: canolacarlos@gmail.com

**Resumen:** La caracterización mineralógica del mineral aurífero proveniente de la mina La Esperanza, se apoyó en microscopía óptica de luz reflejada y microscopía electrónica, sobre secciones delgadas pulidas; para el desarrollo de este trabajo se prepararon un total de 20 secciones, seleccionadas entre 32 muestras recolectadas directamente del socavón de la Mina La Esperanza, en las cuales se identificaron un total de 553 granos de electrum y plata nativa, la caracterización detallada de estos granos revela la asociación, tamaño y forma de ocurrencia de cada uno de los granos, esta información se utilizó como soporte para proponer un diseño metalúrgico de beneficio del mineral aurífero de la mina La Esperanza. En cuanto a la caracterización geoquímica, ensayos al fuego revelaron tenores de oro y plata en valores de 219 g/ton y 2702 g/ton, respectivamente. Las características fisicoquímicas del mineral favorecen los parámetros de cianuración en botella en cuanto a manejo de pulpas, ausencia de sales solubles y acidez en el mineral. En la caracterización metalúrgica el grado de lixiviabilidad mostró lo difícil de lixiviar el mineral debido a que la recuperación del oro y la plata fue inferior al 65% y a que la mayor cantidad de oro se encuentra en tamaños entre 180  $\mu\text{m}$  y 106  $\mu\text{m}$  (80-140 mallas Tyler). La granulometría adecuada para los ensayos de cianuración en botella fue -270 mallas Tyler (-53  $\mu\text{m}$ ). El análisis del diseño estadístico experimental aplicado para las pruebas de cianuración en botella arrojó una recuperación del 82,47 % a una concentración de cianuro de 2g/l y a un tiempo de 12 horas, con una confiabilidad del 95%.

**Palabras Clave:** Caracterización mineralógica, ensayos de cianuración, recuperación de oro, secciones delgadas pulidas, diseño estadístico.

**Abstract:** The mineralogical characterization of gold-bearing ores from the La Esperanza mine has been conducted by studying thin sections, using petrographic microscope, and WDS and EDS chemical analyses. A total of thirty-two samples were collected directly from the La Esperanza mine and twenty samples were selected for the thin section preparation. From these analyses, 553 grains of electrum and native silver were identified, and a detailed description of these grains (assemblage, size and occurrence of each grain) was used to design a metallurgical processes to recover gold and silver from the La Esperanza ores. Fire assays revealed gold and silver contents of 219 g/t and 2702 g/t, respectively. Physicochemical characteristics such as: mineral pulp, absence of soluble salts and acid pH, indicated favorable conditions for cyanide leaching bottle. The metallurgical characterization showed a low leachability grade because the percentage of gold and silver recuperation was lower than 65%, and the size of most grains ranged between 180  $\mu\text{m}$  and 106  $\mu\text{m}$  (80-140 meshes Tyler). The grain size selected for the cyanide leaching bottle test was 270 meshes Tyler (-53  $\mu\text{m}$ ). The statistical design analyses of the cyanide leaching bottle test revealed a recovery grade of 82,47% with a cyanide concentration of 2g/l after 12 hours, with a reliability of 95%.

**Keywords:** Characterization, mineralogy, cyanidation, gold recovery, polished thin sections, statistical design.

## 1. INTRODUCCIÓN

La minería de metales es una industria que busca obtener las mayores concentraciones de los minerales que tengan un alto valor económico, por medio del procesamiento de diferentes tipos de menas [1]. Los métodos que se utilizan para el procesamiento mineralúrgico de estas menas, dependen de las propiedades físicas, fisicoquímicas, mineralógicas, geoquímicas y metalúrgicas, siendo cada una de estas propiedades única para cada mena; para optimizar el proceso de beneficio de determinada mena, es importante conocer cada una de las propiedades antes mencionadas y diseñar el tratamiento mineralúrgico específico que requiere la mena en estudio [2]. A pesar de lo anterior, convencionalmente no se logra crear un vínculo eficiente que permita vincular todas las variables antes descritas para conseguir las más altas recuperaciones de modo que el proceso metalúrgico sea económica y ambientalmente apropiado.

Los estudios mineralógicos brindan información sobre el tipo de yacimiento y las características de la mena. Un estudio mineralógico, mejor llamado caracterización mineralógica, es una herramienta que brinda soporte a la caracterización fisicoquímica, geoquímica y metalúrgica; por lo cual, la suma de estas tres áreas se convierten en el soporte para diseñar un diagrama de flujo de separación de los minerales en un proceso de beneficio, el cual no presente alteraciones en la producción, baja calidad de los productos y/o porcentajes poco considerables en las recuperaciones del mineral de interés [3] deficiencia en la recuperación, generación de sustancias nocivas, contaminación de los minerales a recuperar, es decir, la caracterización mineralógica es una herramienta que optimiza el proceso de beneficio de la mena, especialmente en aquellas de difícil beneficio o refractarias. Las menas que son denominadas refractarias, son menas ricas en minerales cianicidas o que contienen partículas de minerales valiosos con tamaños tan finos y grados de liberación bajos que su recuperación por medio de métodos convencionales es poco eficiente [2].

En este proyecto se realizó una caracterización mineralógica, de la veta explotada en la mina "La Esperanza", por medio de la observación detallada de secciones delgadas pulidas en microscopio metalográfico, modo luz reflejada. El muestreo se realizó teniendo presente el tipo de estructura mineralizada, su espesor y variaciones, de modo que fue posible garantizar que la información obtenida sobre distribución y tamaño de los minerales que contienen metales preciosos es representativa para la zona actualmente en explotación. Adicionalmente, se realizaron pruebas en el laboratorio donde se conocieron las características fisicoquímicas por medio de ensayos de densidad, viscosidad de pulpas, sales solubles, nivel de acidez y retención de líquidos parámetros que aportaron las bases para desarrollar ensayos de cianuración en botella. Los ensayos al fuego permitieron conocer los tenores de oro y plata, para conocer las características metalúrgicas, se analizó el grado de lixiviabilidad y la distribución de oro por fracciones. Con cada muestra seleccionada se preparó una sección delgada pulida, que fue analizada por microscopía óptica y algunas en SEM. Con las demás muestras se hizo todo el proceso para los ensayos de cianuración en botella dentro de un diseño estadístico experimental factorial  $2^2$ , una vez se obtuvo toda la información, se diseñó un proceso de cianuración ajustado a las características específicas del mineral de estudio, donde se buscó establecer un proceso eficiente para recuperación de oro en la veta La Esperanza como sustitución a la amalgamación.

## **2. METODOLOGÍA**

### **2.1 Muestreo**

Se recolectaron 32 muestras para la elaboración de las secciones delgadas pulidas y 30 kilos de mineral para los ensayos de cianuración. Las muestras para la caracterización mineralógica fueron tomadas de las vetas en la parte superior, centro e inferior, en los frentes que se explotaban al momento de las visitas y el mineral para los ensayos de cianuración fue seleccionado en la zona de trituración.

### **2.2. Caracterización mineralógica**

Se seleccionaron 20 muestras para preparar secciones delgadas pulidas, las cuales fueron analizadas por medio de microscopía óptica de luz reflejada y microscopía electrónica. Cada una de las secciones delgadas pulidas fue observada de forma detallada de modo que se recorrió cada muestra con el objeto de identificar las fases minerales presentes y contabilizar cada grano con contenidos de metales preciosos.

### **2.3. Caracterización geoquímica**

Con la caracterización geoquímica, se determinaron los tenores de oro y plata, en el mineral original y concentrado, por medio de la técnica del ensayo al fuego convencional. Además se determinó por la técnica de fluorescencia de rayos X (FRX) la composición porcentual de los elementos químicos presentes en el mineral original.

### **2.4. Caracterización fisicoquímica**

Los procesos metalúrgicos extractivos requieren del manejo de pulpas, por esto es necesario determinar algunas características fisicoquímicas del mineral, original y concentrado, tales como: densidad, grado de acidez, tipo de sales solubles, viscosidad de pulpa y porcentaje de retención de líquidos.

### **2.5 Caracterización metalúrgica**

Con el fin de predecir el comportamiento metalúrgico del mineral frente a los procesos de beneficio y extracción, se realizaron los siguientes ensayos: distribución de oro y plata por fracciones granulométricas (análisis granulométrico) y el grado de lixiviabilidad del mineral en el cianuro de sodio, mediante las pruebas de cianuración en botella.

### **2.6. Diseño estadístico experimental**

Se identificó la granulometría de la mayoría de las partículas de oro y plata, por tanto se definió una sola granulometría para los ensayos de cianuración, y de acuerdo a las especies minerales presentes se definieron las concentraciones y los tiempos de cianuración a utilizar en los ensayos.

El mineral utilizado en las pruebas de cianuración fue concentrado gravimétricamente por mesa Wilfley y posteriormente remolido para obtener un D<sub>100</sub> pasante 270 malla Tyler o 53 μm. El contenido de sólidos en la pulpa fue del 35%, se utilizaron 210 gramos de mineral por cada 600 ml de agua en cada uno de los ensayos. La precipitación de los metales preciosos (Au y Ag) se realizó mediante el método Chiddy [4]. Se ejecutó un diseño estadístico experimental, factorial 2<sup>k</sup> (2<sup>2</sup>), donde se analizaron el tiempo de cianuración y concentración de cianuro de sodio (Tabla 1). El tiempo mínimo utilizado fue de 6 horas y el máximo de 12 horas, la concentración de cianuro mínima usada fue 1 g/L y la máxima fue 2 g/L.

**Tabla 1.** Condiciones iniciales para el diseño estadístico experimental para los ensayos de cianuración en botella del mineral concentrado.

Granulometría del mineral (Mallas Tyler)	Concentración de NaCN (g/L)	Tiempo (horas)
-270	1	6
	2	12

### 3. RESULTADOS

#### 3.1 Caracterización mineralógica

El reconocimiento de las fases minerales por medio de microscopia de luz reflejada se desarrolló en un total de 20 muestras, en las cuales se identificaron pirita, esfalerita, tetraedrita, galena, calcopirita, argentita, además de electrum y plata nativa. Los minerales que presentan el mayor interés económico como el electrum y la plata nativa fueron analizados en detalle con el microscopio, en cada grano se analizaron características como: longitud menor y mayor, asociaciones y forma de ocurrencia.

**3.1.1. Ocurrencia de los granos de electrum (Au) y plata nativa (Ag):** Los minerales con altos contenidos de oro de la mina La Esperanza se clasifican como electrum, los valores de plata varían entre 21,52 y 33,5 % y de oro entre 66,5 y 78,48%, datos que fueron obtenidos por análisis de microscopía electrónica, ver Figura 1. Los granos de electrum son abundantes, se identificaron un total de 553 granos que incluyen electrum y plata nativa, los cuales fueron observados en 11 muestras (A2, A5, A11, A13, A14, A17, A18, ILDA1, ILIP2, ILIP3, ILIX3).

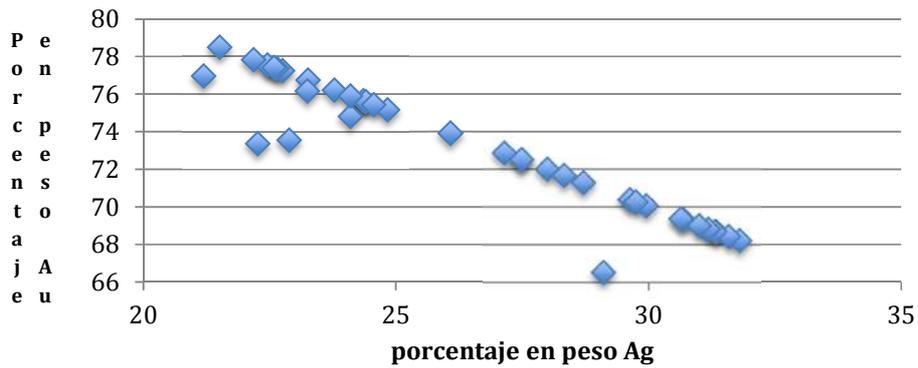


Figura 1. Relación oro/plata en granos de electrum.

El tamaño es variable, fueron identificados granos con diámetros desde dos micrones hasta granos que alcanzan cerca de  $570 \mu\text{m}$ . Tanto los granos de electrum como de plata nativa muestran asociaciones similares (Figura 2), se encuentran estrechamente relacionados a tetraedrita (Td), ya sea como granos totalmente encapsulados (Figura 2a) o intercrecidos, los granos de plata nativa son comunes, en ocasiones asociados a granos de electrum o parcialmente intercrecidos con tetraedrita y argentita o con argentita. En cuanto a los granos de electrum de tamaños más finos, es usual observarlos atrapados en matriz de galena (Figura 2b), calcopirita (Figura 2c), pirita y esfalerita; algunos granos, sin restricción de tamaño, se observan asociados a grupos de minerales como por ejemplo: pirita(Py)-esfalerita(Sph)-galena(Gn)-electrum(Au), Sph-Cpy-Td-Au (Figura 2d), (Figura 2e), (Gn)-tetraedrita(Td)-Au, Gn-Sph-Au (Figura 2f), Cpy-Td-Au, Sph-Cpy-Au; otro tipo de asociación común de los granos de electrum es a lo largo de fracturas de granos quebrados de pirita (Figura 2g); finalmente, son relevantes los granos de electrum y plata nativa que están asociados a minerales de la ganga, los cuales son denominados "libres" (Figuras 2h, 2i).

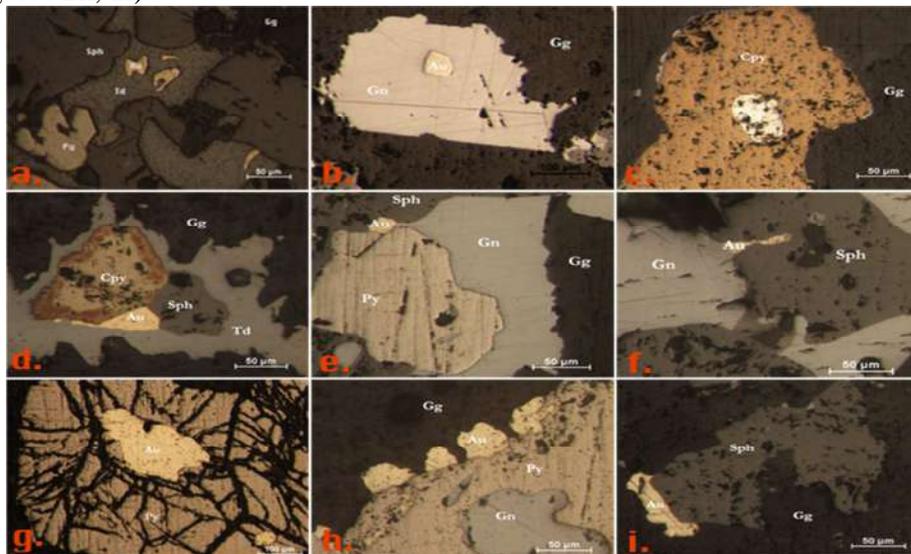
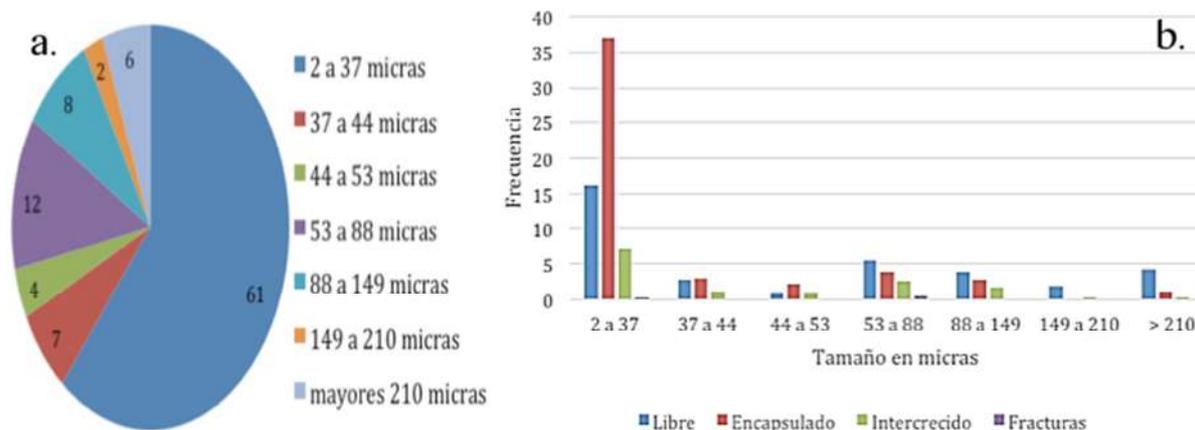


Figura 2. Asociaciones de Au. a) Au encapsulado en Td. b) Au encapsulado en Gn. c) Au encapsulado en Cpy. d) Au intercrecido con Cpy, Sph y Td. e) Au Inter. Con Py, Sph y Gn. f) Au inter. Gn y Sph. g) Au en Py fracturas. h) Au libre. i) Au libre.

**3.1.2. Tamaño y asociación de los granos de electrum y plata nativa:** En la Figura 3a, diagrama de torta, se ilustra la distribución por tamaños de cada uno de los 553 granos de electrum y plata nativa identificados. Los granos más gruesos con tamaños que exceden 210  $\mu\text{m}$  en su máxima longitud equivalen al 6% del total; granos con tamaños entre 53 y 210  $\mu\text{m}$  equivalen al 22%; granulometrías desde 53 hasta 88  $\mu\text{m}$  de máxima longitud equivalen al 12% del total de los granos, el 4% de los granos presenta tamaños entre 44 y 53  $\mu\text{m}$ , por lo cual se puede inferir, que si se considera sólo el efecto de la granulometría, es posible esperar que el 32% de los granos sean liberados total o parcialmente durante una molienda convencional, ya que son los granos que superan 53  $\mu\text{m}$  de diámetro y presumiblemente estarían expuestos a la solución lixiviante durante una molienda a -325 mallas Tyler. El 7% de los granos ocurre con tamaños entre 37 y 44  $\mu\text{m}$  y el restante 61% presenta tamaños por debajo de 37  $\mu\text{m}$ , lo cual indica que el 68% de los granos son finos a muy finos y eventualmente podrían presentar inconvenientes en un proceso de beneficio convencional.

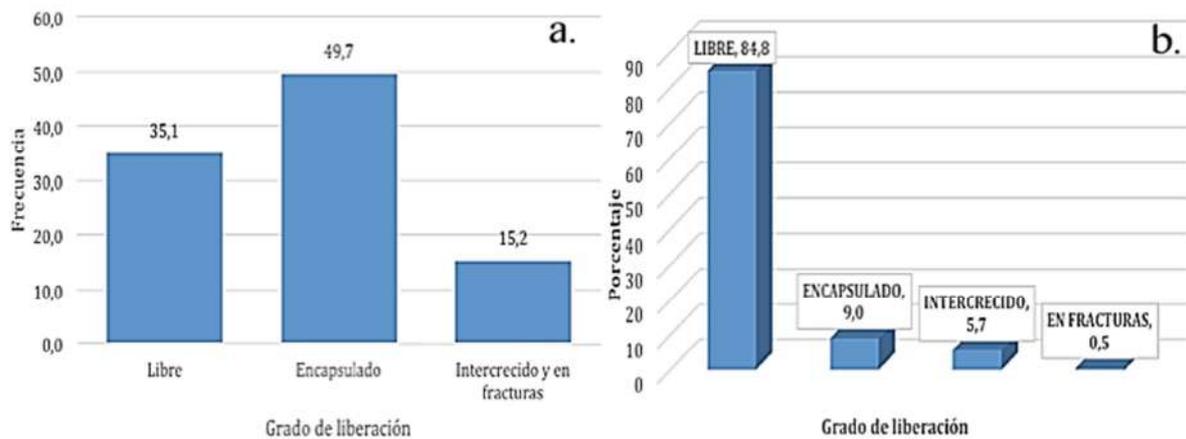
La Figura 3b es un histograma que relaciona la granulometría con el tipo de asociación de los granos de electrum y plata nativa. Los granos encapsulados presentan un bajo grado de liberación, en este trabajo se definieron como granos con bajo grado de liberación todos los que se encuentran totalmente atrapados dentro de una matriz de otro sulfuro (figuras 2a, 2b, 2c) o con menos del 60% de área expuesta, es decir en contacto con minerales de la ganga, la mayoría de los granos encapsulados presentan tamaños muy finos, el 39% de ellos presenta tamaños inferiores a 44  $\mu\text{m}$ ; en los otros rangos de tamaño se observa una distribución entre dos y tres por ciento del total. Los granos intercrecidos con otros sulfuros (figuras 2d, 2e, 2f) o que se presentan a lo largo de fracturas de pirita se han clasificado dentro del rango de grado medio de liberación; se presentan en proporciones relativamente similares a lo largo de todos los rangos de tamaño analizados. Los granos denominados libres, granos asociados solo a minerales de la ganga o con más del 60% de superficie expuesta (figuras 2g, 2h, 2i), ocurren ya sea como granos muy finos (19% <44  $\mu\text{m}$ ) o granos que cubren áreas mayores, hasta 504  $\mu\text{m}$  de largo.



**Figura 3. a)** Diagrama de torta que relaciona el tamaño de los granos de electrum y plata nativa con su abundancia descrita en porcentaje. **b)** Distribución del tamaño de los granos de electrum vs su asociación.

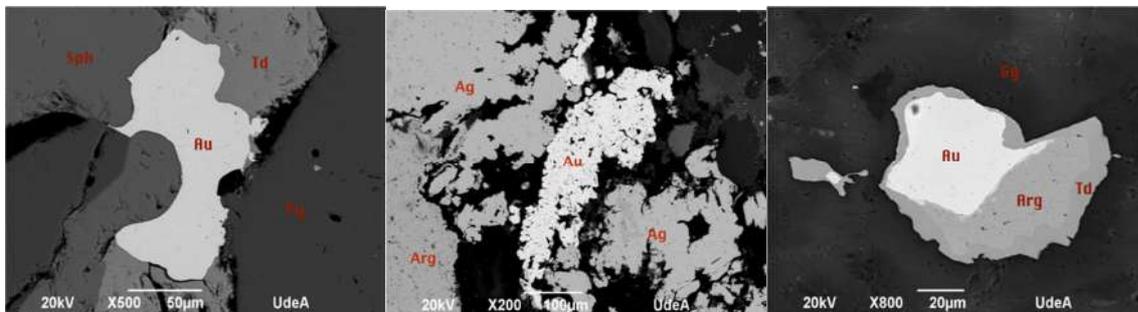
**3.1.3. Grado de liberación:** Como se mencionó en el párrafo anterior, el total de los 553 granos de electrum y plata nativa fueron clasificados de acuerdo a su asociación con otros minerales en

granos encapsulados, intercrecidos y libres, esta clasificación tiene una relación directa con el grado de liberación del grano, de modo que se puede sugerir que los granos encapsulados tienen un grado bajo a nulo de liberación, los granos intercrecidos o la largo de fracturas tienen grados intermedios de liberación y los granos libres son aquellos cuya superficie estaría expuesta a los agentes lixiviantes después de la molienda; en la Figura 4a es un histograma que relaciona el total de los granos, expresado en porcentaje, con el grado de liberación, se puede observar que el 49,7% del total de granos electrum están totalmente atrapados en la matriz de otros sulfuros. El 15,2% de los granos ocurren a lo largo de fracturas e intercrecidos con otras fases, los cuales presentan un grado moderado de liberación. Finalmente, el 35,1% de los granos están totalmente libres o tienen un alto grado de liberación, ya que ocurren apenas parcialmente asociados a otras fases y pueden ser fácilmente separados por medio de procesos convencionales de beneficio. Suponiendo que el porcentaje de área es aproximadamente igual al porcentaje de volumen, este dato revela información teórica respecto a la cantidad de oro que se presenta encapsulado, con valores intermedios o altos de liberación. La Figura 4b ilustra los porcentajes y áreas mencionadas anteriormente; el 84,8 % del oro se encuentra libre, el 6,2 % del oro presenta un grado moderado de liberación, el restante 9 % del oro ocurre atrapado en la matriz de sulfuro.



**Figura 4. (a)** Grado de liberación de los diferentes granos de electrum. **(b)** Grado de liberación con base en el área de los granos de electrum.

En la Figura 5 se encuentran las imágenes que son obtenidas por SEM del electrum y sus asociaciones.



**Figura 5.** Imágenes de electrum obtenidas por microscopía electrónica de barrido- SEM.

### 3.2. Caracterización geoquímica

**3.2.1. Ensayos al fuego:** En la Tabla 2 se presentan los resultados de los tenores de oro y plata en cada tipo de mineral, obtenidos por el ensayo al fuego.

**Tabla 2.** Tenores de oro y plata del mineral original y concentrado.

Mineral	Tenor Au (g/Ton)	Tenor Ag (g/Ton)
Sin concentrar	219	2702
Concentrado	405,3	12178,3

**3.2.2. Fluorescencia de rayos X:** En la Tabla 3 se presentan los porcentajes de los elementos químicos más abundantes en el mineral original, determinados para algunos elementos importantes. Según lo observado en la tabla se identificó la posible presencia de minerales como: calcita ( $\text{CaCO}_3$ ), cuarzo ( $\text{SiO}_2$ ), pirita ( $\text{FeS}_2$ ), esfalerita ( $\text{ZnS}$ ), calcopirita ( $\text{CuFeS}_2$ ), galena ( $\text{PbS}$ ), magnetita ( $\text{Fe}_3\text{O}_4$ ). No todos estos minerales fueron corroborados en la caracterización mineralógica.

**Tabla 3.** Porcentajes de los principales elementos presentes en el mineral.

Elemento	Ca	Fe	Si	Mn	S	Zn	Pb	Cu	Sb	As
Porcentaje	12,69	1,76	2,29	1,31	0,811	1,62	1,01	0,247	0,09	0,015

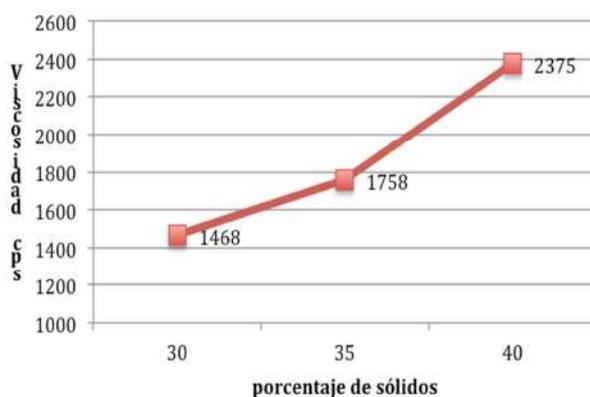
### 3.3. Caracterización fisicoquímica

**3.3.1. Densidad:** La toma de pesos para hallar la densidad del mineral sin concentrar y concentrado arrojó los datos de la Tabla 4 donde se evidencia el aumento de la densidad del mineral concentrado que presenta bajos porcentajes de ganga.

**Tabla 4.** Densidades del mineral original y concentrado.

Mineral	Densidad ( $\text{gr/cm}^3$ )
Sin Concentrar	2,838
Concentrado	3,7363

**3.3.2. Viscosidad de pulpas:** El ensayo de viscosidad se realizó al mineral concentrado que fue el mineral procesado en los ensayos de cianuración, con el fin de determinar y corroborar el porcentaje de sólidos más adecuado a utilizar en dichos ensayos. En la Figura 6 se puede observar que la pulpa que presenta un mejor equilibrio entre la cantidad de sólidos y la viscosidad, es la del 35% de sólidos debido a que de las pulpas analizadas es la que presenta mayor cantidad de sólidos con menor viscosidad.



**Figura 6.** Comportamiento de la viscosidad en función del porcentaje de sólidos.

**3.3.3. Grado de acidez:** Tomada en un pH-metro HANNA HI 9026 dio como resultado un pH básico de 8, el cual es óptimo para los ensayos de cianuración que se realizan en medio básico. Se corroboró con un papel indicador.

**3.3.4. Retención de líquidos:** Ambos porcentajes de retención no son altos lo cual es aceptable para un proceso de cianuración, las diferencias entre ambos minerales se debe a que en el proceso de concentración se lavan las arcillas presentes en el mineral original. El mineral concentrado reduce notablemente su capacidad de retener líquidos en un 6% comparado con el mineral original que fue del 26.5%.

**3.3.5. Sales solubles:** La presencia de sales solubles en el mineral fue negativa, porque cualitativamente no se detectaron sales ferrosas, férricas, de cobre y zinc.

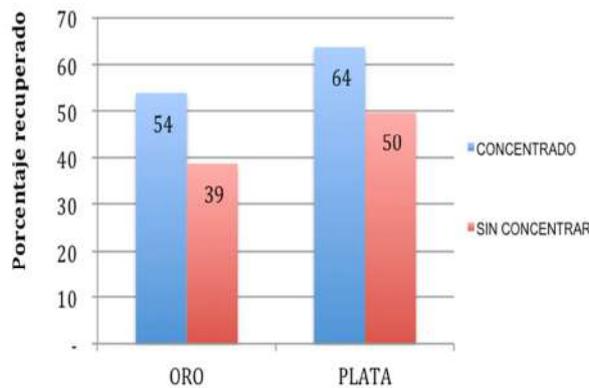
### 3.4. Caracterización metalúrgica

**3.4.1. Distribución de oro por fracciones:** Teniendo en cuenta cada retenido del mineral original en la serie de mallas Tyler elegida para el ensayo granulométrico, se determinó el contenido de oro y plata en estos retenidos con los cuales se realiza el balance de oro y plata y se identifica cual granulometría tiene la mayor cantidad de oro y plata. En la Tabla 5 está la información de los pesos o masas del mineral retenido, el contenido de oro y plata en cada malla y el tenor de oro y plata.

**3.4.2 Grado de lixiviabilidad:** En la Figura 7 se evidencia que el mineral concentrado presenta una mayor recuperación de oro y plata que el mineral sin concentrar. Se ha establecido que cuando la recuperación de oro es menor del 65% el mineral es difícilmente lixiviable, cuando está entre el 65% y el 85% es medianamente lixiviable y cuando la recuperación es mayor del 85% es altamente lixiviable [5]. Para este caso la recuperación fue menor del 65%, por tanto el mineral es difícilmente lixiviable.

**Tabla 5.** Resultados de la determinación de oro y plata por fracciones granulométricas del mineral original.

Malla	Peso retenido mineral (g)	Peso Oro (g)	Tenor Oro (g/ton)	Tenor plata (g/ton)	Peso plata (g)
cabeza	503	0,12124	241	7526	3,7856
-80+140	119,9	0,03794	316,5	7001	0,8394
-140+200	114,1	0,02039	178,7	6909	0,7883
-200+325	135,4	0,02254	166,5	7449	1,0086
-325	133,7	0,01654	123,7	3606	0,4821



**Figura 7.** Porcentajes de recuperación de oro y plata de un mineral sin concentrar y concentrado.

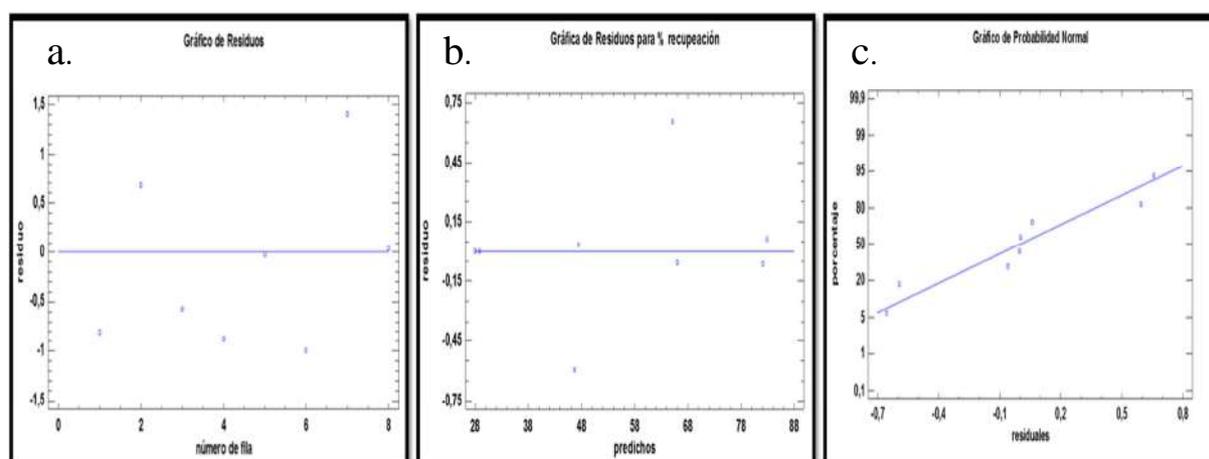
### 3.5. Diseño estadístico experimental

El diseño estadístico de experimentos arrojó un número de ocho ensayos, debido a las combinaciones de los tiempos máximos y mínimos con las concentraciones máximas y mínimas y el orden de ejecución para cada ensayo. El desarrollo experimental de las pruebas de cianuración en botella se realizó en dos bloques donde el segundo bloque es la réplica del primero. El porcentaje de recuperación de oro fue calculado tomando el tenor del mineral de cabeza para todos los ensayos Tabla 2, luego al terminar la prueba se tomó una muestra representativa de la solución lixiviada para evaluar el contenido de oro disuelto (método Chiddy). La diferencia entre la cantidad de oro ingresado inicialmente al sistema y el oro determinado en las soluciones ricas una vez terminada la lixiviación, permitió conocer la cantidad de oro lixiviado y por ende la recuperación total de oro (ver Tabla 6) en cada una de las pruebas. El software utilizado para el diseño experimental fue Statgraphic 16.0.

**Tabla 6.** Resultados pruebas de cianuración en botella del diseño estadístico factorial 2<sup>2</sup>.

Código ensayo	Tenor Au (g/ton)	Tenor Ag (g/ton)	Tenor Au colas (g/ton)	Tenor Ag colas (g/ton)	Recuperación oro (%)	Consumo de cianuro (lb/m <sup>3</sup> )
CABEZA	405,3	12178,3	0	0		
Y11	113,64	317,88	291,66	11860,42	28	2
Y12	116,88	310,8	288,42	11867,5	28,8	2
Y21	266,72	1521,96	138,58	10656,34	65,8	4
Y22	264,63	1587,12	140,67	10590,88	65,3	4
Y31	186,6	1450,8	218,7	10727,5	46	2
Y32	194,64	1485,36	210,66	10692,94	48	2
Y41	332,4	2355,6	72,9	9822,7	82	3,3
Y42	336,12	2736,24	69,18	9442,06	82,9	3,3

**3.5.1. Análisis de varianza para la recuperación de oro:** Una vez cumplidos los tres supuestos (aleatoriedad, varianza constante y normalidad (ver Figura 8)) se construye la tabla ANOVA (Tabla 7) que divide la variabilidad del % de recuperación en partes separadas para cada uno de los efectos, concentración de cianuro y tiempo de cianuración; prueba la significancia estadística de cada efecto comparando su cuadrado medio contra un estimado del error experimental. En este caso, dos efectos tienen un valor-P menor que 0,05 la concentración y el tiempo, indicando que son significativamente diferentes de cero con un nivel de confianza del 95,0%. La interacción del tiempo con la concentración muestra un valor P muy superior al 0,05 por lo cual esta interacción no tiene mayor efecto en la recuperación del oro.



**Figura 8.** Gráficas de validación de los supuestos de aleatoriedad (a. Gráfico de residuos), varianza constante (b. Gráfica para residuos para % recuperación) y normalidad (c. Gráfico de probabilidad normal).

**Tabla 7.** Tabla ANOVA, Resultado de variables importantes para el diseño de experimentos.

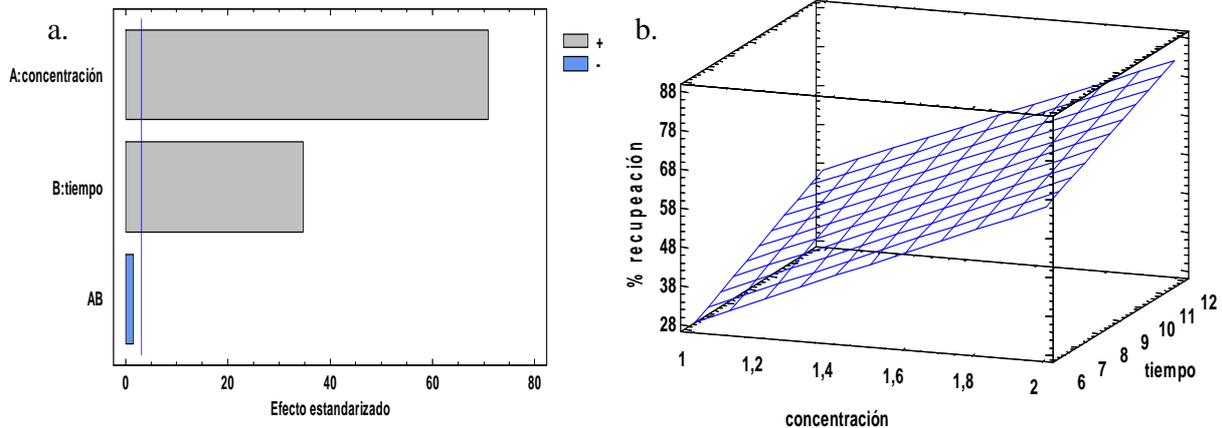
<i>Fuente</i>	<i>Suma de Cuadrados</i>	<i>Gl</i>	<i>Cuadrado Medio</i>	<i>Razón-F</i>	<i>Valor-P</i>
A: concentración de NaCN	2631,93	1	2631,93	5019,58	0,0000
B: tiempo cianuración	630,681	1	630,681	1202,83	0,0001
AB	1,39713	1	1,39713	2,66	0,2011
bloques	1,26826	1	1,26826	2,42	0,2177
Error total	1,573	3	0,524333		
Total (corr.)	3266,85	7			

**3.5.2. Diagrama de Pareto estandarizado para la recuperación del oro:** El diagrama de Pareto (Figura 9a) muestra gráficamente cuales variables son importantes y cuáles no, además de mostrar el orden de importancia que tienen en el gráfico. Las variables importantes siempre están a la derecha de la línea vertical azul que se observa en el gráfico y se conoce como el umbral, en este caso las variables importantes en orden de importancia son la concentración de NaCN y el tiempo de cianuración. El color de cada variable o combinación de variables indica de qué forma afecta la variable la ecuación del modelo, las variables con color gris afectan la ecuación de manera positiva, mientras que las variables de color azul la afectan de forma inversa (Negativo), en este caso la combinación entre la concentración y el tiempo.

**3.5.3. Superficie respuesta:** Estas gráficas de superficie de respuesta estimada se obtienen cuando se evalúan diferentes puntos en la ecuación del modelo ajustado del diseño estadístico de experimentos. Debido a que en estas gráficas se tienen en cuenta cuatro variables, que son el porcentaje de recuperación, el tiempo, la granulometría y la concentración de cianuro, desde un principio de los experimentos se dejó fija la granulometría (pasante 270 mallas Tyler) y así se logró graficar la superficie de respuesta. Se tiene la siguiente superficie de respuesta estimada (Figura 9b), donde se observa que la mayor recuperación de oro fue del 82% , que corresponde a un tiempo máximo de 12 horas y una concentración de 2 g NaCN/l.

**3.5.4. Ecuación del modelo ajustado y coeficientes de regresión para el porcentaje de recuperación de oro:** A continuación se muestra la ecuación del modelo ajustado del diseño de experimentos, con esta ecuación se hace posible que el programa origine las superficies de respuesta adecuadas para el diseño experimental aplicado y los resultados obtenidos.

$$\% \text{recuperación} = -28,9391 + 38,7836 * \text{concent.} + 3,37754 * \text{tiem.} - 0,2786 * \text{concent.} * \text{tiem.}$$



**Figura 9. a)** Diagrama de Pareto estandarizado para el porcentaje de recuperación. **b)** Gráfico de superficie de respuesta estimada para la recuperación de oro.

El estadístico R-Cuadrada indica que el modelo, así ajustado, explica el 99,9518% de la variabilidad en % de recuperación. Para este tipo de modelos se acepta como mínimo un valor de  $R^2$  del 75% para que los resultados sean confiables. El estadístico R-Cuadrada indica que el modelo, así ajustado, explica 99,9518% de la variabilidad en % recuperación. El estadístico R-cuadrada ajustada, que es más adecuado para comparar modelos con diferente número de variables independientes, es 99,8876%. El error estándar del estimado muestra que la desviación estándar de los residuos es 0,724108. El error medio absoluto (MAE) de 0,327998 es el valor promedio de los residuos. El estadístico de Durbin-Watson (DW) prueba los residuos para determinar si haya alguna correlación significativa basada en el orden en que se presentan los datos en el archivo. Puesto que el valor-P es mayor que 5,0%, no hay indicación de autocorrelación serial en los residuos con un nivel de significancia del 5,0%.

#### 4. CONCLUSIONES

- La observación microscópica, entendida en este caso como una inspección directa de los minerales con contenidos de oro y plata y minerales asociados, además del reconocimiento químico preciso de todas estas fases minerales, sienta unos criterios básicos para el diseño del proceso de beneficio de la veta La Esperanza. La caracterización mineralógica permite conocer, a partir de medidas directas, la granulometría y respuesta química de las distintas fases minerales presentes en un eventual proceso de cianuración.
- Los minerales de mena identificados en la veta La Esperanza corresponden a pirita, esfalerita, galena, tetraedrita, argentita, calcopirita, electrum y plata nativa; Los granos de tetraedrita son abundantes, por lo cual es de esperar que sus contenidos de arsénico y antimonio sean perjudiciales durante la cianuración; la presencia de estos dos elementos en la tetraedrita fueron corroborados por EDS; sumado a esto la presencia de minerales poco reactivos al cianuro como la pirita, galena y esfalerita, añaden a la condición de refractariedad química de la veta La Esperanza.

- La granulometría del electrum en la mina La Esperanza varía entre 2 y 210  $\mu\text{m}$ ; la fracción más fina sobrepasa del total de los granos, 68% de los granos fueron clasificados como finos a muy finos (inferiores a 44  $\mu\text{m}$ ).
- La granulometría fina del electrum, así como su asociación preferentemente encapsulado (49,7%) imprimen al depósito cierto grado de refractariedad física; sin embargo, se debe resaltar que al observar la relación entre el grado de liberación del electrum y el área de los granos (equivalente al volumen), el 84,8% del electrum tiene un alto grado de liberación, mientras que el volumen de los granos que permanecerían encapsulado es solo del 9%. Es decir, a pesar de que del total de granos la mayoría son muy finos y encapsulados, al considerar el aporte de oro y plata a la recuperación final, el volumen de cada uno de estos granos cobra un interés particular, los granos más finos representan volúmenes bajos de modo que por medio de la molienda propuesta se esperaría que menos del 9% de los granos no sea expuesto a la cianuración; haciendo la condición de refractariedad física menos severa en este depósito.
- Para obtener mayores recuperaciones es posible aumentar la concentración de cianuro de sodio pues esta variable fue la que mayor tuvo influencia en el diseño estadístico experimental. La combinación de las variables propuestas por medio de un diseño estadístico experimental, permitió la reducción del número de ensayos de cianuración con un alto porcentaje de confiabilidad de los resultados obtenidos.

## 5. AGRADECIMIENTOS

A los profesores de la Universidad de Antioquia Jairo Ruiz, Esperanza López, Claudia Serna, Ricardo Aristizabal y Félix Echeverría, al grupo Gimacyr, explotaciones “La Esperanza” S.A.S, laboratorio Biofénix, ingeniera Dayana Meza, los monitores de los laboratorios del Departamento de Ingeniería de Materiales y a Kevin Moreno.

## 6. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Yáñez, J., García, I., Pedreza, J. Y Laverde, D. “Caracterización de los minerales auríferos de la zona minera de San Pedro Frío (Bolívar, Colombia), para la selección de los procesos de extracción”. Dyna, 72 (145), pp. 23-35. Medellín, Marzo de 2005.
- [2] Gallego, A., Zapata, D. Tesis de pregrado “Caracterización mineralógica como soporte para la implementación y mejoramiento del proceso de extracción de oro, mina de oro “El Zancudo” Titiribí, Antioquia”. 2003. pp 59.
- [3] Macdonald, E. “Handbook of gold exploration and evaluation”. Woodhead Publishing. Cambridge. 2007. pp 285.
- [4] Gallego, J., Ospina, D., Ramírez, A., Manual de procedimiento para la “Cianuración en botella”. Medellín: Grupo Mapre, Universidad de Antioquia. 2013.

[5] La Brooy, S., Lingea, H. "Review of gold extraction from ores". Minerals Engineering, Vol. 7, 1994. pp 1213-1241.

[6] Jackson, M. "BacTech makes their presence in Snow Lake official", 20 Opasquia Times, Fri. Oct 26. 2012.

[7] Gallego, A., Zapata, D., Y Marquez, M., "Mineralogía aplicada a la definición del tipo de refractariedad en la mina de oro El Zancudo, Titiribí, Antioquia", Boletín de Geología, 27(2), 2005, pp.87-97.