

**MEJORAMIENTO DE LA RECUPERACIÓN METALÚRGICA DE  
CONCENTRADO AURÍFERO EN LA SOCIEDAD MINERA LA ELSY LTDA., DEL  
MUNICIPIO DE VETAS, DEPARTAMENTO DE SANTANDER**

**JOSE DANIEL ARDILA REY**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER  
FACULTAD DE INGENIERÍAS FISICOQUÍMICAS  
ESCUELA DE INGENIERÍA METALÚRGICA Y CIENCIA DE MATERIALES  
BUCARAMANGA  
2013**

**MEJORAMIENTO DE LA RECUPERACIÓN METALÚRGICA DE  
CONCENTRADO AURÍFERO EN LA SOCIEDAD MINERA LA ELSY LTDA., DEL  
MUNICIPIO DE VETAS, DEPARTAMENTO DE SANTANDER**

**JOSE DANIEL ARDILA REY**

**PROYECTO PARA OPTAR AL TÍTULO DE  
INGENIERO METALÚRGICO**

**Tutor**

**WALTER PARDAVE LIVIA  
Ingeniero Metalúrgico, M.Sc**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER  
FACULTAD DE INGENIERÍAS FISICOQUÍMICAS  
ESCUELA DE INGENIERÍA METALÚRGICA Y CIENCIA DE MATERIALES  
BUCARAMANGA**

**2013**

## **AGRADECIMIENTOS**

El presente trabajo lo agradezco a Dios por bendecirme y permitirme llegar hasta donde he llegado.

A la Universidad Industrial de Santander, por darme la oportunidad de ser un profesional.

Al Ing. Jhon Freddy Palacios, a mi Tutor de Práctica, Ing. Walter Pardavé Livia, por su tiempo y dedicación, quienes con sus conocimientos, su experiencia, su paciencia y su motivación, han logrado en mí, poder terminar mis estudios con éxito.

A los Técnicos, Ambrosio Carrillo Carrillo, Hector Javier Gaitán Arenas y Mario Alfonso Navarrete, por sus conocimientos en el área de los Laboratorios de Pirometalurgia e Hidrometalurgia.

Agradezco también a la Sociedad Minera La Elsy Ltda., en especial a su Representante Legal, Ing. Israel Arias Gamboa, por darme la oportunidad de realizar mi práctica empresarial, por sus conocimientos, y consejos durante mi estadía en esta empresa.

Son muchas las personas que han formado parte de mi vida profesional a las que me encantaría agradecerles su amistad, consejos, apoyo, ánimo y compañía en los momentos más difíciles de mi vida como estudiante universitario. Sin importar en donde estén, quiero darles las gracias por formar parte de mí, por todo lo que me han brindado y por todas sus bendiciones.

Muchas gracias.

## CONTENIDO

	pág.
INTRODUCCIÓN .....	13
1. JUSTIFICACIÓN.....	14
2. OBJETIVOS.....	15
2.1 Objetivo General.....	15
2.2 Objetivos Específicos.....	15
3. FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA .....	16
3.1 Generalidades del oro.....	16
3.1.1 Mineralogía del Oro. ....	16
3.1.2 Propiedades físicas y químicas del oro.....	17
3.1.3 Estabilidad de los complejos de oro.....	18
3.1.4 Reacción de disolución de oro.....	18
3.1.5 Reacciones de recuperación de oro. ....	19
3.2 Caracterización de minerales auroargentíferos. ....	20
3.3 Beneficio y tratamiento de minerales auroargentíferos.....	21
3.3.1 Proceso de Beneficio. ....	21
3.3.2 Concentración.....	22
3.3.3 Pre-tratamientos para minerales auroargentíferos.....	22
3.3.4 Lixiviación. ....	23
3.3.4.1 Cianuración.....	23
3.3.4.2 Cementación con zinc.....	24
3.4 Flotación de Espumas. ....	25
4. METODOLOGÍA EXPERIMENTAL.....	26
4.1 Etapa I: Diagnóstico y Reconocimiento Inicial .....	26
4.2 Etapa II: Toma de Muestras.....	27

4.3	Etapa III: Pruebas Preliminares, Implementación del proceso y Selección de variables.....	27
4.3.1	Implementación de variables de operación para el mejoramiento de la planta de beneficio de la Sociedad Minera La Elsy Ltda.....	27
4.4	Etapa IV: Análisis de resultados y Elaboración de informe.....	34
4.4.1	Análisis de resultados: Caracterización mineralógica de la MENA y concentrado aurífero de la Mina La Elsy Ltda.....	35
	41	
5.	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	64
	BIBLIOGRAFIA.....	66

## LISTA DE FIGURAS

	Pag.
➤ Figura 1. Diagrama de la metodología empleada para el desarrollo del proyecto.	26
➤ Figura 2. Trituradora de Mandíbula (Mina La Elsy Ltda.)	28
➤ Figura 3. Molino Californiano (Mina La Elsy Ltda.)	29
➤ Figura 4. Mesa Vibratoria (Mina La Elsy Ltda.)	30
➤ Figura 5. Flotación del Mineral (Mina La Elsy Ltda.)	30
➤ Figura 6. Mineral triturado con las modificaciones realizadas (Mina La Elsy Ltda.)	31
➤ Figura 7. Mallas (Mina La Elsy Ltda.)	31
➤ Figura 8. Mesa Vibratoria (Mina La Elsy Ltda.)	32
➤ Figura 9. Esquema actual del proceso de recuperación metalúrgica de la Sociedad Minera La Elsy Ltda.	33
➤ Figura. 10 Esquema propuesta tentativo del proceso de recuperación metalúrgica de la Sociedad Minera La Elsy Ltda.	34
➤ Figura 11. Muestra triturada (Mina La Elsy Ltda.)	35
➤ Figura 12. Muestra molida (Mina La Elsy Ltda.)	35
➤ Figura 13. Muestra del socavón (Mina La Elsy Ltda.)	36
➤ Figura 14. Difractograma de cabeza mineral (Mina La Elsy Ltda.)	38
➤ Figura 15. Difractograma de concentrado mineral de la Mesa Wilfley (Mina La Elsy Ltda.)	38
➤ Figura 16. Difractograma colas de la Mesa Wilfley (Mina La Elsy Ltda.)	39
➤ Figura 17 Espectro de Fluorescencia de Rayos X (Mina La Elsy Ltda.)	40
➤ Figura 18. Muestra Partículas de oro libre, tamaño 84 x 66 $\mu\text{m}$ y 29 x 19 $\mu\text{m}$ (Mina La Elsy Ltda.)	41
➤ Figura 19. Muestra Oro asociado a pirita y galena parcialmente liberado, las partículas de oro tienen tamaños de 92 x 99 $\mu\text{m}$ y 61 x 55 $\mu\text{m}$ (Mina La Elsy Ltda.)	42

➤ Figura 20. Muestra Partículas de oro (76 x 59 $\mu\text{m}$ ) incluido dentro de pirita (Mina La Elsy Ltda.)	42
➤ Figura 21. Muestra Partículas de oro dentro de pirita (57 x 43 $\mu\text{m}$ , 31 x 14 $\mu\text{m}$ , 13 x 13 $\mu\text{m}$ , 29 x 16 $\mu\text{m}$ , 16 x 44 $\mu\text{m}$ , 15 x 32 $\mu\text{m}$ , 15 x 51 $\mu\text{m}$ , 26 x 45 $\mu\text{m}$ , 27 x 30 $\mu\text{m}$ , 18 x 94 $\mu\text{m}$ ) (Mina La Elsy Ltda.)	43
➤ Figura 22. Imágenes SEM – SE (a) y SEM – BSE (b) de la Muestra. (Mina La Elsy Ltda.)	44
➤ Figura 23. Serie de tamices empleado para el ensayo	45
➤ Figura 24. Curva de distribución granulométrica para la muestra	46
➤ Figura 25. Distribución de Oro y Plata	46
➤ Figura 26. Mesa Wilfley (Laboratorio Mina La Elsy Ltda.)	47
➤ Figura 27. Molienda del mineral (Mina la Elsy Ltda.)	48
➤ Figura 28. Celda de Flotación Marca Denver (Mina la Elsy Ltda.)	49
➤ Figura 29. Diagrama de Flujo para ensayo de Flotación (Mina la Elsy Ltda.)	49
➤ Figura 30. Consumo de Cal VS Tiempo de cianuración	56
➤ Figura 31. Consumo de cianuro VS Tiempo de cianuración	57
➤ Figura 32. Consumo de cal VS Tiempo de cianuración	58
➤ Figura 33. Consumo de cianuro de sodio VS Tiempo de cianuración	58
➤ Figura 34. Cinética de cianuración	59
➤ Figura 35. Cinética de cianuración	60
➤ Figura 36. Balance de Materia Diagnóstico (Actual)	62
➤ Figura 37. Balance de Materia Propuesto (con modificaciones)	63

## LISTA DE TABLAS

	Pag.
➤ Tabla 1. Constante de equilibrio K para algunos complejos de oro (+1)	18
➤ Tabla 2. Ensayo al fuego	37
➤ Tabla 3. Clasificación por mallas	45
➤ Tabla 4. Distribución de Oro y Plata	46
➤ Tabla 5. Resultados del Ensayo al fuego de concentración de la muestra en Mesa Wilfley (Mina La Elsy Ltda.)	47
➤ Tabla 6. Resultados del Ensayo de concentración por flotación de la muestra. (Mina La Elsy Ltda.)	50
➤ Tabla 7. Reactivos usados para los ensayos de flotación (Mina La Elsy Ltda.)	50
➤ Tabla 8. Contenido de sales encontrado en la muestra	52
➤ Tabla 9. Determinación de consumo de cal en prueba de lixiviación dinámica de concentrado (Mina La Elsy Ltda.) Con 1000 rpm.	55
➤ Tabla 10. Determinación de consumo de cianuro en prueba de lixiviación dinámica de concentrado (Mina La Elsy Ltda.) Con 1000 rpm.	56
➤ Tabla No. 11. Determinación de consumo de cal en prueba de lixiviación dinámica de concentrado (Mina La Elsy Ltda.) con 1200 rpm.	57
➤ Tabla No. 12. Determinación de consumo de cianuro en prueba de lixiviación dinámica de concentrado (Mina La Elsy Ltda.) con 1200 rpm.	58
➤ Tabla 13. Determinación de % de Au y Ag disuelto de concentrado (Mina La Elsy Ltda.) con 1000 rpm.	59
➤ Tabla 14. Determinación de % de Au y Ag disuelto de concentrado (Mina La Elsy Ltda.) con 1200 rpm.	59
➤ Tabla 15 Determinación de % de Au y Ag recuperado de concentrado (Mina La Elsy Ltda.) con 1000 rpm.	60
➤ Tabla 16 Determinación de % de Au y Ag recuperado de concentrado (Mina La Elsy Ltda.) con 1200 rpm.	61

## RESUMEN

**TITULO:** MEJORAMIENTO DE LA RECUPERACIÓN METALÚRGICA DE CONCENTRADO AURÍFERO EN LA SOCIEDAD MINERA LA ELSY LTDA., DEL MUNICIPIO DE VETAS, DEPARTAMENTO DE SANTANDER \*

**AUTOR:** ARDILA REY, José Daniel. \*\*

**PALABRAS CLAVES:** Vetas, Metalurgia extractiva, Sociedad minera La Elsy Ltda., Lixiviación diagnostica, Cementación con zinc, Flotación.

**DESCRIPCIÓN:** La Sociedad Minera La Elsy Ltda., se encuentra ubicada en el Municipio de Vetas, Departamento de Santander. En la Sociedad Minera La Elsy Ltda., actualmente se recupera el mineral aurífero mediante procesos gravimétricos de manera muy deficiente, sin el conocimiento de las características del mineral que allí se explota, conllevando a que se obtengan bajas recuperaciones del mineral. Este trabajo, en la modalidad de práctica empresarial, se desarrolló con el fin de proponer un proceso de beneficio y tratamiento, que de acuerdo a las características del mineral, mejore la eficiencia de recuperación, el interés de desarrollar procedimientos tecnológicos que puedan servir especialmente para los pequeños mineros, cuyos recursos económicos son limitados, y poder brindar alternativas de desarrollo en cuanto a procesos de producción que contribuyan a la pequeña minería de nuestro país.

El trabajo involucró cuatro etapas, la primera está relacionada con el diagnóstico y reconocimiento Inicial, la segunda etapa consistió en la Toma de Muestras, en la tercera etapa se realizaron las respectivas pruebas del mineral, Implementación del proceso y Selección de variables, y en la cuarta etapa, se procedió a realizar el análisis y discusión de resultados, para la elaboración del informe final.

Como resultado final se implementaron cambios a los procesos de la planta de beneficio de la empresa, aumentando la recuperación del mineral hasta en un 90 %.

---

• Proyecto de Grado

\*\* Facultad de Ingenierías Físico-Químicas. Escuela de Ingeniería Metalúrgica y Ciencia de Materiales.

Tutor. Ing. Walter Pardavé Livia

## ABSTRACT

**TITLE:** IMPROVEMENT METALLURGICAL RECOVERY OF AURIFEROUS CONCENTRATED IN THE ELSY MINING COMPANY, AT THE MUNICIPALITY OF VETAS, SANTANDER DEPARTMENT

**AUTHOR:** ARDILA REY, Jose Daniel\*\*

**KEYWORDS:** VETAS, EXTRACTIVE METALLURGY, THE ELSY COMPANY, DIAGNOSTIC LIXIVIATION, CEMENTATION WITH ZINC, FLOTATION.

**DESCRIPTION:** The Mining Society Elsy Ltda., is located at the municipality of Vetás, Department of Santander. In this Society, currently the auriferous mineral is recovered by gravimetric processes very poorly without the knowledge of the characteristics of the mineral that there is exploited, leading to low recoveries are obtained from the ore. This work, in the form of business practice, was developed in order to propose a benefit and treatment process, which according to the characteristics of the ore, improve recovery efficiency, the interest to develop technological processes that can serve especially for small miners, whose financial resources are limited, and to provide development alternatives in terms of production processes that contribute to our country's small-scale mining.

The work involved four stages, the first related to the diagnosis and initial recognition, the second stage consisted of sampling, in the third stage tests of respective mineral were performed, implementation process and selection variables too, and the fourth stage, we proceeded to perform the analysis and discussion of results, for the final report.

As a final result, changes were implemented in the processes of the company benefit plant, increasing mineral recovery up to 90%.

- 
- Project of Degree

\*\* Physical-Chemical Engineering Faculty. Metallurgical Engineering and Materials Science School.  
Tutor. Ing. Walter Pardavé Livia

## INTRODUCCIÓN

Entre los minerales que se explotan en nuestro país, los auroargentíferos son muy apetecidos por su alto valor económico, sin embargo, su extracción incluye el uso de procesos contaminantes, como la cianuración, que al no ser implementada adecuadamente ocasiona grandes problemas ambientales y de salubridad en las regiones cercanas a la zona minera.

En el municipio de Vetas, Departamento de Santander (Colombia), desde hace muchos años se trabaja la minería en forma artesanal, sin un estudio preliminar de las características de los minerales que allí se extraen, y los desechos de estas labores se vierte al río vetas. En consecuencia, los procesos de beneficio y tratamiento de minerales de oro, resultan ineficientes técnicamente

Dentro de los procesos que se aplican en la empresa, tenemos la cianuración, el cual se emplea para la disolución de oro, produciendo arenas contaminadas con cianuro. El cianuro tiene un menor efecto en el ambiente, pues es fácilmente degradable, sin embargo, un mal control del proceso y un inadecuado manejo de los vertimientos puede ocasionar daños irreparables en las zonas aledañas.

En conclusión, el desconocimiento de las características del mineral y su comportamiento metalúrgico frente a los procesos de beneficio y tratamiento usados en la empresa, hacen que dichos procesos sean ineficientes, obteniendo así una baja recuperación de oro.

## **1. JUSTIFICACIÓN**

En la Sociedad Minera la Elsy Ltda., actualmente se recupera el mineral aurífero mediante procesos gravimétricos de manera muy deficiente.

Actualmente, la empresa cuenta con equipos que permiten una recuperación del mineral aurífero de excelente calidad, pero por la poca orientación acerca del funcionamiento de estos equipos, no se puede obtener una recuperación adecuada del deseado mineral.

Es por esto, que la empresa quiere mejorar todos los aspectos relacionados con la extracción del mineral aurífero, por medio de una completa caracterización del mineral que pueda dar excelentes resultados tanto en la extracción como en la recuperación del mismo.

## **2. OBJETIVOS**

### **2.1 Objetivo General**

Incrementar la recuperación del mineral aurífero con el máximo porcentaje posible mediante la aplicación de un proceso combinado de separación gravimétrica convencional y flotación de espumas.

### **2.2 Objetivos Específicos**

- Realizar caracterización mineralógica, geoquímica, fisicoquímica y metalúrgica del mineral de la Sociedad Minera La Elsy Ltda.
- Realizar un balance de materia en el circuito con los cambios operacionales propuesto.
- Implementar los procesos propuestos para mejorar la recuperación en la extracción del mineral en la Sociedad Minera La Elsy Ltda.

### 3. FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA

#### 3.1 Generalidades del oro

##### 3.1.1 Mineralogía del Oro.

En los minerales, el oro puede estar asociado con otros metales como Ag, Cu, As, Fe, Sb, Bi, Pb, Zn. Los minerales de oro se presentan frecuentemente en dos tipos de depósito:

- Placeres o aluviones
- Veneros de fisuras mineralizadas o filones.

Y han sido clasificados de acuerdo a los ambientes geológicos en los que se originaron y a su facilidad de extracción.

Según los ambientes geológicos, Cardenas<sup>1</sup>, los agrupó en siete grandes categorías:

- Vetas de oro y cuarzo.
- Depósitos epitermales.
- Placeres jóvenes.
- Placeres fósiles.
- Depósitos con oro diseminado.
- Oro en menas de metales no ferrosos o como subproducto.
- Oro en agua de mar.

---

1 CÁRDENAS, Revilla Agustín, Metalurgia Extractiva del Oro, op. cit., p.6.

Quiston y Shoemaker, propusieron la siguiente clasificación según la extracción de oro<sup>2</sup>:

- Menas de oro nativo.
- Oro asociado a sulfuros.
- Teluros de oro.
- Oro en otros minerales (Arsénico y/o Antimonio)

### **3.1.2 Propiedades físicas y químicas del oro.**

Las propiedades físicas y químicas son:

- Cristalización en el sistema cúbico centrado en las caras (FCC). Sin embargo, los cristales de oro son raros, generalmente, el oro se encuentra como planos irregulares, láminas o aglomerados<sup>3</sup>.
- El oro se diferencia de otros minerales que presentan el mismo color, como la pirita y la calcopirita por su maleabilidad y ductibilidad<sup>4</sup>.
- El oro puro presenta gravedad específica de 19.3 gr/cm<sup>3</sup>, y punto de fusión de 1.156 °C.
- En medio alcalino los cianuros de potasio, sodio y calcio, disuelven el oro formando complejos de cianuro.
- También el oro es soluble en agua regia, en soluciones de tiocianato, tioúrea, tiosulfato, y en aquellas que contienen cloro o bromo libre.
- Los compuestos de oro están ligados por un enlace covalente y a menudo están en forma de complejos.

---

2 DOMIC, M. E. Hidrometalurgia, fundamentos, procesos y aplicaciones, Editorial: Andros Impresores Ltda., Chile 2001.

3 CÁRDENAS, Revilla Agustín. Metalurgia Extractiva del Oro, Editorial Imprenta FOCET "Imral" Ltda., Oruro Bolivia, 2000

### 3.1.3 Estabilidad de los complejos de oro.

El oro puede formar diferentes tipos de complejos según el ligando y el agente oxidante que intervengan en la solución:

Complejos aniónicos:  $AuX_2^-$

- Complejos catiónicos:  $AuL_2^+$
- Complejos neutros:  $AuXL$

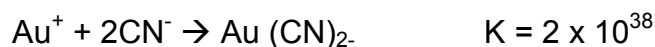
La Tabla 1 presenta las constantes de equilibrio de algunos de los complejos que se pueden formar para la disolución del oro.

Tabla 1. Constante de equilibrio  $K$  para algunos complejos de oro

Ligante		K
Cianuro	$CN^-$	$2 \times 10^{38}$
Tiocianato	$SCN^-$	$1,3 \times 10^{17}$
Tiosulfato	$S_2O_3^{2-}$	$5 \times 10^{28}$
Cloro	$Cl^-$	$1 \times 10^9$
Bromuro	$Br^-$	$1 \times 10^{12}$
Tioúrea	$CS(NH_2)^{-2}$	$2 \times 10^{23}$

Fuente: DOMIC, M. E. Hidrometalurgia, fundamentos, procesos y aplicaciones, Editorial Andros impresores Ltda., Chile, 2001

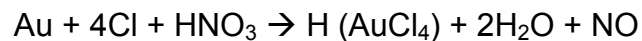
Como se observa en la Tabla 1, el ion complejo más estable formado por el oro es el Aurocianuro ( $Au(CN)_2^-$ ) cuya reacción es la siguiente:



### 3.1.4 Reacción de disolución de oro.

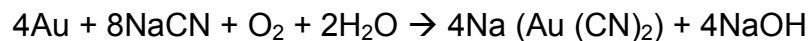
A continuación se muestra el sistema de disolución de oro, con su reacción respectiva.

- Agua regia. El agua regia es una solución de ácido clorhídrico y nítrico en proporciones 3:1, donde el ácido nítrico actúa como agente oxidante y el ácido clorhídrico como agente ligante del oro y la plata. La disolución del oro y la plata con esta solución es usada en química analítica para la determinación volumétrica o gravimétrica del oro soluble. La reacción es la siguiente:



- Soluciones de cianuro. Para la disolución de oro con cianuro, se usan soluciones acuosas de NaCN, KCN y Ca (CN)<sub>2</sub> en presencia de oxígeno, sin embargo, industrialmente se prefiere el cianuro de sodio, por su mayor contenido de CN<sup>-</sup> activo por unidad de peso (53%).

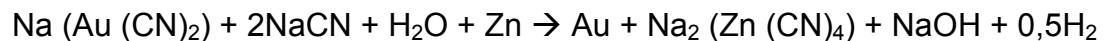
La siguiente reacción de disolución de oro en presencia de cianuro y oxígeno fue establecida por Elsner:



### 3.1.5 Reacciones de recuperación de oro.

Las siguientes son las reacciones que se presentan durante los procesos de recuperación de oro utilizados industrialmente:

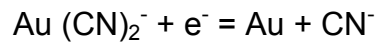
- Cementación con Zinc. La cementación de oro con zinc se usa frecuentemente en la recuperación de oro desde soluciones cianuradas.



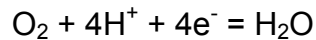
- Electrodeposición. La electrodeposición de oro se aplica industrialmente a soluciones provenientes del proceso de adsorción-desorción, es decir, a soluciones con altas concentraciones de iones Au (CN)<sub>2</sub><sup>-</sup>. Las reacciones

que ocurren en la electrodeposición son de naturaleza electroquímica y se presenta a continuación:

Reacción catódica:



Reacción anódica:



### **3.2 Caracterización de minerales auroargentíferos.**

Durante la caracterización de minerales se obtienen parámetros que ayudan a la selección apropiada de los procesos de beneficio y tratamiento. La caracterización de minerales se puede dividir en cuatro categorías:

- Caracterización mineralógica: Análisis macroscópicos y análisis microscópicos.
- Caracterización geoquímica: ensayo al fuego convencional, ensayo al fuego – absorción atómica, determinación de oro y plata por vía húmeda – digestión.
- Caracterización fisicoquímica: densidad, tenores químicos, viscosidad de pulpas, peso específico y acidez.
- Caracterización metalúrgica: índice de trabajo, análisis granulométrico, distribución de oro, cianuración en botella y determinación cualitativa de sales solubles.

### **3.3 Beneficio y tratamiento de minerales auroargentíferos.**

Existe diversidad de procesos que permiten la obtención de oro en estado metálico desde sus minerales. La selección de los procesos de beneficio y tratamientos adecuados, dependerán de las características del mineral y de su comportamiento frente a estos.

#### **3.3.1 Proceso de Beneficio.**

Consiste en la conminución o reducción de tamaño del mineral para su posterior tratamiento. Se aplica para el procesamiento del oro en filón. Esta etapa es innecesaria para el oro de aluvión, puesto que el mineral se encuentra a un tamaño reducido, apto para los procesos de concentración y el oro se encuentra en su mayoría libre. La conminución se realiza con el fin de:

- Producir partículas de un tamaño adecuado, tal que permita el acceso de las soluciones cianuradas.
- Liberar el oro contenido en la matriz de la ganga.
- Incrementar el área de superficie disponible para la cianuración.

El proceso de conminución comprende dos etapas que se desarrollan secuencialmente: la trituración y la molienda. Existen tres tipos básicos de circuitos de conminución.

- Circuito cerrado convencional en tres etapas: trituración, molienda en molinos de barras y molienda en molinos de bolas.
- Trituración primaria y molienda autógena.
- Trituración primaria, trituración secundaria y por ultimo molienda fina en molino de bolas.

### 3.3.2 Concentración.

La concentración es una operación que tiene como fin, incrementar el tenor del mineral, mediante la separación de dos o más especies mineralógicas, aprovechando la diferencia de propiedades físicas de los minerales, tales como: densidad (concentración gravimétrica), propiedades magnéticas (concentración magnética), conductividad eléctrica (concentración eléctrica). En la minería del oro, se utilizan principalmente las técnicas de concentración gravimétrica.

### 3.3.3 Pre-tratamientos para minerales auroargentíferos.

Algunas menas de oro según su composición mineralógica, pueden presentar un comportamiento de refractariedad a la cianuración, produciendo bajas recuperaciones de oro. Dicha refractariedad pueden ser de tipo físico y químico:

Entre los pre-tratamientos se tiene:

- **Tostación.** La tostación se realiza con el fin de liberar las partículas de oro encapsuladas o adheridas a sulfuros, arseniuros o carbones, eliminar del azufre, arsénico, antimonio y oxidar algunos telurios<sup>4</sup>. La tostación utiliza altas temperaturas en presencia de oxígeno, oxidando los sulfuros y el material carbonáceo presente en el cuerpo mineralizado. El resultado es una calcina blanda y porosa que no encapsula ni recubre las partículas de oro<sup>5</sup>. La temperatura es un factor importante en este proceso, y debe ser controlada para obtener una calcina de óptima calidad. Generalmente es menor a 650°C, para evitar la tostación flash, debido a un pequeño sobrecalentamiento que produce la sintonización de partículas sólidas. La tostación no es aceptada ambientalmente por generación de gases altamente tóxicos para el medio ambiente.

---

4 CARDENAS, Revilla Agustín. Metalurgia Extractiva del Oro, op. cit., p. 13

5 POLING, G. Seminario Taller sobre tecnologías limpias en la recuperación del oro. op. cit., p. 27

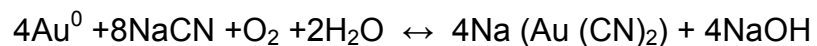
### 3.3.4 Lixiviación.

La lixiviación se define como una etapa en donde se produce una disolución selectiva de metales presentes en las especies mineralógicas, usando una solución disolvente acuoso y un agente oxidante. Para minerales auroargentíferos, se utilizan los siguientes sistemas de lixiviación, siendo la cianuración el de mayor aplicación industrial.

#### 3.3.4.1 Cianuración.

La cianuración consiste en la disolución de los metales preciosos (oro) en soluciones de cianuro alcalino, para luego precipitarlos a su estado metálico mediante la cementación o la electrodeposición<sup>6</sup>.

Este proceso ha sido estudiado desde años atrás por diferentes científicos, y cada uno de ellos ha contribuido al mejor entendimiento de la cinética y termodinámica de la cianuración de los minerales auroargentíferos<sup>7</sup>. Elsner fue el primero en establecer la necesidad de la presencia de oxígeno para la disolución del oro en soluciones cianuradas:



De otro lado, se conoce que la eficiencia de extracción de oro durante el proceso de cianuración está determinada por el control de los siguientes parámetros:

---

6 CARDENAS, Revilla Agustín. Metalurgia Extractiva del Oro, op. cit., p. 13

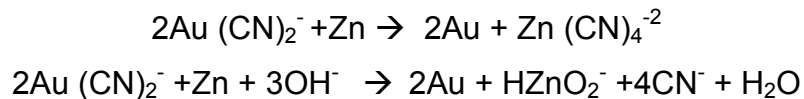
7 DOMIC, M. E. Hidrometalurgia, fundamentos, procesos y aplicaciones, Editorial: Andros Impresores Ltda., Chile 2001.

- Concentración de cianuro.
- Grado de acidez.
- Concentración de oxígeno en solución.

Existen otros parámetros que se deben tener en cuenta durante el proceso como la velocidad de agitación, la granulometría del mineral y la presencia de cianicidas y consumidores de oxígeno. Si la mena contiene elementos consumidores de oxígeno, se recomienda hacer una pre- aireación antes de la adición de cianuro.

#### 3.3.4.2 Cementación con zinc.

La cementación es un sistema redox heterogéneo en el cual los iones aurrocianuro y cianuro tienen que transferirse a la superficie del zinc para ser adsorbidos en ella<sup>8</sup>. La reacción de reducción toma lugar en dicha superficie, los productos de la reacción son desorbidos y estos son transportados a la solución. La velocidad de cada uno de los pasos anteriores va a ser función del área disponible del zinc. Las reacciones que ocurren durante este proceso son<sup>9</sup>:




---

8 DOMIC, M. E. Hidrometalurgia, fundamentos, procesos y aplicaciones, Editorial: Andros Impresores Ltda., Chile 2001

9 POLING, G. Seminario Taller sobre tecnologías limpias en la recuperación del oro. op. cit., p. 27

Los factores más importantes en este proceso son<sup>10</sup>:

- La concentración de cianuro afecta directamente la velocidad de cementación. Se requiere una concentración mínima crítica de cianuro libre de 900 mg/L.
- La presencia de oxígeno en la solución retarda la reacción de reducción e incrementa el consumo de zinc, se debe mantener una concentración de oxígeno inferior a 1 ppm.
- Las partículas suspendidas en la solución pasivan el proceso de precipitación de oro, ya que tienden a recubrir la superficie del zinc, disminuyendo el área superficial disponible para la cementación.

### **3.4 Flotación de Espumas.**

En su forma más simple, es un proceso de gravedad modificado en el que el mineral metálico finamente triturado se mezcla con un líquido. El metal o compuesto metálico suele flotar, mientras que la ganga se va al fondo. En algunos casos ocurre lo contrario. En la mayoría de los procesos de flotación modernos se emplean aceites u otros agentes tensoactivos para ayudar a flotar al metal o a la ganga. Esto permite que floten en agua sustancias de cierto peso. Cuando se insufla aire en esta mezcla se forma una espuma en la superficie, que se mezcla con el sulfuro pero no con la ganga. Esta última se va al fondo, y el sulfuro se recoge de la espuma.

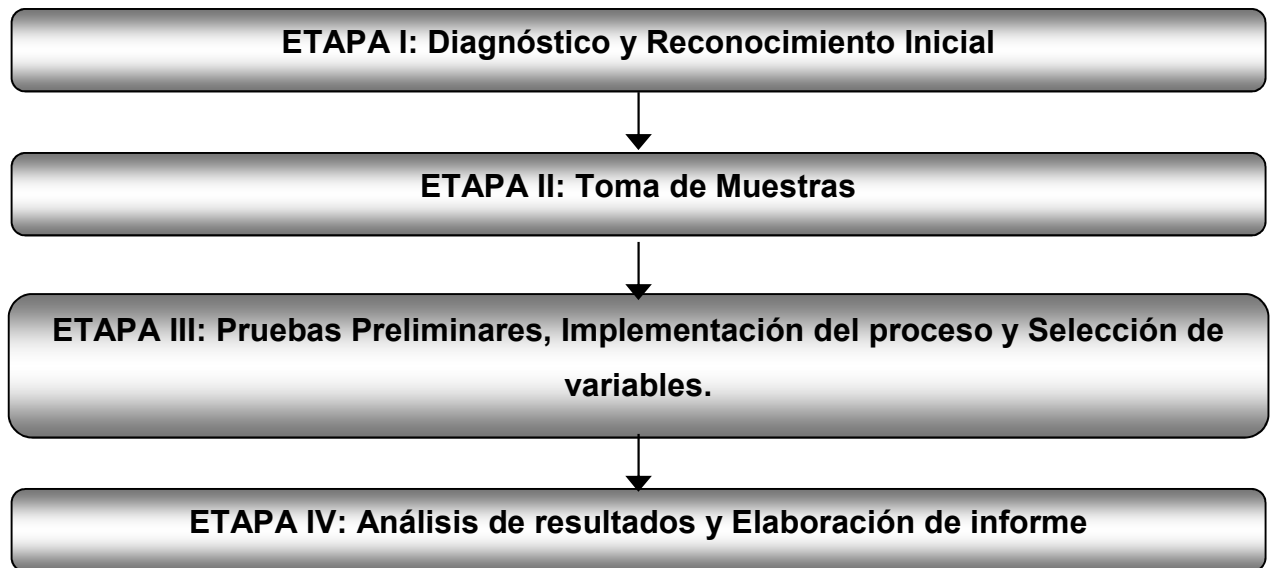
---

<sup>10</sup> BUSTAMANTE, R. O. Programa modular: Procesamiento de minerales auro-argentíferos. Módulo 6 Concentración de minerales. Convenio CIMEX, MINERALCO, SENA. Colombia, 1992.

## 4. METODOLOGÍA EXPERIMENTAL

En la siguiente figura se presenta la secuencia de las etapas realizadas para el desarrollo y ejecución de los objetivos planteados en el marco del proyecto.

*Figura No. 1. Diagrama de la metodología empleada para el desarrollo del proyecto.*



Fuente: El Autor

Esta metodología planteada se realizará en las siguientes etapas:

### 4.1 Etapa I: Diagnóstico y Reconocimiento Inicial

En esta etapa se llevó a cabo el reconocimiento de la situación actual de producción de la Sociedad Minera La Elsy Ltda., recolectando información y registros fotográficos de la maquinaria y los equipos utilizados en el desarrollo de este proyecto.

Por parte del Representante Legal de la empresa minera, Ing. Israel Arias Gamboa, se realizaron retroalimentaciones sobre la información de la empresa, diferentes actividades y procesos que se realizan para la extracción del mineral aurífero.

## **4.2 Etapa II: Toma de Muestras**

En esta etapa se realizaron diversas extracciones de mineral desde el socavón ubicado en la zona minera de la empresa, con el objetivo de realizar posteriormente los diferentes análisis tanto químicos como granulométricos del mineral.

Durante esta etapa, fueron extraídas cuatro (4) muestras del material, de las cuales por medio del método de cono y cuarteo, se tomó una muestra representativa para los ensayos posteriores.

## **4.3 Etapa III: Pruebas Preliminares, Implementación del proceso y Selección de variables.**

El objetivo de esta etapa fue analizar la respuesta del mineral frente a los diferentes procesos aplicados en la extracción de minerales auroargentíferos y determinar las mejores condiciones en cada uno de los procesos.

### **4.3.1 Implementación de variables de operación para el mejoramiento de la planta de beneficio de la Sociedad Minera La Elsy Ltda.**

Luego de revisar todos los equipos que conforman la planta de beneficio del mineral aurífero de la Sociedad Minera La Elsy Ltda., se realizaron una serie de modificaciones a las variables de operación en planta, para mejorar la

recuperación del mineral aurífero, obteniendo resultados positivos. A continuación se muestran estos cambios:

- **Trituradora de Quijadas:**

*Figura No. 2. Trituradora de Mandíbula (Mina La Elsy Ltda.)*



Fuente: El Autor

Marca: DENVER ORIGINAL. GENERAL ELECTRICAL

Dimensión de Mandíbulas: 12" de largo \* 8" de ancho \* 23" de profundo

Dimensión Equipo considerando estructura:

Largo = 1.85 m    Ancho= 1.18 m    Alto = 1.80 m

Posee motor: 10 hP, 220/440 V, trifásico, 1200 rpm, US electrical.

Capacidad: 2 toneladas de mineral / hora de operación.

Posee caja de controles de encendido y apagado.

Se cambiaron las mandíbulas de la trituradora, y se probó su funcionamiento con una reducción de partícula del 80% con respecto a la que tenía inicialmente.

- **Molino californiano:**

Este molino tenía un sistema de mallas No. 24, dejando pasar mineral muy grueso, presentado pérdidas en la recuperación del mineral, al momento de pasar a la mesa concentradora.

Lo que se realizó en este equipo, fue reemplazar la malla que se encuentra ubicada en la parte inferior del molino, permitiendo obtener un excelente tamaño de partícula con una malla No. 18.

*Figura No. 3. Molino Californiano (Mina La Elsy Ltda.)*



Fuente: El Autor

- **Mesa Vibratoria**

Equipo de concentración gravimétrica que se vale también de la diferencia de pesos específicos de los minerales, en tanto que utiliza la vibración constante en dos direcciones.

Dimensiones:

Largo = 2.40 m

Ancho= 1.18 m

Capacidad = 2.5 m<sup>3</sup> / hora

Posee polea de 53 cm de diámetro en buen estado con su respectivo eje y chumaceras.

Posee motor de 1 Hp, 1145 rpm, trifásico. Contiene su juego de rifles completo que se tuvo que revisar y cambiar, porque cada uno de ellos tenía demasiada

altura, lo cual no permitía la decantación adecuada de los minerales de mayor peso.

A la tubería para el agua de lavado se le instaló un tubo de PVC de 5 ½ “ de diámetro en forma de  $\perp$ , debido a que el caudal era muy turbulento y no se contaba con una llave para el control de flujo laminar que se quería obtener.

El sistema de regulación de ángulo de inclinación, no era el indicado, y se graduó de tal forma que se mejorara el funcionamiento operacional de la mesa.

*Figura No. 4. Mesa Vibratoria (Mina La Elsy Ltda.)*



Fuente: El Autor

- **Flotación de espumas**

Se montó una celda de flotación piloto, con el objetivo de recuperar mineral que no se podía recuperar en la mesa vibratoria, y se realizaron pruebas en planta, a fin que fuera una alternativa viable para la recuperación del mineral aurífero.

*Figura No. 5. Flotación del Mineral (Mina La Elsy Ltda.)*



Fuente: El Autor

## RESULTADOS OBTENIDOS

Trituración: Este es el primer proceso que afronta el material, se realizó en la trituradora de mandíbulas de hierro forradas en tungsteno, para que sean más resistentes con el cambio de las mandíbulas de la trituradora. Los materiales tienen una dureza según pruebas de laboratorio de 7- 8 en la escala de Mohs y esto lo hace altamente abrasivo. El tamaño de entrada de material, oscila entre rocas de 6" y 10" de diámetro promedio y el tamaño obtenido oscila entre  $\frac{3}{4}$ " y  $1\frac{1}{2}$ " de diámetro promedio.

*Figura No. 6. Mineral triturado con las modificaciones realizadas (Mina La Elsy Ltda.)*



Fuente: El Autor

Molienda: se obtuvieron tamaños de material menores a 100 mallas. Fue necesario realizar pruebas de molienda en laboratorio para verificar los tiempos y los tamaños obtenidos para que el proceso fuera óptimo.

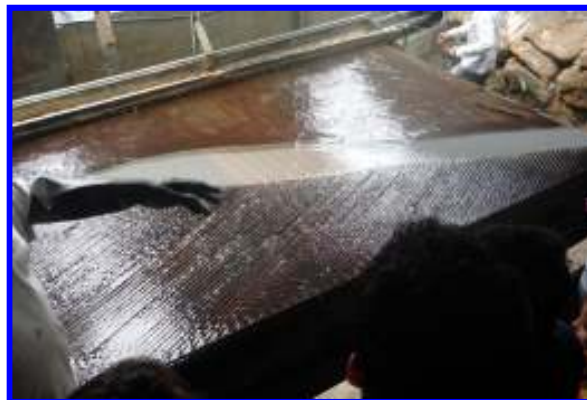
*Figura No. 7. Mallas (Mina La Elsy Ltda.)*



Fuente: El Autor

Concentración Gravimétrica: Esta etapa del proceso en planta se realizó en una mesa vibratoria, que se encargará de separar los metales valiosos por diferencia de gravedades, así, el cuarzo y los posibles óxidos existentes quedan en la zona de medios y colas y los sulfuros quedan en la zona de concentrados. La vibración de la masa permitió que el oro libre y de mayores tamaños, se liberara en función de su peso. El concentrado de mesa, irá directamente a cianuración, las colas y los medios irán al proceso de flotación. De esta forma se garantizará la posterior recuperación del oro de menores tamaños e iónicamente asociados a los sulfuros. Según las pruebas de gravimetría en laboratorio, dio como resultado que la concentración se puede dar a razón de 4:1, es decir, que de 30 toneladas de material que se pasen por día, obtendremos 7 toneladas de concentrado.

*Figura No. 8. Mesa Vibratoria (Mina La Elsy Ltda.)*



Fuente: El Autor

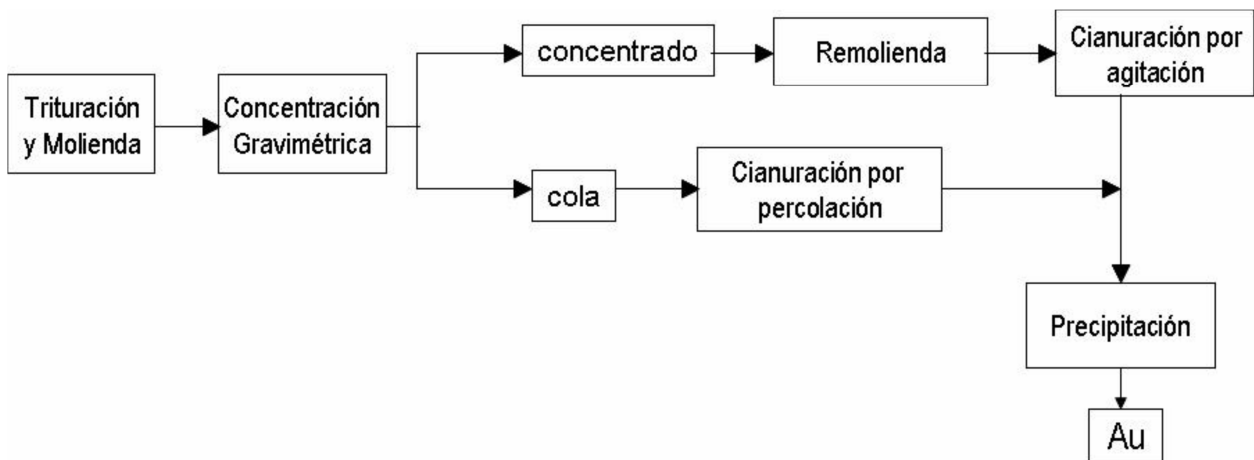
Flotación: El objetivo de esta implementación, era capturar en el concentrado todos los valiosos que no fueron capturados en la mesa, ya que poseen menores tamaños. Según pruebas de flotación en planta sabemos que podemos alcanzar una razón de concentración de 10.9, es decir, que de cada tonelada de pulpa que entre a la columna se obtiene 0.091 toneladas de concentrado.

Cianuración: En la etapa de cianuración, se trataron los respectivos concentrados provenientes de la mesa vibratoria, de la celda de flotación.

Este proceso de reacción química se realizó en tres tanques agitadores con fondo cónico, donde se evaluó la eficiencia como se presentaron en los resultados.

La recuperación del mineral aurífero que se encuentra implementada en la Sociedad Minera La Elsy Ltda., antes de sus modificaciones, está esquematizada en el siguiente diagrama.

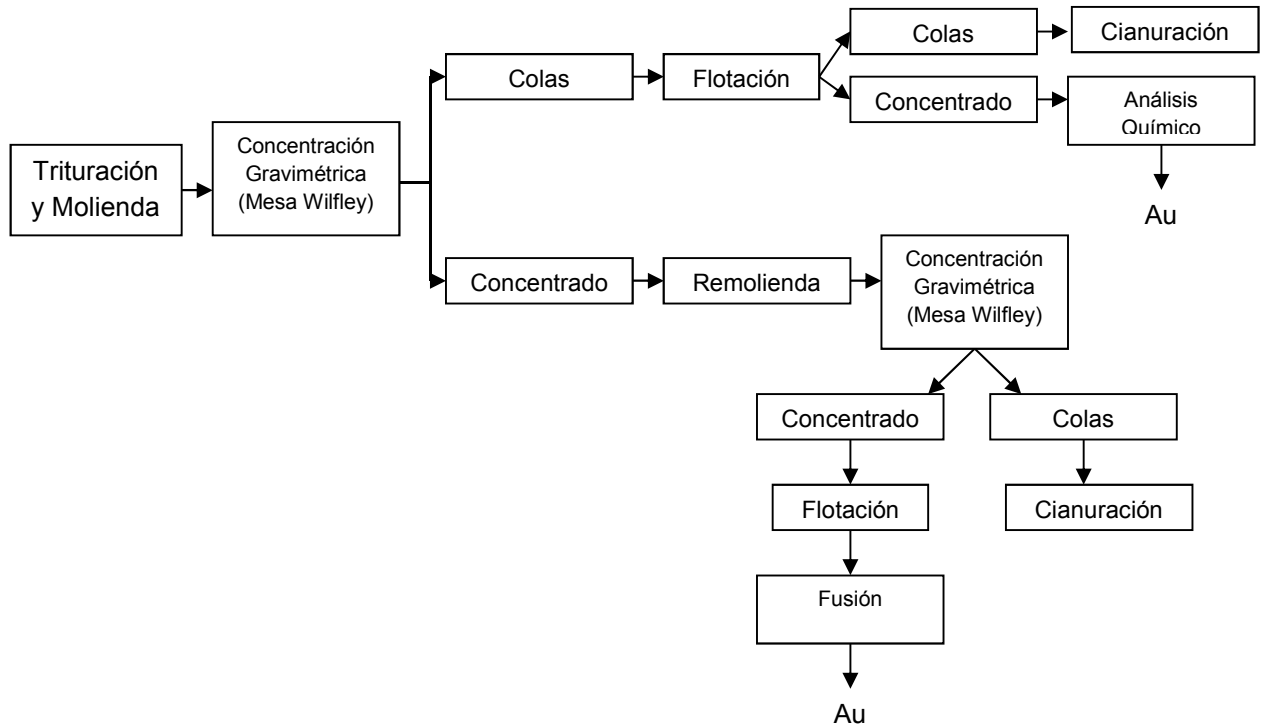
*Figura 9. Esquema actual del proceso de recuperación metalúrgica de la Sociedad Minera La Elsy Ltda.*



Fuente: El Autor

Para las modificaciones que se realizaron en la Sociedad Minera La Elsy Ltda., se presentó la siguiente propuesta:

*Figura. 10 Esquema propuesta tentativo del proceso de recuperación metalúrgica de la Sociedad Minera La Elsy Ltda.*



Fuente: El Autor

#### 4.4 Etapa IV: Análisis de resultados y Elaboración de informe

En esta etapa los resultados obtenidos se documentaron, especificando los procedimientos realizados, y así se dio por concluido el desarrollo y la viabilidad del proyecto.

#### **4.4.1 Análisis de resultados: Caracterización mineralógica de la MENA y concentrado aurífero de la Mina La Elsy Ltda.**

En el desarrollo de las pruebas mineralógicas se buscó como objetivo, obtener un concentrado del mineral con el mínimo de pérdidas generando índices tecnológicos apropiados. La planta de minerales de la Sociedad Minera La Elsy Ltda., fue empleada en esta actividad. Las operaciones unitarias usadas fueron:

Conminución: En el desarrollo de la conminución el mineral fue sometido a trituración primaria, empleando trituradora de quijadas, seguida de una molienda hasta 80% pasante malla 65. La molienda en húmedo con un porcentaje de sólidos cercana al 60%, se efectuó en un molino de bolas con un coeficiente de llenado del 40% y permitió obtener un d80 pasante malla 65.

*Figura No. 11. Muestra triturada (Mina La Elsy Ltda.)*



Fuente: El Autor

*Figura No. 12. Muestra molida (Mina La Elsy Ltda.)*



Fuente: El Autor

Caracterización Macroscópica: Como resultado del muestreo realizado de extracción del mineral del socavón, se procedió a evaluar macroscópicamente el mineral obteniéndose los siguientes resultados:

La muestra presenta dos asociaciones mineralógicas diferentes: La primera corresponde a la roca en una proporción del 20% respecto a la muestra, y la segunda presenta una agrupación de sulfuros con una proporción del 80% de la muestra.

Primera asociación: Corresponde a una roca ígnea intermedia con presencia de cuarzo y pirita, de grano medio de color blanco grisáceo.

Segunda asociación: Sulfuro que se observa:

Pirita: se encuentra en masas cristalinas, diseminada y fresca, con tamaño de 60% del 80%, granos de fino a medio y desarrollo de cristales.

Nota: Dado el alto contenido de pirita, la roca presenta un brillo metálico. La pirita presenta buen desarrollo cristalino y en general se encuentra fresca.

*Figura No. 13. Muestra del socavón (Mina La Elsy Ltda.)*



Fuente: El Autor

Ensayo al fuego de la muestra: este ensayo se realizó por duplicado con 30 gramos del mineral, los resultados se muestran a continuación:

*Tabla 2. Ensayo al fuego*

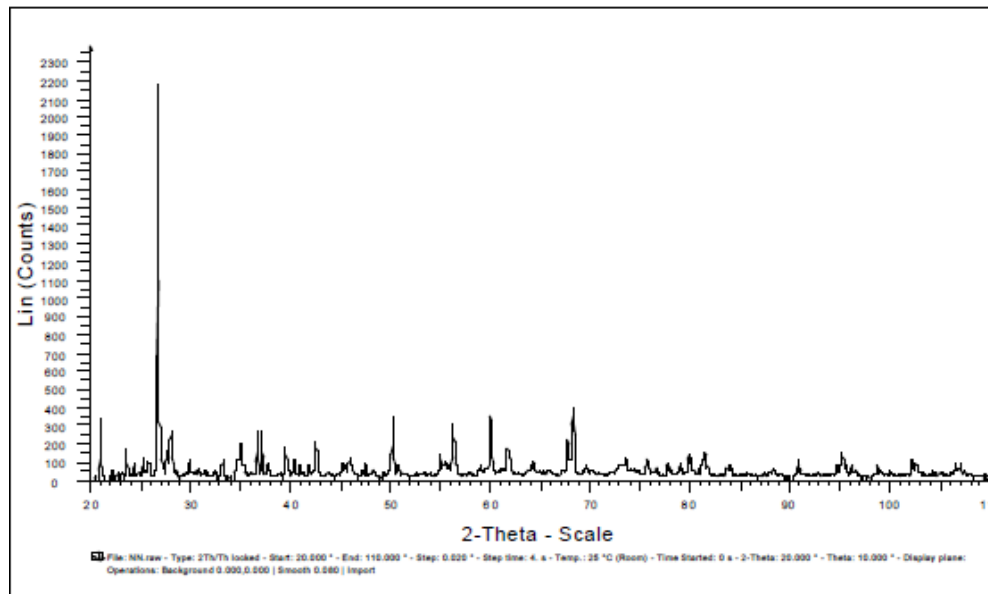
<b>Mineral</b>	<b>Tenor de oro (g Au / Ton Mineral)</b>	<b>Tenor de plata (g Ag / Ton Mineral)</b>
<b>Ensayo 1</b>	6.38	7.65
<b>Ensayo 2</b>	6.98	8.02
<b>promedio</b>	6.68	7.835

Difracción de Rayos X: Al mineral de cabeza se le practicó difracción de Rayos X así:

La difracción de Rayos X fue hecha en los Laboratorios de Petrografía de la Universidad Nacional de Colombia, Sede Medellín, en un equipo ADVANCE BRUKER AXS y radiación CuK $\alpha$  con un barrido de 20 a 110 grados, tamaño de paso de 0,02 grados y tiempo de conteo de 4 segundos.

Se realizaron exámenes DRX de una muestra del mineral de cabeza, concentrados y colas de mesa vibratoria, para identificar los minerales presentes y observar la distribución mineralógica en los diferentes flujos. Los picos característicos de los minerales en las diferentes pruebas de DRX se pueden observar en las siguientes figuras:

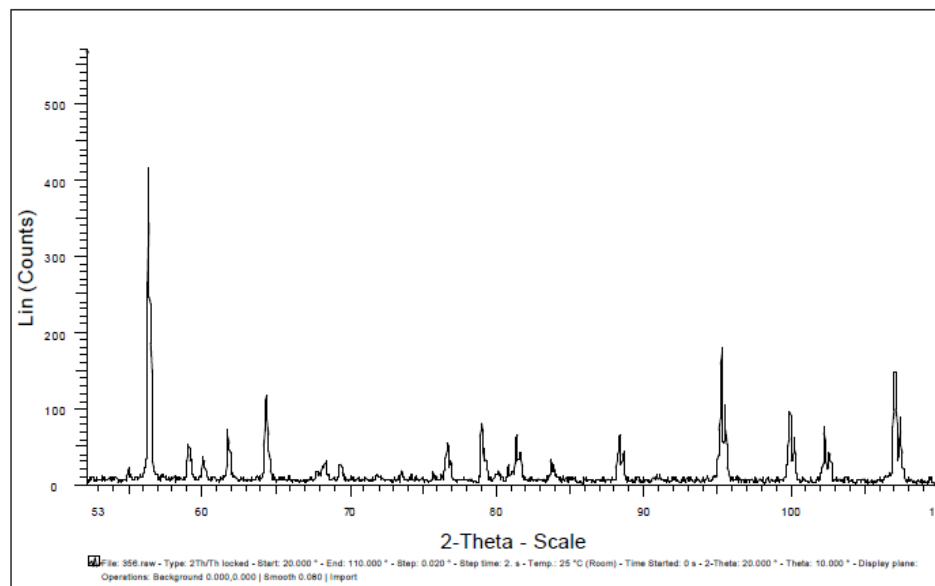
Figura No. 14. Difractograma de cabeza mineral (Mina La Elsy Ltda.)



Fuente: Laboratorios de Petrografía de la Universidad Nacional de Colombia, Sede Medellín

La prueba de DRX del mineral de cabeza (Figura 14) reporta los siguientes minerales: cuarzo, pirita, moscovita, y arsenopirita. Parte de estos minerales ya habían sido identificados en la mineralogía de muestras de mano.

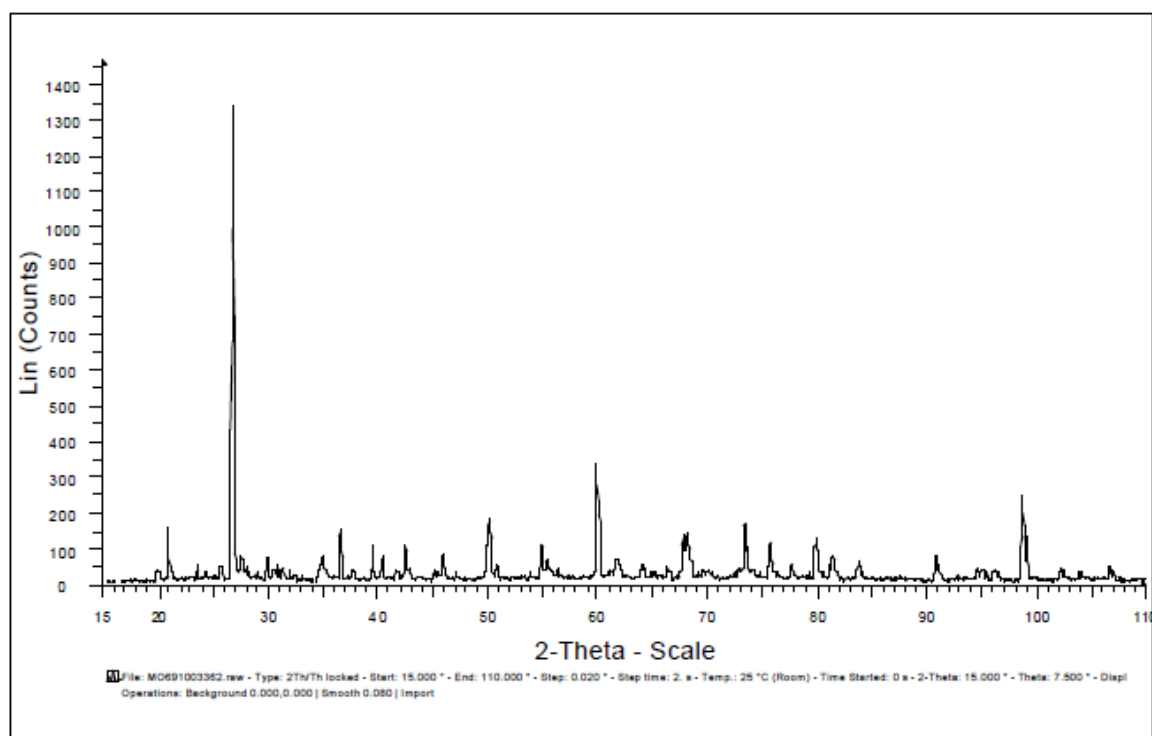
Figura No. 15. Difractograma de concentrado mineral de la Mesa Wilfley (Mina La Elsy Ltda.)



Fuente: Laboratorios de Petrografía de la Universidad Nacional de Colombia, Sede Medellín

Los resultados obtenidos de las difracciones revelaron que en el concentrado de la Mesa Wilfley (Figura 15), se encontraban minerales como cuarzo y pirita; la presencia de cuarzo dentro del concentrado siendo un principio de mala operación de la mesa por la diferencia de densidades entre los dos minerales.

*Figura No. 16. Difractograma colas de la Mesa Wilfley (Mina La Elsy Ltda.)*

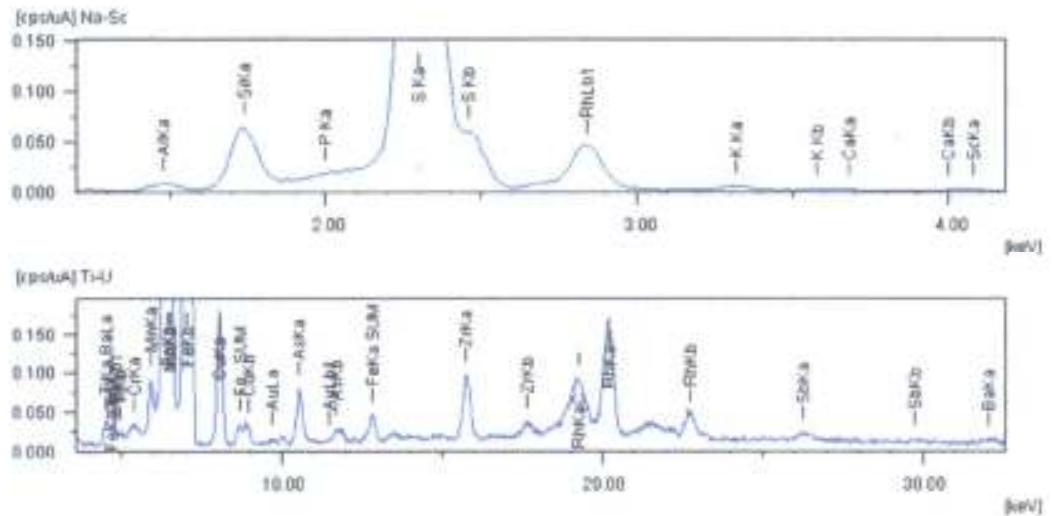


Fuente: Laboratorios de Petrografía de la Universidad Nacional de Colombia, Sede Medellín

Los resultados de la difracción de las colas de la mesa (Figura 16) muestran minerales como cuarzo, pirita y moscovita. La pirita y el cuarzo reportados en las colas de la mesa confirman la mala operación de los equipos y la pérdida de valiosos.

Análisis químico elemental por fluorescencia de rayos x de la muestra: A continuación se muestran los resultados obtenidos por la técnica de espectrometría de fluorescencia de Rayos X de energía dispersiva.

Figura No. 17 Espectro de Fluorescencia de Rayos X (Mina La Elsv Ltda.)



01	Base			
2	Elen.	S03	33.090	% ( 0.077)
2	Elen.	Fe203	30.071	% ( 0.042)
2	Elen.	Si02	7.190	% ( 0.065)
2	Elen.	P205	1.468	% ( 0.032)
2	Elen.	Al203	1.160	% ( 0.053)
2	Elen.	Cu0	0.307	% ( 0.004)
2	Elen.	K20	0.166	% ( 0.007)
2	Elen.	Mn0	0.148	% ( 0.004)
2	Elen.	Sn0	0.085	% ( 0.015)
2	Elen.	Ti02	0.082	% ( 0.008)
2	Elen.	As203	0.070	% ( 0.002)
2	Elen.	Zr02	0.047	% ( 0.001)
2	Elen.	Cr203	0.025	% ( 0.003)
2	Elen.	Sb203	0.025	% ( 0.003)
2	Elen.	Ca0	0.022	% ( 0.004)
2	Elen.	Sc203	0.017	% ( 0.003)
2	Elen.	Au20	0.008	% ( 0.001)
2	Elen.	CO2	26.000	% (-----)

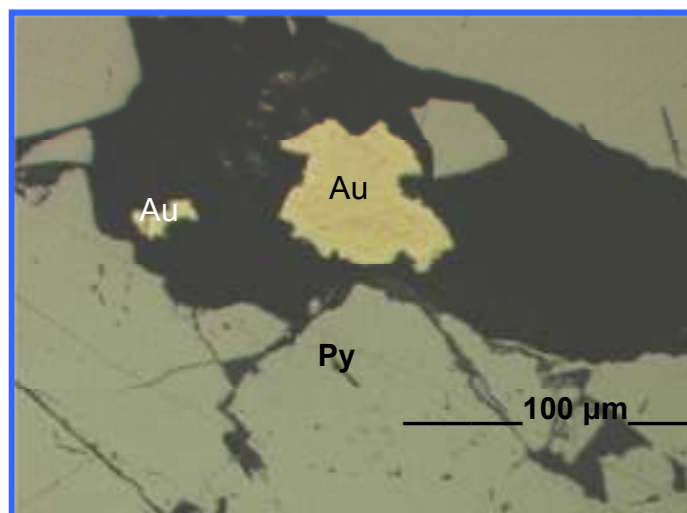
Fuente: Laboratorios Química - Universidad Industrial de Santander, Sede Bucaramanga

Microscopía óptica de luz reflejada: Para identificar las interrelaciones entre las especies minerales asociadas al oro, se practicó microscopía óptica de luz

reflejada. Se obtuvieron cuatro secciones pulidas de la muestra, con el fin de identificar las asociaciones del oro, su forma y tamaño. La microscopía óptica de luz reflejada se realizó en los laboratorios de Petrografía de la Universidad Nacional de Colombia, Sede Medellín, por petición del señor Israel Gamboa Arias, Representante Legal de la Sociedad Minera La Elsy Ltda. Los resultados entregaron información acerca de la forma de ocurrencia del oro, asociaciones mineralógicas típicas, tamaños de las partículas individuales de oro y de minerales sulfurados.

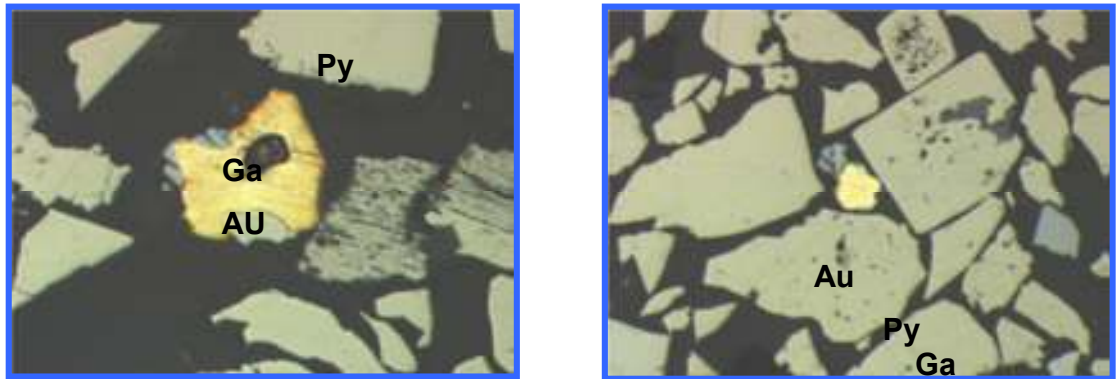
Como se puede observar en la Figura 18, en esta muestra son comunes las partículas de oro libre de tamaño grueso, entendiéndose así que las partículas gruesas de oro son fácilmente liberadas por el proceso tradicional de molienda. Adicionalmente se encontró oro grueso ( $80\ \mu\text{m}$ ) asociado a pirita y galena como se muestra en la Figura 19.

*Figura No. 18. Muestra Partículas de oro libre, tamaño  $84 \times 66\ \mu\text{m}$  y  $29 \times 19\ \mu\text{m}$  (Mina La Elsy Ltda.)*



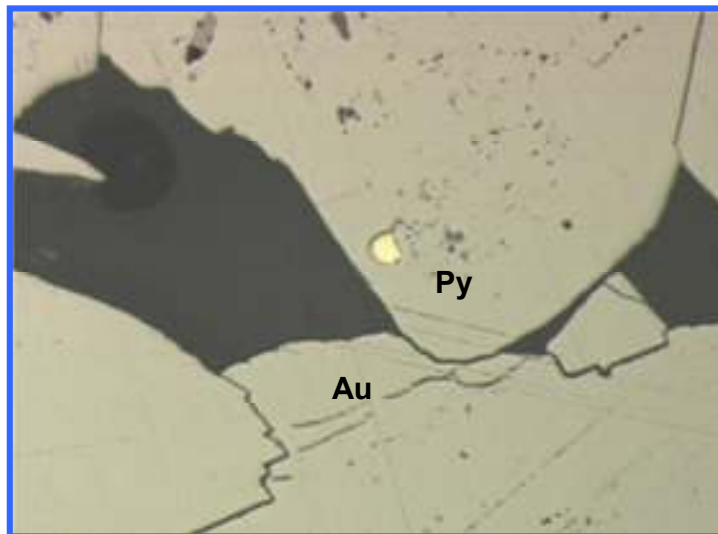
Fuente: Laboratorios de Petrografía de la Universidad Nacional de Colombia, Sede Medellín

*Figura No. 19. Muestra Oro asociado a pirita y galena parcialmente liberado, las partículas de oro tienen tamaños de 92 x 99  $\mu\text{m}$  y 61 x 55  $\mu\text{m}$  (Mina La Elsy Ltda.)*



Fuente: Laboratorios de Petrografía de la Universidad Nacional de Colombia, Sede Medellín

*Figura No. 20. Muestra Partículas de oro (76 x 59  $\mu\text{m}$ ) incluido dentro de pirita (Mina La Elsy Ltda.)*

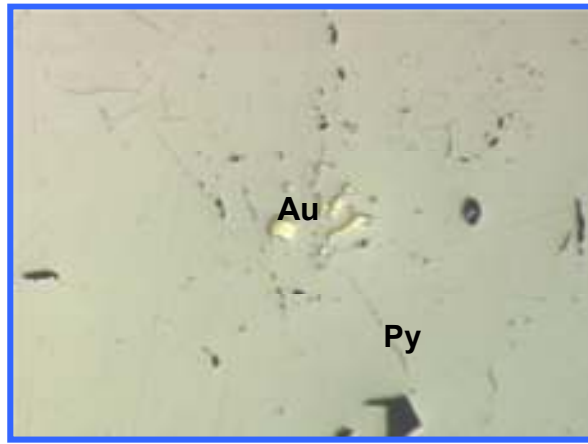


Fuente: Laboratorios de Petrografía de la Universidad Nacional de Colombia, Sede Medellín

A pesar de que las partículas de oro encontradas son relativamente gruesas, muchas de ellas se encuentran completamente incluidas dentro de los sulfuros como es el caso que se observa en la Figura 20, donde se encuentra totalmente incluido dentro de la pirita.

Las partículas de oro, a pesar que reducen su tamaño, se pueden seguir considerando gruesas, el problema surge debido a que estas se encuentran completamente incluidas dentro de los sulfuros. Ver Figura 21

*Figura No. 21. Muestra Partículas de oro dentro de pirita (57 x 43  $\mu\text{m}$ , 31 x 14  $\mu\text{m}$ , 13 x 13  $\mu\text{m}$ , 29 x 16  $\mu\text{m}$ , 16 x 44  $\mu\text{m}$ , 15 x 32  $\mu\text{m}$ , 15 x 51  $\mu\text{m}$ , 26 x 45  $\mu\text{m}$ , 27 x 30  $\mu\text{m}$ , 18 x 94  $\mu\text{m}$ ) (Mina La Elsy Ltda.)*



Fuente: Laboratorios de Petrografía de la Universidad Nacional de Colombia, Sede Medellín

El sulfuro predominante es la pirita, seguida por esfalerita, galena, y en proporciones traza pirrotita, calcopirita y arsenopirita. La proporción de sulfuros en la MENA es variable y puede fluctuar entre el 10% y el 30% de los componentes totales del mineral.

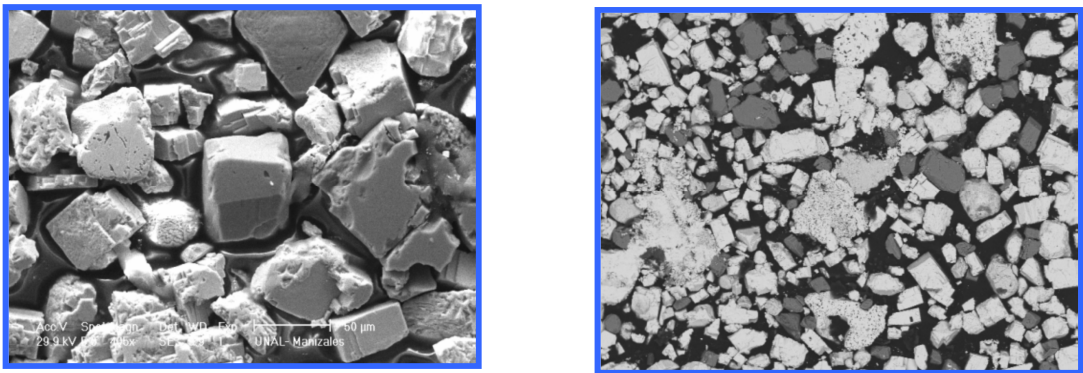
Microscopia electrónica de Barrido: En la caracterización mineralógica se practicó la Microscopia Electrónica de Barrido. Se realizaron análisis de microscopía electrónica de barrido a las muestras de concentrados de mesa vibratoria, procedentes de la molienda del mineral. Los concentrados de mesa fueron sometidos a una limpieza en batea.

Las muestras fueron recibidas en un montaje de vidrio delgado, fijadas con pegante epóxico blando. Dadas las condiciones en que deben ser medidas fue

necesario realizar un proceso de metalización con carbón, el cual se realizó en una cámara de vacío mediante una descarga de plasma continua con un electrodo de grafito y un ambiente gaseoso de Argón, el voltaje de la descarga fue de 1.300 V, a una corriente de 50 miliamperios durante 30 minutos.

La muestra se caracteriza por estar conformada por partículas de diferente composición y muy distribuida en tamaño, como el principal objetivo del análisis era identificar las partículas de Oro, se tomaron imágenes SEM en alto vacío con detector de electrones secundarios (SE) para distinguir morfológicamente las distintas partículas, y con detector de electrones retrodispersados (BSE) para diferenciarlas químicamente. El resultado de esa diferenciación morfológica y química se muestra en la figura 13 (pág. 36).

*Figura No. 22. Imágenes SEM – SE (a) y SEM – BSE (b) de la Muestra. (Mina La Elsy Ltda.)*



Fuente: Laboratorios de Petrografía de la Universidad Nacional de Colombia, Sede Medellín

Distribución de oro y plata en fracciones granulométricas para la muestra: Con la muestra molida, se procedió a clasificarla por tamices utilizando la serie Tyler con números de mallas: 35, 65, 100, 150, 200 y -200. Los retenidos y el pasante de la malla 200 se analizaron por ensayo al fuego.

Figura No. 23. Serie de tamices empleado para el ensayo



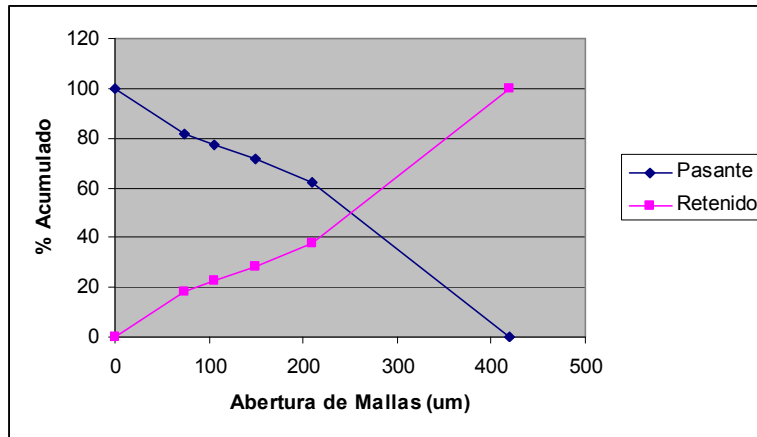
Fuente: El Autor

Los resultados obtenidos de la clasificación por mallas de la muestra se muestran a continuación:

Tabla 3. Clasificación por mallas

Malla Tyler	Abertura de tamiz( $\mu\text{m}$ )	Retenido (gr)	% Retenido	% Retenido acumulado	% Pasante acumulado
35	420	0	0,0	0,0	100,0
65	210	1250,532	62,4	62,4	37,6
100	149	246,256	9,2	71,6	28,4
150	105	156,153	5,8	77,4	22,6
200	74	112,367	4,2	81,6	18,4
-200	0	280,571	18,4	100,0	0,0
<b>TOTAL</b>		2045,879	100,0		

Figura No. 24. Curva de distribución granulométrica para la muestra

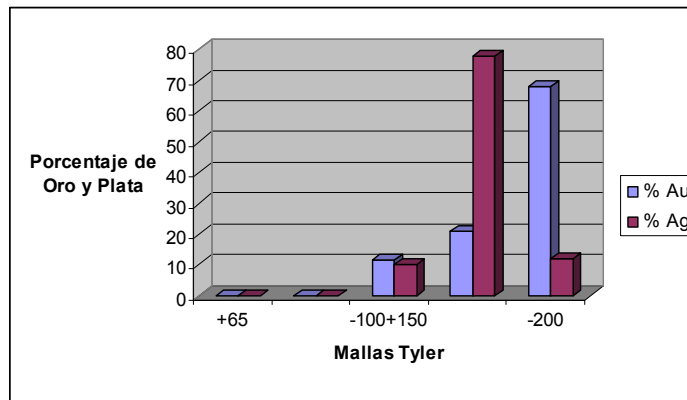


A continuación se presentan los datos obtenidos de la distribución de oro y plata por mallas para la muestra.

Tabla 4. Distribución de Oro y Plata

Malla Tyler	Mineral retenido (gr)	gr Au/Tn min.	Masa Au (mg)	Distribución Au (%)	G Ag/Tn min.	Masa Ag (mg)	Distribución Ag (%)
+65	1250,532	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
-65+100	246,256	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
-100+150	156,153	3,12	0,44	11,45	0,46	0,09	10,26
-150+200	112,367	7,16	0,77	20,82	4,06	0,45	77,56
-200	280,571	9,52	2,53	67,73	0,32	0,09	12,18
<b>TOTAL</b>	<b>2045.879</b>			<b>100</b>			<b>100</b>

Figura No. 25. Distribución de Oro y Plata



Concentración de la muestra en Mesa Wilfley: para esta prueba se realizaron varios ensayos de operación, obteniendo como resultado que los parámetros más adecuados para el funcionamiento de la mesa fueran:

Flujo de agua: 2.28 Lt / min.

Angulo de inclinación: 30°.

*Figura No. 26. Mesa Wilfley*



Fuente: Laboratorio Mina La Elsy Ltda

En la muestra, por la presencia de cantidades importantes de minerales pesados, como sulfuros a los cuales estaban asociados los minerales preciosos, la eficiencia del proceso de concentración gravimétrica en Mesa Wilfley fue alta. Se ensayó con granulometría intermedia de -35+150 mallas, los resultados obtenidos se muestran a continuación.

*Tabla 5. Resultados del Ensayo de concentración de la muestra en Mesa Wilfley (Mina La Elsy Ltda.)*

Corriente	Masa de mineral (gr)	g Au / T min	Masa de Au (mg)	Distribución Au (%)	g Ag / T min	Masa de Ag (mg)	Distribución Ag (%)
Concentrado	256,321	68,75	6,88	97,18	4,60	0,46	39,32
Mixtos	1153,265	0,22	0,20	2,82	0,78	0,71	60,68
Alimentación	2775,482	7,08	7,08	100	1,16	1,17	100

Con los resultados obtenidos, los índices metalúrgicos para esta etapa de concentración en Mesa Wilfley fueron:

$$\text{Recuperación (R): } R_{\text{Au}} = (\text{g Au Concentrado} / \text{g Au Alimentación}) * 100 = 97,18 \%$$

$$R_{\text{Ag}} = (\text{g Ag Concentrado} / \text{g Ag Alimentación}) * 100 = 39,32 \%$$

$$\text{Razón de Enriquecimiento (RE): } RE_{\text{Au}} = (\text{Ley concentrado} / \text{Ley Alimentación}) = 9,79$$

$$RE_{\text{Ag}} = (\text{Ley concentrado} / \text{Ley Alimentación}) = 3,97$$

Ensayos de flotación para la muestra: Se proporcionó una muestra de mineral, que tenía una granulometría de 100% -65 mallas Tyler, de la cual fue tomada una muestra representativa de 1020 gr, realizándose la molienda. Previamente se lavó el molino, para que las partículas que quedaron en el interior fueran eliminadas y no interfirieran en el proceso del nuevo mineral. Primero, por la entrada de carga del molino se adicionaron los 1020 gr de mineral y 480 cm<sup>3</sup> de agua, cerramos el molino para moler la muestra en un tiempo de 18 minutos dependiendo de la dureza del mineral. Una vez cumplido el tiempo se descargó el producto obtenido, este producto fue el utilizado en el Ensayo de Flotación.

*Figura No. 27. Molienda del mineral (Mina la Elsy Ltda.)*



Fuente: Laboratorio Mina La Elsy Ltda

Los ensayos de flotación se llevaron a cabo en una celda de laboratorio marca Denver con porcentaje de sólidos de 33% y con 1200rpm.

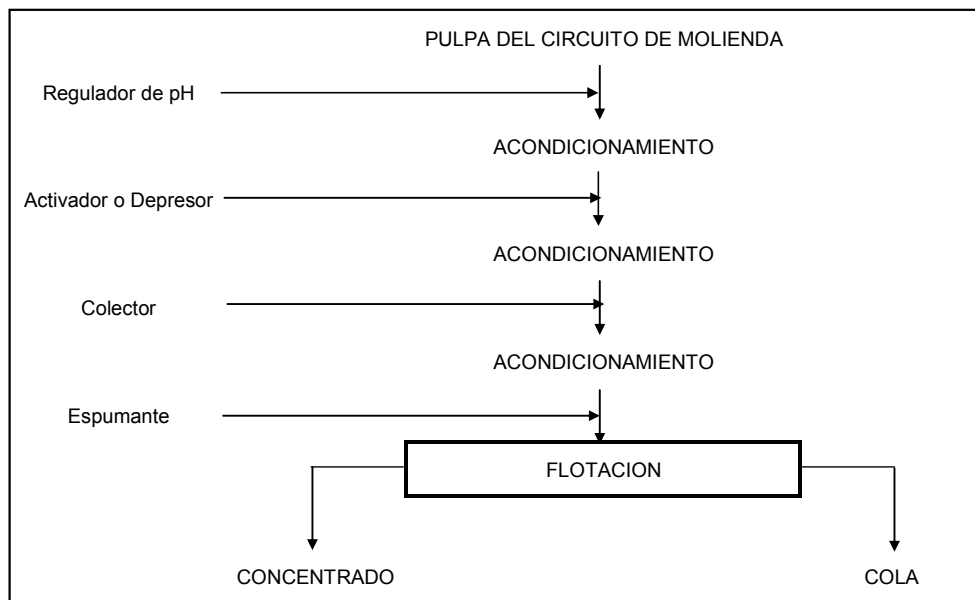
*Figura No. 28. Celda de Flotación Marca Denver (Mina la Elsy Ltda.)*



Fuente: Laboratorio Mina La Elsy Ltda

A continuación se presenta el esquema utilizado para este ensayo:

*Figura No. 29. Diagrama de Flujo para ensayo de Flotación (Mina la Elsy Ltda.)*



Fuente: El Autor

Los resultados obtenidos fueron los siguientes:

Tabla 6. Resultados del Ensayo de concentración por flotación de la muestra.  
(Mina La Elsy Ltda.)

Corriente	Masa de mineral (gr)	g Au / T min	Masa de Au (mg)	Distribución Au (%)	g Ag / T min	Masa de Ag (mg)	Distribución Ag (%)
Concentrado	256,321	67,80	6,78	95,76	4,35	0,48	42,85
Mixtos	1153,265	0,20	0,30	4,24	0,56	0,64	57,15
Alimentación	2775,482	6,98	7,08	100	1,08	1,12	100

Con los resultados obtenidos, los índices metalúrgicos para esta etapa de concentración en flotación son:

$$\text{Recuperación (R): } R_{\text{Au}} = (\text{g Au Concentrado} / \text{g Au Alimentación}) * 100 = 95,76\%$$

$$R_{\text{Ag}} = (\text{g Ag Concentrado} / \text{g Ag Alimentación}) * 100 = 42,85\%$$

$$\text{Razón de Enriquecimiento (RE): } RE_{\text{Au}} = (\text{Ley concentrado} / \text{Ley Alimentación}) = 9,71$$

$$RE_{\text{Ag}} = (\text{Ley concentrado} / \text{Ley Alimentación}) = 4,02$$

Nota: estos resultados demuestran la viabilidad técnica de concentrar por flotación del mineral extraído del socavón de la Mina La Elsy Ltda. Si se realiza un estudio de optimización del proceso.

Tabla 7. Reactivos usados para los ensayos de flotación (Mina La Elsy Ltda.)

	Reactivos	consumo
Colectores	Xantato amílico de potasio	20gr/t min
	Aero 404 Promoter Aqueos	15gr/t min
	Aerofloat 208 Promoter	15gr/t min
Espumante	Aerofroth 65	50gr/t min

Lixiviación diagnóstica: este proceso se desarrolló con el objeto de estudiar las variables que estaban afectando la recuperación del mineral en la etapa de cianuración en la Sociedad Minera La Elsy Ltda.

La influencia de la velocidad de agitación en la lixiviación, fue la principal variable tomada en cuenta en este proceso además de la granulometría del mineral, cantidad de cal adicionada y cantidad de cianuro de sodio.

Cabe resaltar que la variable independiente de operación que corresponde a la recuperación, la cual se estudia teniendo en cuenta a la variable independiente principal de operación, y es sintetizada en la velocidad de rotación o agitación (rpm) de los tanques de agitación.

La agitación es empleada en la cianuración de los minerales altamente alterados, que en este caso hizo referencia al concentrado proveniente del proceso de beneficio.

Para el desarrollo de esta prueba, se tuvo en cuenta los siguientes materiales, equipos y Reactivos:

- Concentrado
- Botellas de plástico
- Agua
- Pipeta graduada
- Probeta
- Bureta
- Malla +200
- Espátula
- Balde
- Papel filtro
- Agitador mecánico-eléctrico
- pH metro y balanza
- Cal
- Cianuro de sodio
- Nitrato de plata
- Fenolftaleína
- Yoduro de potasio

Pruebas experimentales:

Para realizar las pruebas experimentales de la lixiviación diagnóstica, fue necesario realizar análisis en la Sociedad Minera La Elsy Ltda. y en la Universidad Industrial de Santander – UIS.

- En los laboratorios de la Universidad Industrial de Santander, se realizó el siguiente procedimiento:

Preparación del mineral, que constó de una molienda por un tiempo de 4 horas hasta que el tamaño de partícula fuera 100% menos malla 200.

- En el laboratorio de la Sociedad Minera La Elsy Ltda. se realizaron las siguientes pruebas:

Determinación cualitativa de sales

Es necesario hacer este procedimiento para verificar la presencia de sales ferrosas, férricas de cobre y de zinc.

*Tabla 8. Presencia de sales encontrado en la muestra*

SALES FERROSAS	SI
SALES FÉRRICAS	SI
SALES DE COBRE	NO
SALES DE ZINC	NO

Se encontró sales ferrosas y férricas, por lo tanto es necesario lavar suficientemente el mineral con cal, para diluir estas sales que no permiten una buena cianuración.

Cianuración por agitación: se realizaron las pruebas de cianuración dinámica, las cuales se basan en el principio básico del proceso metalúrgico mencionado durante diferentes periodos de tiempo en contacto, que se mencionan a continuación:

Condiciones de las pruebas de cianuración por agitación No. 1.

*Pruebas de cianuración de 24 horas:*

Para la prueba en planta se emplearon las muestras de concentrado con los siguientes parámetros y variables de operación:

- Peso del concentrado: 500 gr
- Volumen de agua 2500 ml
- Peso de cal: 20 gr.
- Peso de cianuro de sodio: 2 gr
- Relación L/S:  $2500/500 = 5/1$
- pH inicial de la muestra: 11.5
- Velocidad de agitación 1000 RPM

Con ello se obtuvo la mezcla necesaria para poderse llevar a cabo la cianuración por agitación.

Condiciones de las pruebas de cianuración por agitación No. 2.

*Pruebas de cianuración de 24 horas.*

Para esta prueba se emplearon las muestras de concentrado con los siguientes parámetros y variables de operación:

- Peso del concentrado: 500 gr
- Volumen de agua 2500 ml
- Peso de cal: 20 gr.
- Peso de cianuro de sodio: 2 gr
- Relación L/S:  $2500/500 = 5/1$
- pH inicial de la muestra: 11.3
- Velocidad de agitación: 1200 RPM

Con ello se obtuvo la mezcla necesaria para poderse llevar a cabo la cianuración por agitación.

### ***Preparación de reactivos para determinar el consumo de cal y cianuro***

Se procedió a preparar reactivos para realizar la determinación del consumo de cal y de cianuro libre, que se empleó durante la cianuración por agitación de mineral del concentrado de la Sociedad Minera La Elsy Ltda.

### ***Preparación de reactivos para determinar el consumo de cal***

- *Preparación de ácido oxálico:* Se pesó 5,63 gr de ácido oxálico y se disolvió en un litro de agua destilada.
- *Preparación de fenolftaleína:* Se pesó 1 gr de fenolftaleína en 100 ml de solución de alcohol.

### ***Determinación de consumo de cal:***

$\%CAL = (\text{Volumen gastado de Ácido Oxálico}) 100$

- *Preparación de reactivos para determinar el consumo de cianuro*
- *Preparación de yoduro de potasio:* Se pesó 3 gr de KI y se diluyó en 100 ml de agua destilada.
- *Preparación de solución de nitrato de plata:* Se pesó 4.3 gr de  $AgNO_3$  y se diluyó en un litro de agua destilada.

### ***Determinación de consumo de cianuro***

$\%NaCN = (\text{Vol. Gastado de } AgNO_3)/100$

### **Discusión de resultados**

A continuación se muestran los resultados de la determinación de los consumos óptimos de reactivos de cianuro y cal de sodio, para las pruebas óptimas de lixiviación

dinámica del concentrado que presentaron mayores niveles de recuperación con velocidades de agitación de valores de 1000 rpm y 1200 rpm.

Prueba de lixiviación dinámica No. 1.

Para esta prueba de lixiviación dinámica, se realizaron determinaciones de consumo de cal, cianuro de sodio y porcentaje de recuperación de oro, con una velocidad de agitación de 1000 rpm.

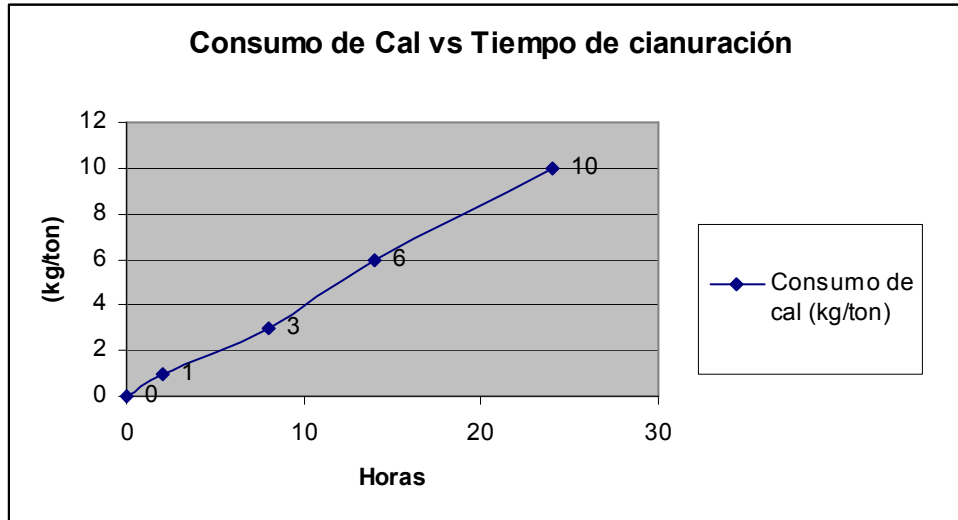
Determinación de consumo de cal en muestras de concentrado:

Este procedimiento se realizó para determinar el consumo de cal durante 24 horas de cianuración por agitación, con intervalos de 30 minutos, tomándose muestras de 25 ml de solución filtrada, las cuales fueron tituladas con ácido oxálico.

*Tabla 9. Determinación de consumo de cal en prueba de lixiviación dinámica de concentrado (Mina La Elsy Ltda.) Con 1000 rpm.*

<b>Tiempo de Cianuración (horas)</b>	<b>Consumo de cal (kg/ton)</b>
0	0
2	1
8	3
14	6
24	10

Figura No. 30. Consumo de Cal VS Tiempo de cianuración



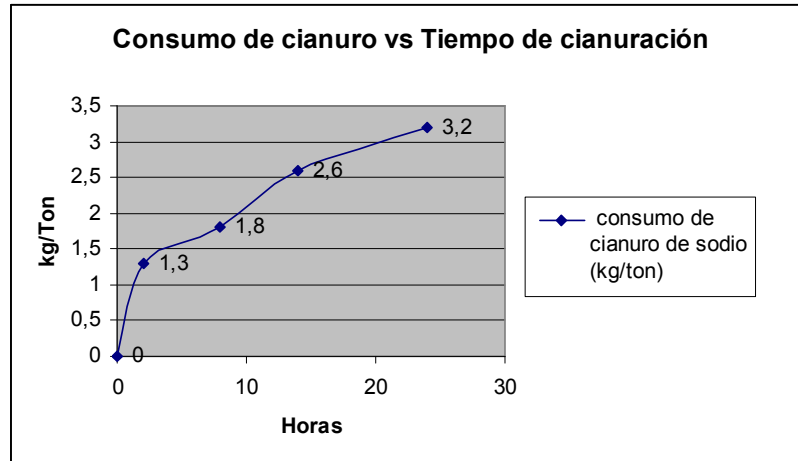
Determinación de consumo de cianuro en muestras de concentrado:

En este procedimiento se determinó el consumo de cianuro de sodio durante dos horas de cianuración por agitación, con un intervalo de 30 minutos, se tomaron muestras de 25 ml de solución filtrada, las cuales fueron tituladas con nitrato de plata.

Tabla 10. Determinación de consumo de cianuro en prueba de lixiviación dinámica de concentrado (Mina La Elsy Ltda.) Con 1000 rpm.

Tiempo de cianuración (horas)	consumo de cianuro de sodio (kg/ton)
0	0
2	1.3
8	1.8
14	2.6
24	3.2

Figura No. 31. Consumo de cianuro VS Tiempo de cianuración



#### Prueba de lixiviación dinámica No. 2

Para esta prueba de lixiviación dinámica, se realizaron determinaciones de consumo de cal, cianuro de sodio y porcentaje de recuperación de oro, empleando una velocidad de agitación de 1200 rpm.

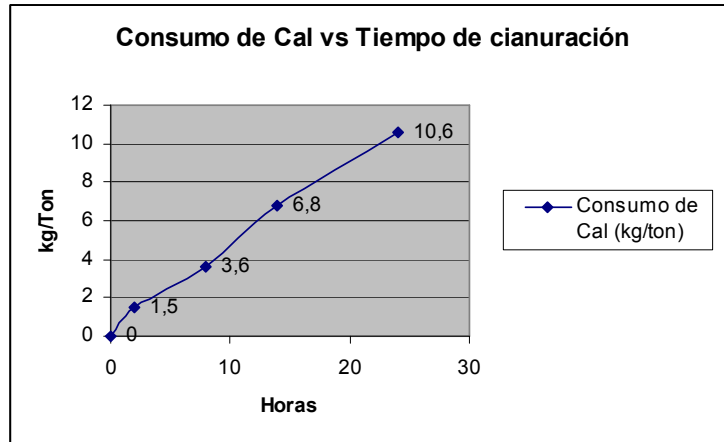
#### Determinación de consumo de cal en muestras de concentrado:

El procedimiento experimental se repite igual al de la prueba de lixiviación dinámica No. 1.

Tabla No. 11. Determinación de consumo de cal en prueba de lixiviación dinámica de concentrado (MINA LA ELSY) con 1200 rpm.

Tiempo de Cianuración (Minutos)	Consumo de Cal (kg/ton)
0	0
2	1.5
8	3.6
14	6.8
24	10.6

Figura No. 32. Consumo de cal VS Tiempo de cianuración

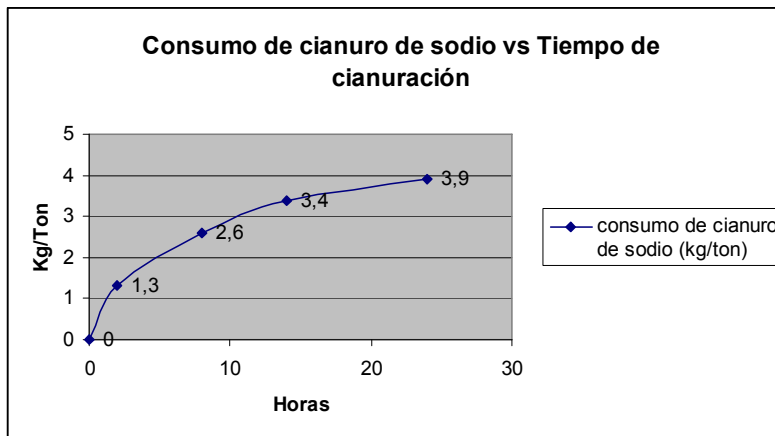


**Determinación de consumo de cianuro en muestras concentrado:**

Tabla No. 12. Determinación de consumo de cianuro en prueba de lixiviación dinámica de concentrado (Mina La Elsy Ltda.) con 1200 rpm.

Tiempo de cianuración (horas)	consumo de cianuro de sodio (kg/ton)
0	0
2	1.3
8	2.6
14	3.4
24	3.9

Figura No. 33. Consumo de cianuro de sodio VS Tiempo de cianuración

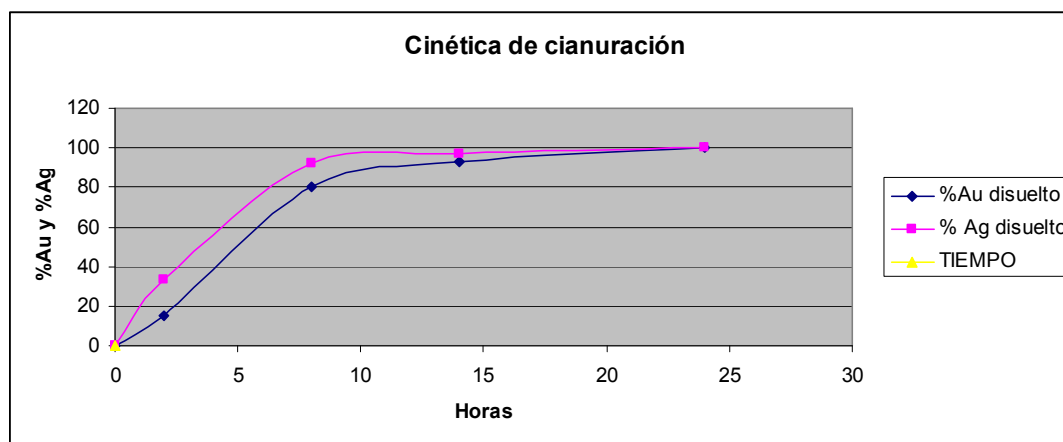


**Prueba No. 1. Porcentaje de Oro y Plata disuelto con 1000 rpm**

*Tabla 13. Determinación de % de Au y Ag disuelto de concentrado (Mina La Elsy Ltda.) con 1000 rpm.*

TIEMPO	[CN-] (gr/L)	PH	%Au disuelto	% Ag disuelto
0	1.975	11.5	0	0
2	0.942	11.5	15.30	33.07
8	0.736	11.5	80.32	92.12
14	2.296	11.5	93.10	97.32
24	2.134	11.5	100	100

*Figura No. 34. Cinética de cianuración*

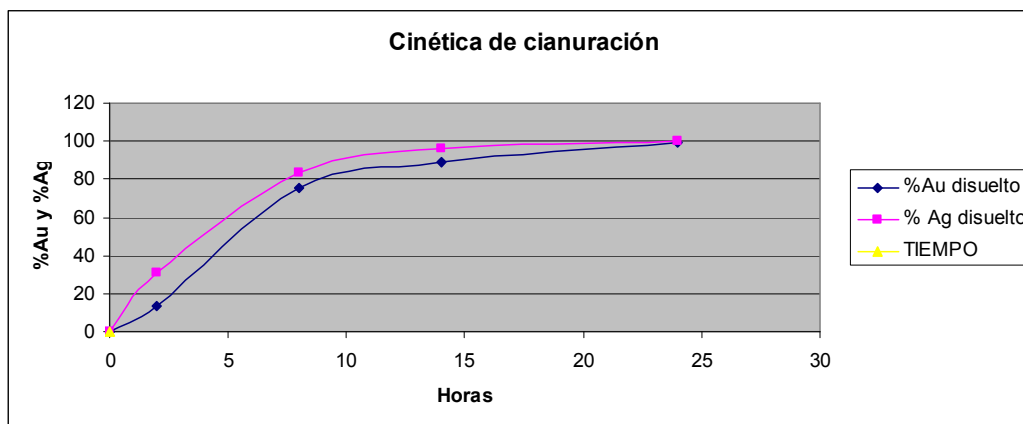


**Prueba No. 2. Porcentaje de Oro y Plata disuelto con 1200 rpm**

*Tabla 14. Determinación de % de Au y Ag disuelto de concentrado (Mina La Elsy Ltda.) con 1200 rpm.*

TIEMPO	[CN-] (gr/L)	PH	%Au disuelto	% Ag disuelto
0	2.03	11.3	0	0
2	1.32	11.3	13.20	30.66
8	0.96	11.3	75.13	83.52
14	2.56	11.3	89.36	96.32
24	2.65	11.3	98.96	100

Figura No. 35. Cinética de cianuración



**Cementación de oro con zinc:** En esta etapa se tomaron 600 ml de la solución cianurada No. 1 y No. 2 llevada a plancha de calentamiento sin llegar a la evaporación, luego agregando 2 gramos de cinc en polvo, posteriormente se adicionó lentamente 10 ml de acetato de plomo al 10%, dejando en reposo por un periodo no máximo de 5 minutos, y posterior a ello se adicionó ácido clorhídrico 1:1, gota a gota hasta que se desapareciera la efervescencia y quedara la esponja.

El precipitado de las esponjas (seco) se envolvió en una lámina de plomo, llevándolas a un escarificador y adicionando 1 gramo de bórax, fundiéndose a 970° C, por último se copeló los botones obtenidos.

Con los dores obtenidos se procedió a atacar con ácido nítrico a concentraciones distintas (1:7, 1:3, 1:1, y concentrado), obteniendo como resultado el oro libre de la plata.

Los resultados se muestran a continuación:

Tabla 15 Determinación de % de Au y Ag recuperado de concentrado (Mina La Elsy Ltda.) con 1000 rpm.

Au y Ag En solución cianurada	32.65 mg Au (65.3 ppm Au) 29.33 mg Ag(57.66 ppm Ag)
Au y Ag precipitados con cinc	28.51 mg Au ( 90% Au recuperado) 23.14 mg Ag (82 % Ag recuperado)

*Tabla 16 Determinación de % de Au y Ag recuperado de concentrado (Mina La Elsy Ltda) con 1200 rpm.*

Au y Ag En la solución cianurada	30.20 mg Au (60.23 ppm Au) 25.33 mg Ag(52.36 ppm Ag)
Au y Ag precipitados con cinc	24.57 mg Au ( 82% Au recuperado) 19.63 mg Ag (78 % Ag recuperado)

La oxigenación en la lixiviación es un factor importante, por lo tanto el agitador requiere de 1000 rpm, adicionando 1 galón de peróxido de hidrógeno por tonelada de mineral, durante las 24 horas de agitación la recuperación es del 90%. Se presentó una disminución en la recuperación de oro en la prueba No. 2, debido a que en el proceso de cementación, no se pudo sacar el oxígeno necesario y afectó el proceso, es decir para la agitación se comportó bien, pero al momento de precipitar el oxígeno en exceso dificultó la recuperación del mineral.

En las siguientes gráficas se presenta los Balances de materia, el Diagnóstico (Actual) y la Propuesta presentada con sus debidas modificaciones.

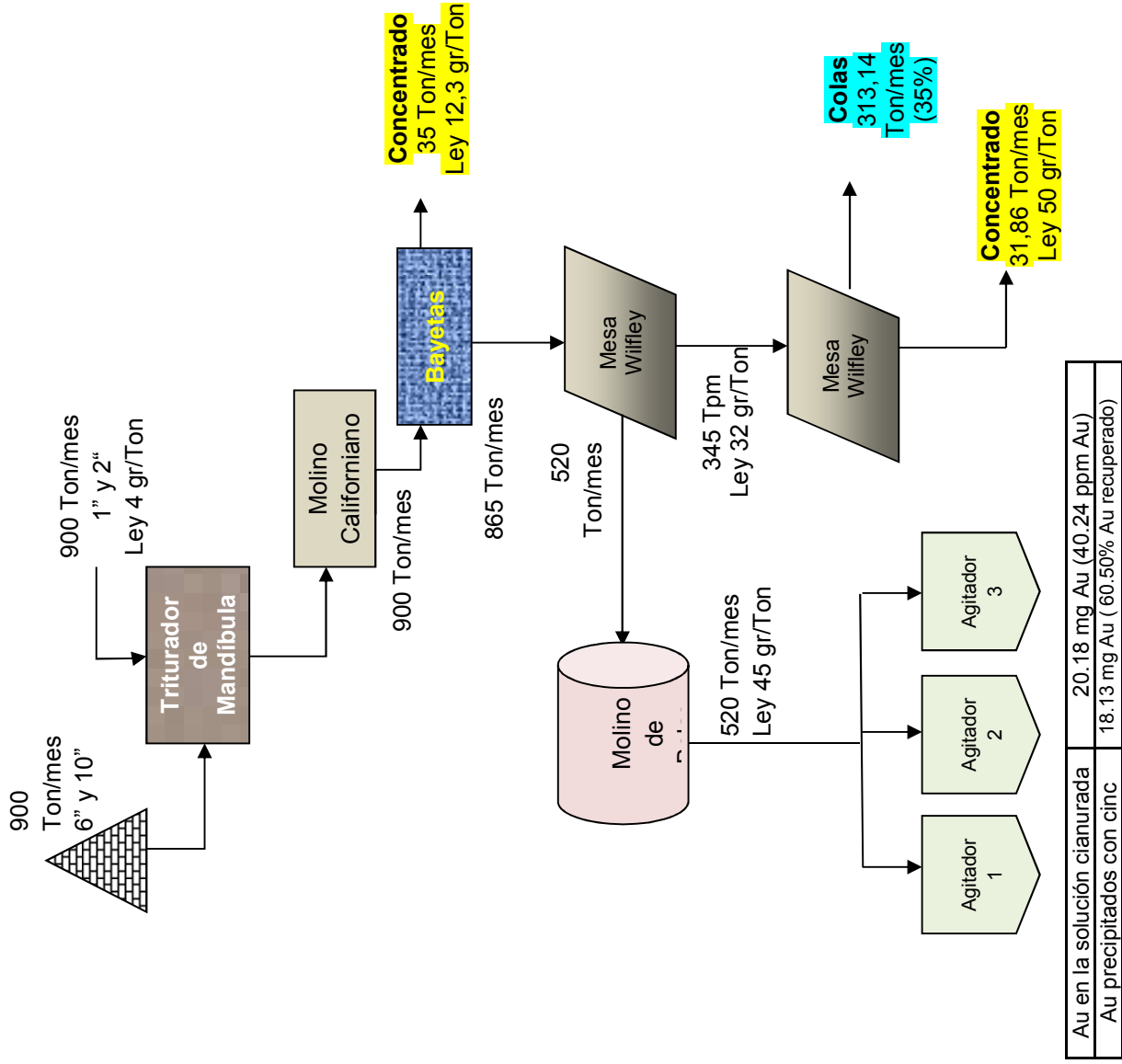


Figura No. 36. Balance de Materia Diagnostico (Actual)

Fuente: El Autor

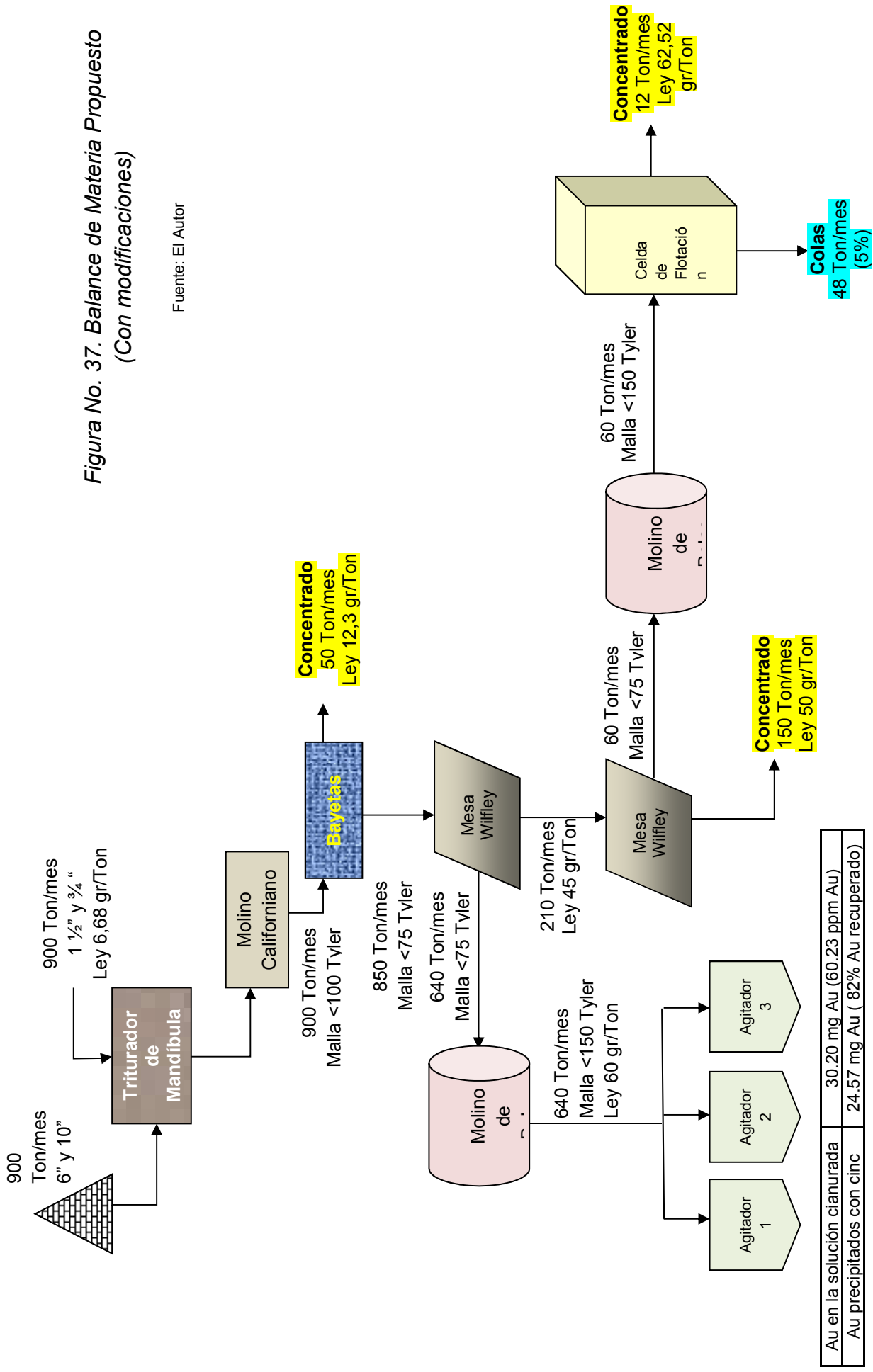


Figura No. 37. Balance de Materia Propuesto  
(Con modificaciones)

Fuente: El Autor

Au en la solución cianurada	30.20 mg Au (60.23 ppm Au)
Au precipitados con cinc	24.57 mg Au ( 82% Au recuperado)

## 5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

- La Sociedad Minera La Elsy Ltda., a inicios de mi Práctica Empresarial, (primer semestre del año 2012), obtenía una recuperación del mineral del 65%, en su proceso final de extracción del mineral.
- Con la implementación de las variables operacionales, por parte del Autor de este trabajo, la Sociedad Minera La Elsy Ltda., alcanzó una recuperación del 85% del mineral, durante todo el proceso de extracción.
- El mineral estudiado presentó tenores de oro y plata de 6.68 gr/ton y de 7.835 gr/ton respectivamente, relativamente altos. Esta característica da un indicio de la viabilidad económica de la extracción de dicho mineral.
- Los análisis por difracción y fluorescencia de Rayos X de la muestra estudiada, demuestran que ésta contiene cantidades importantes de minerales sulfurados, con los cuales están asociados al mineral precioso, por lo que se concluyó que en las etapas de beneficio de estas menas, deben estar encaminadas a la liberación del mineral por medio de un mayor tiempo de molienda.
- La concentración gravimétrica en Mesa Wilfley presentó una notoria mejoría, sólo con el cambio de las variables de operación de la mesa, obteniendo un aumento en la recuperación del mineral aurífero del 97,18% Au y del 39,32% Ag, lo cual indica que el proceso es factible en el sentido de recuperación sin contaminación ambiental.
- Los ensayos de flotación evidenciaron una eficiencia de concentración y recuperación de oro y plata, del 95,76% y del 42,85% respectivamente, por lo que se puede

demostrar que es una técnica excelente para implementarlo en la planta de beneficio de la Sociedad Minera La Elsy Ltda.

- El consumo global de cianuro no está fuera de lo normal para los minerales que se presentan en el concentrado. Puesto que al cabo de las primeras quince horas, se alcanzaron extracciones superiores al 90% entre las mallas -200 +270, con consumos inferiores a 3 kg por tonelada.
- Conociendo las características del mineral y el comportamiento metalúrgico del mismo, se comprobó que los procesos de beneficio y tratamiento, utilizados en la Sociedad Minera La Elsy Ltda., se encuentran mal implementados, y es por ello que no se logran recuperaciones de oro, que un mineral de estas características debe presentar.
- Según pruebas de cianuración realizadas en planta, se ve que el mineral de la Sociedad Minera La Elsy Ltda., tiene una respuesta positiva a este tipo de lixiviación con extracciones mayores al 85% en un máximo de 24 horas.
- Para que el proceso de cianuración en planta sea eficiente, es necesario controlar las siguientes variables a nivel de planta:
  - Tiempo
  - Tamaño partícula = 200 mallas
  - Control en la adición de cianuro = 3 kg por m<sup>3</sup>
  - Control y estabilidad de pH = 11.5 (medio básico)
  - Control en la adición de cal.
  - Muestreo y Titulación cada 2 horas preferiblemente

## BIBLIOGRAFIA

- Ali, Saleem H. (2006), “La minería de oro y la Regla de Oro: Un desafío para los países desarrollados y países en desarrollo”
- ASTM. Standard test method for spectrographic analysis of ores, minerals and rocks by the fire assay preconcentration technique E400-71 (Reapproved 1988)
- BUSTAMANTE, R. O. Programa modular: Procesamiento de minerales auro-argentíferos. Módulo 6 Concentración de minerales. Convenio CIMEX, MINERALCO, SENA. Colombia, 1992.
- CÁRDENAS, Revilla Agustín, Metalurgia Extractiva del Oro.
- CHUK, O. D.; CIRIBENI, V. H.; NÚÑEZ, E. A. (2000). Modelo dinámico hidráulico-mineralúrgico de columnas de flotación.
- DOMIC, M. E. Hidrometalurgia, fundamentos, procesos y aplicaciones, Editorial: Andros Impresores Ltda., Chile 2001.
- LOPEZ M.E. Determinación de oro y plata. Universidad Industrial de Santander. 1998.
- POLING, G. Seminario Taller sobre tecnologías limpias en la recuperación del oro. Editor Rescan Environmental Services Ltda. Colombia, 1999. RED CYTED, Comité aurífero del Perú, El libro de la minería del oro en América. Editor: José Antonio Espi, España, 2001.
- SKOOG, A. Douglas. Análisis instrumental. Cuarta edición. Mac Graw Hill. Cuarta edición. España. 1997. 227, 246, 249.
- TREYBAL, R. Operaciones de transferencia de masas. Mac Graw Hill. Segunda edición. 1995.