

Evaluación fisicoquímica de un mineral auro-argentífero procedente del Departamento de  
Arauca

Alexander Reina Garzón; Diana Carolina Castellanos Hernández

Trabajo de Grado para Optar al Título de Ingeniero Metalúrgico

Director

Jhon Freddy Palacios

Magister en Ingeniería Metalúrgica

Codirector

Pedro Luis Delvasto Angarita

Doctor en Ciencia y Tecnología de Materiales

Universidad Industrial de Santander

Facultad de Ingenierías Físico Químicas

Escuela de Ingeniería Metalúrgica y Ciencia de los Materiales

Bucaramanga

2024

### **Dedicatoria**

*Este proyecto está dedicado con mucho cariño y gratitud a mis padres, Cristóbal Reina Bautista y Edelmira Garzón Mosquera, por ser los principales artífices de este logro a través de su incansable apoyo y motivación. Gracias por cada consejo, por cada palabra de aliento en los momentos difíciles y por cada sacrificio que hicieron para que pudiera llegar hasta aquí. Son mi mayor inspiración y doy gracias a Dios por ser la luz que guía mi camino al darme sabiduría y fortaleza para culminar esta etapa de mi formación profesional.*

*A mis hermanos, Cristian y Liliana Reina, por estar siempre a mi lado en las buenas y en las malas brindándome alegría y fuerzas para seguir adelante, son pilar fundamental en mi vida. A mi sobrino Cristopher Moreno, por contagiarme con su inocencia y su carisma.*

*A mi novia, Diana Carolina Castellanos, por creer en mí incondicionalmente, por motivarme y apoyarme tanto en lo personal como en lo profesional. Tu amor y dedicación han sido claves en este logro.*

*A la Universidad Industrial de Santander, por brindarme las herramientas y conocimientos necesarios durante mi paso por sus aulas para formarme como ingeniero metalúrgico. Sin los aprendizajes adquiridos en la UIS no habría sido posible desarrollar este proyecto.*

*Mi director de tesis, Jhon Freddy Palacios, por su paciencia y sabiduría al guiarme en el desarrollo de este proyecto. Sus conocimientos y consejos han enriquecido enormemente mi formación.*

*Al profesor Ángel Meléndez, por transmitirme tantos valiosos aprendizajes a lo largo de la carrera que sentaron las bases de mi formación profesional. Su experiencia y pasión por la enseñanza marcaron mi camino.*

*A todos los docentes de la Escuela de Ingeniería Metalúrgica, por prepararme con su sabia experiencia para los retos profesionales del futuro. A toda mi familia y amigos, gracias por estar siempre presentes dándome aliento y motivación en los momentos más arduos de este camino. Los llevo a todos en mi corazón.*

**Alexander Reina Garzón**

### **Dedicatoria**

*Quiero expresar mi profundo agradecimiento a Dios, por ser mi compañía constante en el desarrollo de este proyecto. Sin Él, nada de esto sería posible.*

*A mis padres, Luis Armando Castellanos y Gloria Inés Hernández, les dedico este proyecto con gratitud infinita, ser parte de sus vidas es un regalo invaluable. Gracias por confiar en mí de manera incondicional, por su apoyo constante en todo lo posible. Sus palabras de aliento y paciencia han sido fundamentales en mi desarrollo personal y profesional.*

*A mi hermana, María Jimena Castellanos, quien siempre me ha acompañado y aconsejado en este camino, a quien admiro, es mi ejemplo y una de las razones por las que ingresé a la universidad, y elegí esta carrera. Gracias por creer en mi potencial. Además de esto, por su amor, paciencia, comprensión, y por estar siempre para mí cuando lo necesito.*

*A Alexander Reina Garzón, agradezco su apoyo, esfuerzo y dedicación para llevar a cabo esta tesis, quien, con su alegría y presencia en los buenos y malos momentos, me motiva a seguir luchando por mis logros y a ser cada vez mejor en todos los ámbitos de mi vida. Gracias por inspirarme, tu amor incondicional ha sido fundamental para alcanzar este logro.*

*A Sara Sofía Mejía, mi amiga, agradezco por su apoyo durante toda la carrera. Gracias por compartir éxitos académicos, por la ayuda brindada, por el aprecio, respeto y confianza compartidos. La vida nos unió, y espero conservar esta amistad por siempre.*

*Mi sincero agradecimiento al director de este proyecto, Jhon Freddy Palacios. Gracias por brindarme confianza, conocimiento y tiempo. Su orientación y disposición hicieron posible abordar este proyecto de manera agradable y enriquecedora.*

*A mis compañeros, familiares y demás personas que siempre estuvieron apoyándome, mi más sincero agradecimiento. Su presencia ha sido importante en esta etapa de mi vida.*

***Diana Carolina Castellanos Hernández***

### **Agradecimientos**

*Los autores de esta tesis de grado desean expresar sus agradecimientos a quienes contribuyeron al desarrollo y culminación de este proyecto. En primer lugar, queremos agradecer a la Escuela de Ingeniería Metalúrgica y a su personal docente por brindarnos los conocimientos fundamentales que nos permitieron llevar a cabo este trabajo de investigación. Su apoyo, comprensión y colaboración fueron esenciales para nuestra formación integral como profesionales.*

*A nuestro director, Jhon Freddy Palacios, por guiarnos en la realización del proyecto, agradecemos su paciencia y el tiempo que generosamente nos brindó para resolver cualquier inconveniente que surgiera en el camino.*

*Nuestra gratitud se dirige también a Henry Castellanos, quien facilitó la materia prima necesaria para la ejecución de nuestro proyecto, y agradecemos la ayuda proporcionada durante todo el proceso.*

*Queremos reconocer la colaboración significativa de Javier Gaitán, técnico de la Escuela de Ingeniería Metalúrgica y agradecemos al Grupo de Investigación en Minerales, Biohidrometalurgia y Ambiente (GIMBA) y al Laboratorio de Rayos X de la Universidad Industrial de Santander – Parque Tecnológico de Guatiguará, así como a su personal, por el valioso servicio que proporcionaron para la adquisición de datos.*

*Una mención especial de agradecimiento se dirige a Yury López, miembro del GIMBA, por su instrucción en los procesos de laboratorio. Le expresamos nuestro respeto y admiración por su valiosa colaboración.*

*Nuestro reconocimiento se extiende a toda la comunidad IMET, incluyendo profesores, técnicos y administrativos. Especialmente agradecemos al director de la escuela, Ángel Manuel Meléndez, por su colaboración constante, y a Patricia Rodríguez por su paciencia y comprensión en su labor. Finalmente, queremos expresar nuestra gratitud a todas las personas que participaron directa e indirectamente en el proyecto. A los docentes, amigos y colaboradores que hicieron posible la realización de esta tesis de grado y que nos acompañaron a lo largo de todo el proceso. Les estamos agradecidos por su apoyo incondicional.*

**Tabla de contenido**

Introducción .....	13
1. Fundamentación teórica .....	15
2. Objetivos .....	17
2.1 Objetivo General .....	17
2.2 Objetivos Específicos.....	17
3. Marco teórico .....	18
3.1 Procesamiento de minerales.....	18
3.2 Reducción de tamaño del mineral.....	18
3.3 Minerales auro-argentíferos y sus características .....	19
3.4 Impacto ambiental.....	20
4. Metodología .....	21
4.1 Recolección y tratamiento de la muestra .....	22
4.1.1 Obtención de la muestra.....	22
4.1.2 Conminución.....	22
4.2 Caracterización del mineral .....	22
4.2.1 Análisis granulométrico .....	22
4.2.2 Análisis de ensayo al fuego.....	23
4.2.3 Análisis de absorción atómica .....	23
4.2.4 Análisis de fluorescencia de rayos X (FRX).....	23

4.2.5 Análisis de difracción de rayos X (DRX) .....	24
4.3 Planteamiento del proceso metalúrgico .....	24
4.3.1 Concentración gravimétrica .....	24
4.3.2 Ensayo al fuego .....	25
4.4 Lixiviación con NaCN .....	25
4.4.1 Proceso Experimental .....	26
4.5 Propuesta para el manejo y disposición de residuos .....	27
5. Resultados .....	28
6. Conclusiones .....	41
7. Recomendaciones .....	43
Referencias Bibliográficas .....	44
Apéndices.....	48

**Lista de Tablas**

Tabla 1. Cantidad de mineral tamizado .....	28
Tabla 2. Datos del análisis granulométrico Gates-Gaudin-Schumann 1er tamizada.....	28
Tabla 3. Datos del análisis granulométrico Gates-Gaudin-Schumann 2da tamizada .....	29
Tabla 4. Datos del análisis granulométrico Gates-Gaudin-Schumann 3era tamizada .....	29
Tabla 5. Datos del análisis granulométrico Gates-Gaudin-Schumann Total.....	30
Tabla 6. Resultado ley tenor de mineral sin concentrar .....	32
Tabla 7. Reporte de resultados de ensayo por difracción de rayos X.....	32
Tabla 8. Análisis cuantitativo de fases mineralógicas por espectrometría de difracción de rayos X por método Rietveld.....	33
Tabla 9. Reporte de resultados de ensayo por fluorescencia de rayos X.....	34
Tabla 10. Parámetros Mesa Wilfley.....	35
Tabla 11. Resultados Mesa Wilfley .....	35
Tabla 12. Resultados Tostación .....	36
Tabla 13. Cantidades de material usadas en ensayo al fuego .....	37
Tabla 14. Resultados ley tenor de mineral concentrado .....	37
Tabla 15. Resultados de absorción atómica para cianuración .....	38
Tabla 16. Grado de lixiviabilidad para %Au disuelto. Fuente: Universidad Nacional José Faustino Sánchez Carrión .....	39

**Lista de figuras**

Figura 1. Diagrama de flujo de la metodología. Fuente: Autores.....	21
Figura 2. Mesa Vibratoria Wilfley. Fuente: (A Gupta & Yan, 2006a).....	24
Figura 3. Gráfico de la distribución granulométrica %en peso pasante acumulado vs Dp .....	30
Figura 4. Gráfico de % en peso acumulado vs Dp (%retenido y %pasante) .....	31
Figura 5. Reporte equipo de difracción de rayos X .....	34
Figura 6. Balances de materia.....	36
Figura 7. Ley de Au y Ag en (g/ton) para cada granulometría .....	38
Figura 8. %Disolución de oro y plata .....	39
Figura 9. Curvas cinéticas de lixiviación con cianuro del oro y la plata .....	40
Figura 10. Cinética del cianuro consumido durante el proceso de cianuración.....	41

**Lista de Apéndices**

Apéndice 1. Resultado GIMBA ensayo al fuego.....	48
Apéndice 2. Resultado análisis DRX.....	48
Apéndice 3. Resultado análisis DRX #2.....	50
Apéndice 4. Resultado análisis FRX .....	51
Apéndice 5. Información de las muestras de Espectrometría de Absorción Atómica.....	52
Apéndice 6. Resultados de Espectrometría de Absorción Atómica .....	53
Apéndice 7. Veta de mineral de Arauca .....	53
Apéndice 8. Trituradora GIMBA.....	54
Apéndice 9. Apariencia mineral sin conminución.....	54
Apéndice 10. Mineral de estudio .....	55
Apéndice 11. Molino anillos GIMBA .....	55
Apéndice 12. Mineral triturado por anillos.....	56
Apéndice 13. Tamizadora GIMBA.....	56
Apéndice 14. Materiales para flux ensayo al fuego.....	57
Apéndice 15. Mezcla flux.....	57
Apéndice 16. Etapa copelación.....	58
Apéndice 17. Escoria y régulo .....	58
Apéndice 18. Régulo en los crisoles calcinando.....	59
Apéndice 19. Doré ensayo al fuego .....	59

Apéndice 20. Doré moldeado .....	60
Apéndice 21. Soluciones para partición con ácido nítrico.....	60
Apéndice 22. Mesa Wilfley .....	61
Apéndice 23. Frecuencia de trabajo mesa Wilfley .....	61
Apéndice 24. Ángulo de la mesa .....	62
Apéndice 25. Concentrados del mineral .....	62
Apéndice 26. Cianuro y medidores de pH .....	63
Apéndice 27. Etapa de cianuración.....	63
Apéndice 28. Filtración para obtener lixiviado.....	64

## Resumen

**Título:** Evaluación fisicoquímica de un mineral auro-argentífero procedente del Departamento de Arauca

**Autores:** Alexander Reina Garzón; Diana Carolina Castellanos Hernández

**Palabras Clave:** Minería, auroargentíferos, sostenibilidad, alternativas ambientales y prácticas responsables

### Descripción:

En este proyecto de investigación, se aborda la importancia de la extracción de oro, en el desarrollo sostenible de Colombia, con un enfoque particular en Arauca. Se destaca su demanda en diversas industrias y se enfatiza en la necesidad de adoptar prácticas sostenibles y responsables para mitigar los impactos ambientales.

La industria minera a nivel global enfrenta desafíos significativos debido a la generación masiva de residuos durante la extracción y obtención de minerales. En particular, la extracción de oro y plata, que son metales valiosos, tienen una alta demanda en sectores como la electrónica, joyería y medicina. En Colombia, la minería no formal manipula mercurio de manera indiscriminada, a pesar de su prohibición, causando graves impactos ambientales y en la salud de las comunidades.

Es esencial buscar alternativas económicas y ambientalmente sostenibles para la extracción de metales preciosos, promoviendo un desarrollo sostenible en la región. La selección adecuada de procesos metalúrgicos es fundamental para la eficiente extracción y recuperación de metales preciosos, considerando la composición mineralógica, tamaño de partícula y concentración del mineral.

El propósito de la investigación es realizar ensayos y análisis a una muestra del Departamento de Arauca, Colombia, para obtener información precisa sobre la composición mineralógica, ley de oro e identificación de elementos que afecten el proceso metalúrgico. Finalmente, se buscan alternativas para su beneficio, concentración y aprovechamiento con porcentajes de recuperación aceptables, demostrando la viabilidad de una minería responsable.

\* Proyecto de grado

\*\* Facultad de Ingenierías Fisicoquímicas. Escuela de Ingeniería Metalúrgica y Ciencia de los Materiales. Director: Jhon Freddy Palacios, Magíster en Ingeniería Metalúrgica.

### Abstract

**Title:** Physicochemical evaluation of an auro-argentiferous mineral from the Department of Arauca

**Authors:** Alexander Reina Garzón; Diana Carolina Castellanos Hernández

**Key words:** Mining, Auroargentiferous, Sustainability, Environmental Alternatives, and Responsible Practices

#### Description:

This research project addresses the importance of gold extraction for the sustainable development of Colombia, with a particular focus on Arauca. It highlights the demand for gold in various industries and emphasizes the need to adopt sustainable and responsible practices to mitigate environmental impacts.

The global mining industry faces significant challenges due to the massive waste generation during mineral extraction and processing. In particular, the extraction of valuable metals like gold and silver has a high demand in sectors such as electronics, jewelry and medicine. In Colombia, informal mining uses mercury indiscriminately, despite its prohibition, causing serious environmental and health impacts on communities.

It is essential to seek economically and environmentally sustainable alternatives for the extraction of precious metals, promoting sustainable development in the region. The proper selection of metallurgical processes is key for the efficient extraction and recovery of precious metals, considering the mineralogical composition, particle size and concentration of the ore.

The purpose of the research is to conduct assays and analysis on a sample from the Department of Arauca, Colombia, to obtain accurate information on the mineralogical composition, gold grade and identification of elements that affect the metallurgical process. Finally, alternatives are being sought for its benefit, concentration, and utilization with acceptable recovery percentages, demonstrating the feasibility of responsible mining.

\*Degree Work

\*\*Faculty of Physicochemical Engineering. School of Metallurgical Engineering and Materials Science. Adviser: Jhon Freddy Palacios, Master in Metallurgical Engineering.

## **Introducción**

La minería es una actividad que históricamente ha contribuido de manera significativa al desarrollo económico de Colombia. Dentro de esta industria, la extracción de oro y otros minerales preciosos ha sido de vital importancia, debido al valor comercial de estos metales y su demanda en diversos sectores productivos.

Según cifras de 2023, el sector minero-energético representó el 7% del PIB nacional y contribuyó con más de la mitad de las exportaciones. Asimismo, este sector atrajo el 33% de la inversión extranjera directa en el país y generó alrededor de 500 mil empleos formales, demostrando su capacidad para impulsar el desarrollo y bienestar de las regiones. Durante el año 2022, la minería y el sector energético aportaron \$8,8 billones de pesos en regalías, siendo una fuente esencial de ingresos para financiar proyectos sociales y de infraestructura (Agencia Nacional de Minería: ANM, 2023).

Sin embargo, el uso extendido de mercurio en la amalgamación del oro genera contaminación que afecta suelos, aguas y comunidades locales. Esta problemática cobra especial relevancia en el Departamento de Arauca, donde la minería informal se encuentra muy arraigada y trae consigo retos que deben analizarse adecuadamente para lograr un desarrollo sostenible.

Este metal pesado genera daños ambientales irreversibles y severos problemas de salud en los mineros y poblaciones aledañas. Los síntomas por exposición al mercurio incluyen insomnio, pérdida de memoria, dolores de cabeza, temblores y alteraciones cognitivas y motoras. Desafortunadamente, en regiones apartadas con presencia de grupos ilegales, la fiscalización estatal es difícil y el mercurio se usa de forma clandestina (World Health Organization (WHO, 2017).

Es incorrecto que en pleno siglo XXI se sigan presentando intoxicaciones masivas por mercurio, sustancia prohibida debido a su alta toxicidad. En Colombia, el Convenio de Minamata se adoptó mediante la Ley 1892 de 2018 y se ratificó el 26 de agosto de 2019. Esto surge como un instrumento fundamental para proteger la salud humana y el medio ambiente de este flagelo (Ministerio de Ambiente (MINAM, 2022).

Se requiere voluntad política y acción institucional para erradicar esta práctica ilegal que pone en riesgo vidas humanas y ecosistemas enteros, factores que deben estar por encima de cualquier interés económico. Urge diseñar e implementar estrategias integrales para controlar de raíz esta problemática, formalizando la minería artesanal, capacitando en técnicas seguras y monitoreando activamente la salud de las comunidades involucradas.

Se propone un proceso alternativo para la extracción de oro y plata en Arauca, reemplazando el mercurio con cianuro de sodio como agente lixiviante. Este cambio busca mejorar la eficiencia en la recuperación de metales preciosos y reducir el impacto ambiental y los riesgos para la salud. La implementación de este método más seguro y sostenible pretende demostrar su viabilidad técnica y económica para la minería artesanal y a pequeña escala en la región (Unidad de Planeación Minero Energética (UPME, 2007).

Los resultados del estudio pretenden aportar información sobre la extracción de minerales valiosos en Arauca y las mejores alternativas para su aprovechamiento. Así mismo, se espera contribuir al desarrollo de soluciones tecnológicas limpias que permitan una explotación responsable de los recursos naturales. En conclusión, este proyecto tiene como finalidad promover prácticas mineras que equilibren la producción económica con la conservación ambiental en el Departamento.

## 1 Fundamentación teórica

La minería es una industria fundamental para el desarrollo económico de Colombia y ha sido un pilar de su economía durante décadas. Entre los minerales extraídos en el país, el oro ocupa un lugar destacado por su valor específico y su relevancia histórica y económica.

El oro y la plata son metales preciosos que tienen una gran demanda en diversas áreas industriales, como la electrónica, la joyería y la medicina, entre otras. Además, los elementos que se encuentran en los minerales auro-argentíferos son significativos tanto por su valor económico como por ser un recurso natural no renovable.

La extracción y el uso indiscriminado de mercurio en la minería pueden tener graves consecuencias tanto para el medio ambiente como para la salud de las comunidades. El mercurio es una sustancia tóxica que puede contaminar el suelo, el agua y el aire, y puede tener efectos perjudiciales en la vida silvestre, los ecosistemas acuáticos y la salud humana.

Es fundamental abordar la extracción y uso de mercurio en el Departamento de Arauca. Por lo tanto, es crucial buscar alternativas económicamente viables y ambientalmente responsables para asegurar un desarrollo sostenible y equitativo en la región, y así mitigar los impactos negativos de la extracción y el uso de esta sustancia.

La evaluación del procesamiento del mineral implica caracterizar la mena, teniendo en cuenta la zona de extracción y las propiedades fisicoquímicas. Asimismo, la selección adecuada de los procesos metalúrgicos para la extracción, el aprovechamiento y la refinación del metal. Igualmente, esto incluye la identificación de elementos presentes, la determinación del tamaño de partícula y la concentración del mineral, ya que esto puede afectar la eficiencia de los procesos de extracción y recuperación de los metales preciosos (Pardo y Sánchez, 2022).

El propósito de esta investigación es llevar a cabo ensayos metalúrgicos con el fin de obtener información precisa sobre el proceso extractivo, la ley de oro presente y la composición química de una muestra de mineral del Departamento de Arauca. Se evalúan métodos de concentración gravimétrica seguidos de lixiviación con cianuro, buscando optimizar la recuperación de oro y caracterizar las especies auríferas presentes. Es importante desarrollar un proceso que sea tanto eficiente como sostenible, garantizando el cumplimiento de los estándares ambientales actuales.

## **2 Objetivos**

### **2.1 Objetivo General**

Evaluar las características fisicoquímicas del mineral auro-argentífero en estudio, para determinar el proceso de extracción de los metales de interés de la mena.

### **2.2 Objetivos Específicos**

Determinar la composición mineralógica de la mena en estudio, mediante técnicas de análisis químico tales como difracción de rayos X, fluorescencia de rayos X, y la ley de Au y Ag mediante el ensayo al fuego y/o absorción atómica.

Encontrar un método de beneficio y extracción para el aprovechamiento de los metales preciosos presentes en el mineral.

### **3 Marco teórico**

#### **3.1 Procesamiento de minerales**

En metalurgia, el procesamiento de minerales es un área fundamental que se encarga de convertir las materias primas en productos útiles y valiosos. Para llevar a cabo este aprovechamiento se requiere un conjunto de operaciones interconectadas que involucran la extracción, trituración, separación y transformación de minerales para obtener productos finales de alta calidad.

En la industria minera, la extracción de minerales comienza con la exploración geológica, que implica la identificación de depósitos y la evaluación de su viabilidad. Esto se basa en la comprensión de la geología de la región, incluyendo la mineralogía y la geoquímica. Es esencial realizar un estudio preciso para determinar la composición del mineral y su contenido de metales, esto se logra mediante técnicas de muestreo representativo (Escuela de altos estudios (CAMIPER, 2019).

#### **3.2 Reducción de tamaño del mineral**

Por otro lado, la obtención del mineral de interés se consigue por conminución, este proceso consta de dos etapas: la trituración y la molienda. La primera fase, mediante equipos como la trituradora de mandíbula, es vital en esta etapa. Este dispositivo funciona compactando y liberando una mandíbula móvil contra una fija con el fin de reducir el material de manera efectiva, facilitando así la liberación de los componentes valiosos (Prada y Castro, 2022).

Después, la segunda fase de la conminución involucra la molienda, que se realiza en cilindros giratorios. Estos se dividen en diversas categorías, como molinos de bolas, discos y

anillos; cada uno de los dispositivos está diseñado para propósitos específicos en la reducción del tamaño de las partículas minerales (Yáñez et. al. , 2005).

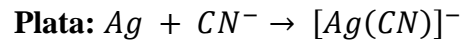
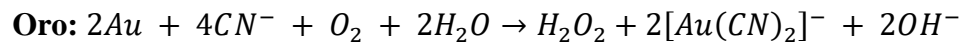
Para optimizar aún más la eficiencia de la muestra y lograr la granulometría requerida, se incorporan tamizadores en esta etapa. Estos tamices desempeñan un factor importante al finalizar el proceso de molienda, contribuyendo significativamente a mejorar la calidad y homogeneidad del producto final (Ríos et. al. , 2020).

### **3.3 Minerales auro-argentíferos y sus características**

Los hallazgos de minerales auro-argentíferos incluyen oro y plata en su composición. Estos presentan una variabilidad mineralógica, pueden tener diversas propiedades físicas y químicas, y se encuentran en diferentes tipos de yacimientos geológicos. Uno de los métodos para cuantificar la ley del mineral es el ensayo al fuego en g/ton.

Este método, según la norma ASTM E400 se basa en someter una muestra de mineral a temperaturas elevadas en una mufla, lo que provoca la fusión de la misma. Durante esta fase, los componentes de la muestra se separan en escoria y un botón de metal fundido, que contiene los metales de interés, como el Au y Ag (American Society for Testing and Materials (ASTM, 2007).

Tras determinar la ley del mineral, se continúa con la extracción del oro y la plata usando una solución de cianuro para disolver dichos metales de interés (Pedraza, 2006). Su eficacia depende de factores como la naturaleza del material sólido, el tipo de lixivante y las condiciones de operación. Para el cianuro se tiene que la proporción más eficaz es de 0.05 a 0.07% NaCN, para el tratamiento de menas de Au es de 0.05% NaCN y para menas de Ag de 0.3% (Azañero, 2001).

**Lixiviación con cianuro:****3.4 Impacto ambiental**

En Colombia, donde la minería desempeña un papel económico destacado, la gestión adecuada del impacto ambiental es importante. El país tiene la oportunidad de equilibrar la explotación de sus valiosos recursos naturales con la conservación de sus ecosistemas. La inversión en tecnologías más limpias, la regulación efectiva y la participación activa de las comunidades locales son componentes fundamentales para lograr un equilibrio sostenible.

La minería artesanal se utiliza hoy, aunque esté prohibida según la normativa ambiental colombiana por el uso del mercurio, es muy preocupante por su naturaleza altamente tóxica y su capacidad de afectar adversamente a los ecosistemas y a la salud humana. El mercurio, en sus diversas formas, puede ingresar al medio ambiente por varias vías. Una vez presente en el ambiente, se acumula en cuerpos de agua y suelos, donde se transforma en metilmercurio, una forma aún más tóxica y biodisponible (Segura y Pardave, 2020).

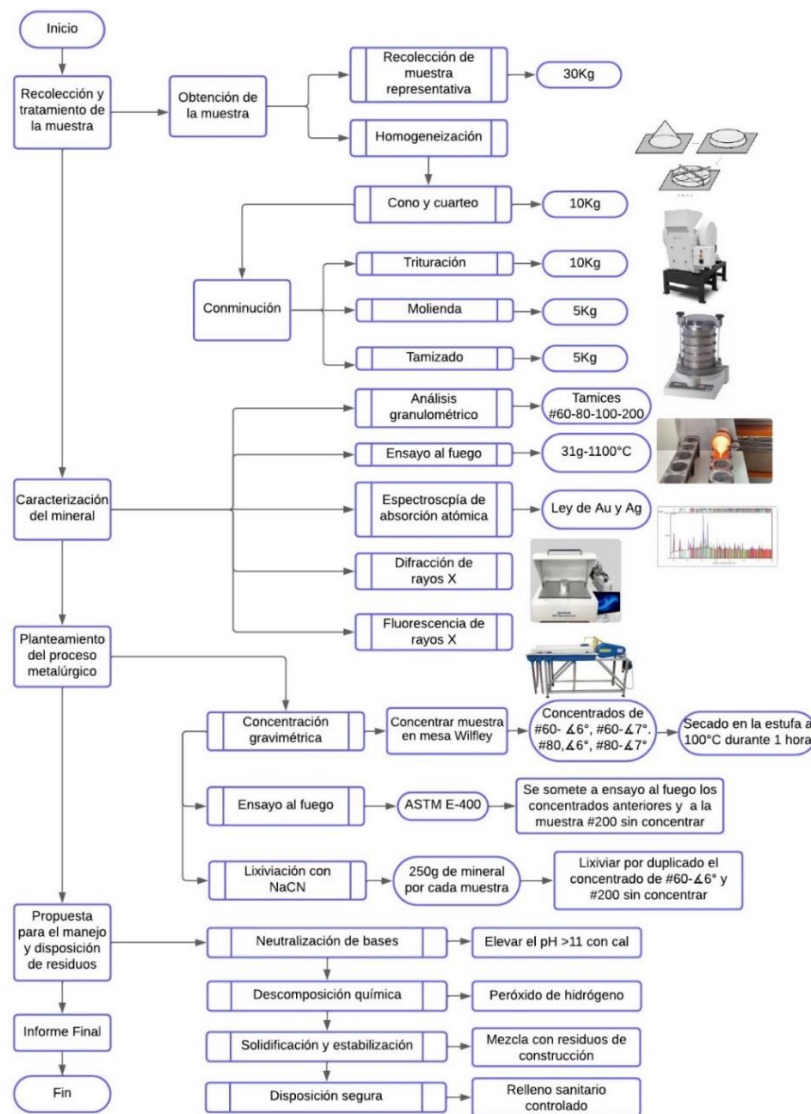
Para abordar esta problemática, es importante cumplir con las regulaciones nacionales y realizar prácticas adecuadas para minimizar los riesgos asociados a esta sustancia tóxica, como daños a la salud humana. Las principales regulaciones incluyen la Ley 685 de 2001 (Código de Minas) y el convenio de Minamata (Ministerio de Ambiente (MINAM, 2022).

## 4 Metodología

La extracción de oro de un mineral auro-argentífero implica un proceso metalúrgico. Por lo tanto, se realizan análisis para determinar la cantidad de oro y plata en el mineral y caracterizar su composición mineralógica. A continuación, se describe la metodología que se llevará a cabo durante este estudio y se incluye una propuesta para el manejo y disposición de residuos:

**Figura 1**

*Diagrama de flujo de la metodología.*



#### **4.1 Recolección y tratamiento de la muestra**

Se obtuvo una muestra representativa del yacimiento de mineral auro-argentífero de la zona. Esta se redujo de tamaño mediante trituración y molienda hasta obtener partículas más finas. Esto facilitó la liberación de las partículas de oro y plata contenido en el mineral.

##### ***4.1.1 Obtención de la muestra***

Para obtener muestras de los minerales de una zona del Departamento de Arauca, se recolectó una muestra total de 30 kg, de diferentes frentes de explotación de una mina ubicada en el municipio de Arauca. Esto implicó la toma de muestras en ubicaciones específicas del territorio a diferentes profundidades y direcciones la cual fue proporcionada por un minero de la zona. Luego, al recibir la muestra en el laboratorio de la UIS se procedió a aplicar el método de cono y cuarteo para mezclar y reducir la muestra a 10kg, con el fin de obtener una muestra representativa.

##### ***4.1.2 Conminución***

Se realizó la trituración de 10 kg de la muestra, con el objetivo de reducir el tamaño inicial, seguida por la molienda de 5 kg, para la obtención de un polvo de fina granulometría (Malla Tyler No.200). Además, se empleó el tamizado a 5 kg para categorizar y separar las partículas según su tamaño.

#### **4.2 Caracterización del mineral**

Se realizaron análisis químicos y mineralógicos para determinar la composición y la cantidad de oro presente en la muestra, así como minerales y elementos que puedan influir el proceso de extracción.

##### ***4.2.1 Análisis granulométrico***

Para determinar la distribución granulométrica de una muestra, se realizó un tamizado utilizando las Mallas Tyler No. 60, 80, 100 y 200. Durante este proceso, se pesó la cantidad de

material retenido en cada tamiz y la cantidad que pasa a través de ellos. Luego, se calculó el porcentaje de material en cada fracción de tamaño y se representó gráficamente en una curva granulométrica.

#### ***4.2.2 Análisis de ensayo al fuego***

Según la norma ASTM-E400, el ensayo al fuego inició con la trituración y homogeneización de la muestra mineral, seguido de su mezcla con fundentes específicos para optimizar la separación. La muestra preparada se fundió en un horno a temperatura controlada entre 1000-1200°C, permitiendo la separación de la escoria y la formación de un botón metálico. Este botón se sometió a copelación resultando en un doré y el botón resultante se trata con ácido nítrico, que disuelve la plata y deja el oro intacto.

#### ***4.2.3 Análisis de absorción atómica***

La muestra obtenida del ensayo al fuego se sometió a un análisis de absorción atómica con el objetivo de cuantificar la concentración de oro y plata en la solución. Para este análisis se utilizó el equipo Agilent Spectraa 240S, junto con patrones certificados de la marca CertiPUR de Merck, garantizando así la precisión y exactitud de los resultados obtenidos.

#### ***4.2.4 Análisis de fluorescencia de rayos X (FRX)***

La muestra del mineral triturado fue sometida a un análisis de Fluorescencia de Rayos X (FRX) para determinar su composición elemental y obtener información sobre la presencia y concentración de diversos elementos químicos. El registro de datos se llevó a cabo utilizando un equipo marca BRUKER, modelo S8 TIGER.

#### 4.2.5 *Análisis de difracción de rayos X (DRX)*

Se realizó un análisis de DRX para identificar las fases de los minerales presentes en la muestra. Esto, con el fin de realizar una caracterización sobre la estructura cristalina de los minerales y de este modo optimizar los procesos de extracción.

### 4.3 Planteamiento del proceso metalúrgico

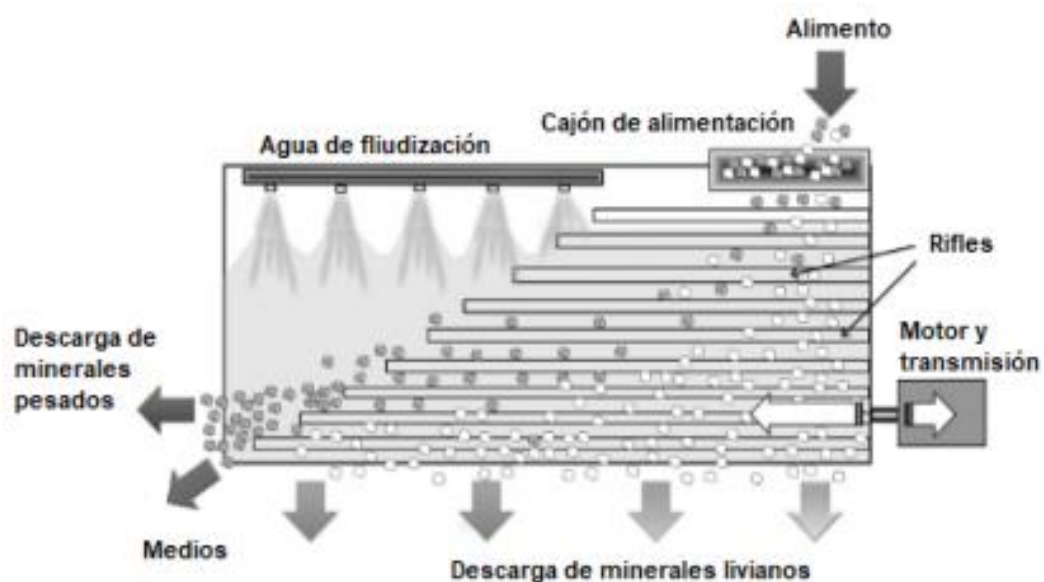
#### 4.3.1 *Concentración gravimétrica*

La muestra se concentró gravimétricamente utilizando una mesa Wilfley. Para este propósito, se procesaron 500 g de mineral tamizado a mallas Tyler No. 60 y No. 80, aplicando ángulos de inclinación de la mesa de 6° y 7° y una frecuencia de 54 Hz.

Las condiciones experimentales se definieron teniendo en cuenta las siguientes mallas y ángulos: malla Tyler No. 60-6°, No. 60-7°, No. 80-6° y No. 80-7°. Posteriormente, las muestras concentradas se secaron en una estufa a una temperatura de 100°C durante 1 hora para eliminar completamente la humedad presente.

### Figura 2

Mesa Vibratoria Wilfley. Fuente: (A Gupta & Yan, 2006a)



#### **4.3.2 *Ensayo al fuego***

Se realizó un proceso de tostación y ensayo al fuego a cada una de las muestras concentradas en la mesa Wilfley, con el fin de determinar en qué malla y bajo qué ángulo de inclinación se obtiene una mayor ley del mineral. Además, se analizó la ley del mineral obtenido en la malla Tyler No. 200 sin concentrar, con el propósito de corroborar los resultados obtenidos inicialmente.

#### **4.4 *Lixiviación con NaCN***

La normatividad ambiental colombiana autoriza el uso de cianuro como agente lixivante en procesos mineros. Este método, cuando se implementa con un manejo apropiado de residuos, minimiza los riesgos para el medio ambiente y la salud humana. En contraste, en este Departamento persiste aún el uso indiscriminado de mercurio, una práctica altamente nociva y prohibida por la legislación nacional.

Es por ello, que el mineral triturado se mezcló en presencia de oxígeno con una solución de cianuro de sodio, la cual disuelve la plata y el oro formando complejos solubles en agua. Durante la lixiviación, los metales preciosos se extraen selectivamente de la matriz mineral, pasando a la fase líquida.

Posteriormente, la solución cargada con los metales disueltos se separa de los residuos sólidos mediante filtración o decantación. Este proceso de lixiviación permite concentrar los metales de interés en una solución acuosa, facilitando su posterior recuperación y separación para el análisis final del estudio.

#### 4.4.1 *Proceso Experimental*

Se realizaron cuatro cianuraciones en frascos ámbar de 500 ml a muestras de 250g. Dos(2) de las cuales contaban con un tamaño de partícula pasante malla Tyler No. 60 y se obtuvieron con ángulo 6° de la mesa Wilfley y las dos(2) restantes tenían un tamaño de partícula pasante malla Tyler No. 200 sin concentrar. Después, el mineral se lixivió con una solución de 2 g/L de cianuro de sodio, con un pH entre 10 y 11, a temperatura ambiente y con una agitación de 500 rpm, durante 48 horas. Además, se realizó el estudio acerca de la velocidad de disolución del oro.

- **Recolección de muestras:** Se toman 8 muestras de 10 mL de la solución concentrada malla 60 con un ángulo de inclinación de 6°, que contiene oro a intervalos específicos (0, 4, 8, 16, 24, 32, 40 y 48 horas) durante el proceso de lixiviación.
- **Conservación de la solución:** Para mantener una proporción constante de 1:2 entre el mineral y la solución, correspondiente a una pulpa al 33% de sólidos (250 g de mineral en 500 mL de solución), se reemplazan 10 mL de solución nueva por cada muestra extraída en intervalos de tiempo.
- **Análisis de oro y plata:** Las concentraciones de oro y plata se determinan siguiendo la norma ASTM E1024, que garantiza un análisis químico preciso de metales y minerales mediante espectroscopia de absorción atómica.
- **Evaluación del consumo del agente lixivante:** Se toman muestras de la solución de lixiviación (10mL), se verifica su pH alcalino (10-11), y se añaden 3-5 gotas de indicador de yoduro de potasio al 5%. La muestra se titula con una solución estándar de nitrato de plata ( $\text{AgNO}_3$ ) agitando constantemente hasta que se observe un cambio de color. Este

método permite determinar la concentración de cianuro libre en la solución y evaluar el consumo del agente lixivante durante el proceso (Nava et. al. , 2007).

#### **4.5 Propuesta para el manejo y disposición de residuos**

Con el ánimo de cerrar el ciclo dentro de la investigación y aplicando principios de economía circular (“Introducción a la economía circular”, 2020), se plantea que en otra investigación los residuos generados durante el proceso se traten teniendo en cuenta un enfoque integral en el cual se combinen varias etapas:

Inicialmente, se añade cal (hidróxido de calcio) o soda cáustica (hidróxido de sodio) al residuo para elevar su pH, convirtiendo el cianuro libre en complejos menos tóxicos. Posteriormente, se aplica una descomposición química utilizando agentes oxidantes como hipoclorito de sodio, peróxido de hidrógeno u ozono.

Luego, se aplica un proceso de solidificación y estabilización, mezclándolos con residuos de construcción y demolición (RCD), como concreto o ladrillos triturados, en esta mezcla. Este método no solo inmoviliza eficazmente el cianuro, previniendo su lixiviación al medio ambiente, sino que también permite una disposición segura en rellenos sanitarios controlados (Unidad de Planeación Minero Energética (UPME, 2007).

## 5 Resultados

Para la granulometría de la muestra se emplearon los tamices Malla Tyler No. 60, No. 80, No. 100, No. 200 y fondo, durante 3 minutos por cada uno de los tamices (total de 15 minutos). En la Tabla 1, se registra el peso en gramos y el porcentaje para cada tamiz, respectivamente. Finalmente, se obtiene una cantidad de mineral total de 2000g después de realizar 3 tamizadas

**Tabla 1**

*Cantidad de mineral tamizado*

#Tamiz	1era tamizada	2da tamizada	3ra tamizada	Total	%
#60	200g	420g	140g	760g	38%
#80	225g	415g	205g	845g	42,25%
#100	70g	65g	70g	205g	10,25%
#200	5g	80g	50g	135g	6,75%
Fondo	0g	20g	35g	55g	2,85%
Total	500g	1000g	500g	2000g	100%

Luego, en las Tablas 2, 3 y 4 se determinan los porcentajes de retenido y pasante acumulado para cada tamizada y la zona con mayor contenido de mineral. Estos datos se analizan de acuerdo al modelo de Gates-Gaudin-Schumann.

**Tabla 2**

*Datos del análisis granulométrico Gates-Gaudin-Schumann 1er tamizada*

Malla Tyler	Dp (µm)	Peso Retenido (g)	% en peso retenido en cada tamiz	% en peso retenido acumulado	% en peso pasante acumulado
60	250	200,00	40,00	40,00	60,00
80	177	225,00	45,00	85,00	15,00
100	149	70,00	14,00	99,00	1,00
200	74	5,00	1,00	100,00	0,00
<200	37	0,00	0,00	100,00	0,00
0	0	500,00			

**Tabla 3***Datos del análisis granulométrico Gates-Gaudin-Schumann 2da tamizada*

Malla Tyler	Dp (µm)	Peso Retenido (g)	% en peso retenido en cada tamiz	% en peso retenido acumulado	% en peso pasante acumulado
60	250	420,00	42,00	42,00	58,00
80	177	415,00	41,50	83,50	16,50
100	149	65,00	6,50	90,00	10,00
200	74	80,00	8,00	98,00	2,00
<200	37	20,00	2,00	100,00	0,00
0	0	1000,00			

**Tabla 4***Datos del análisis granulométrico Gates-Gaudin-Schumann 3era tamizada*

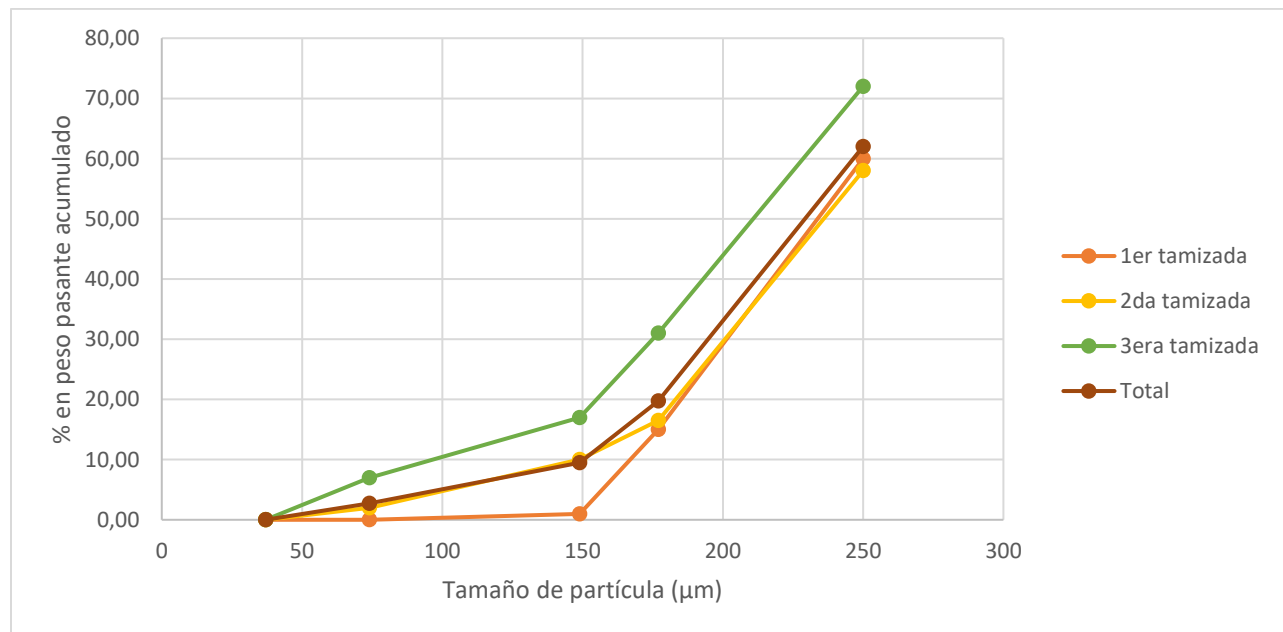
Malla Tyler	Dp (µm)	Peso Retenido (g)	% en peso retenido en cada tamiz	% en peso retenido acumulado	% en peso pasante acumulado
60	250	140,00	28,00	28,00	72,00
80	177	205,00	41,00	69,00	31,00
100	149	70,00	14,00	83,00	17,00
200	74	50,00	10,00	93,00	7,00
<200	37	35,00	7,00	100,00	0,00
0	0	500,00			

En la Tabla 5, se observan los porcentajes de retenido y pasante acumulado totales y la zona con mayor contenido de mineral. Estos datos se emplean para realizar una distribución granulométrica.

**Tabla 5***Datos del análisis granulométrico Gates-Gaudin-Schumann Total*

Malla Tyler	Dp (μm)	Peso Retenido (g)	% en peso retenido en cada tamiz	% en peso retenido acumulado	% en peso pasante acumulado
60	250	760,00	38,00	38,00	62,00
80	177	845,00	42,25	80,25	19,75
100	149	205,00	10,25	90,50	9,50
200	74	135,00	6,75	97,25	2,75
<200	37	55,00	2,75	100,00	0,00
0	0	2000,00			

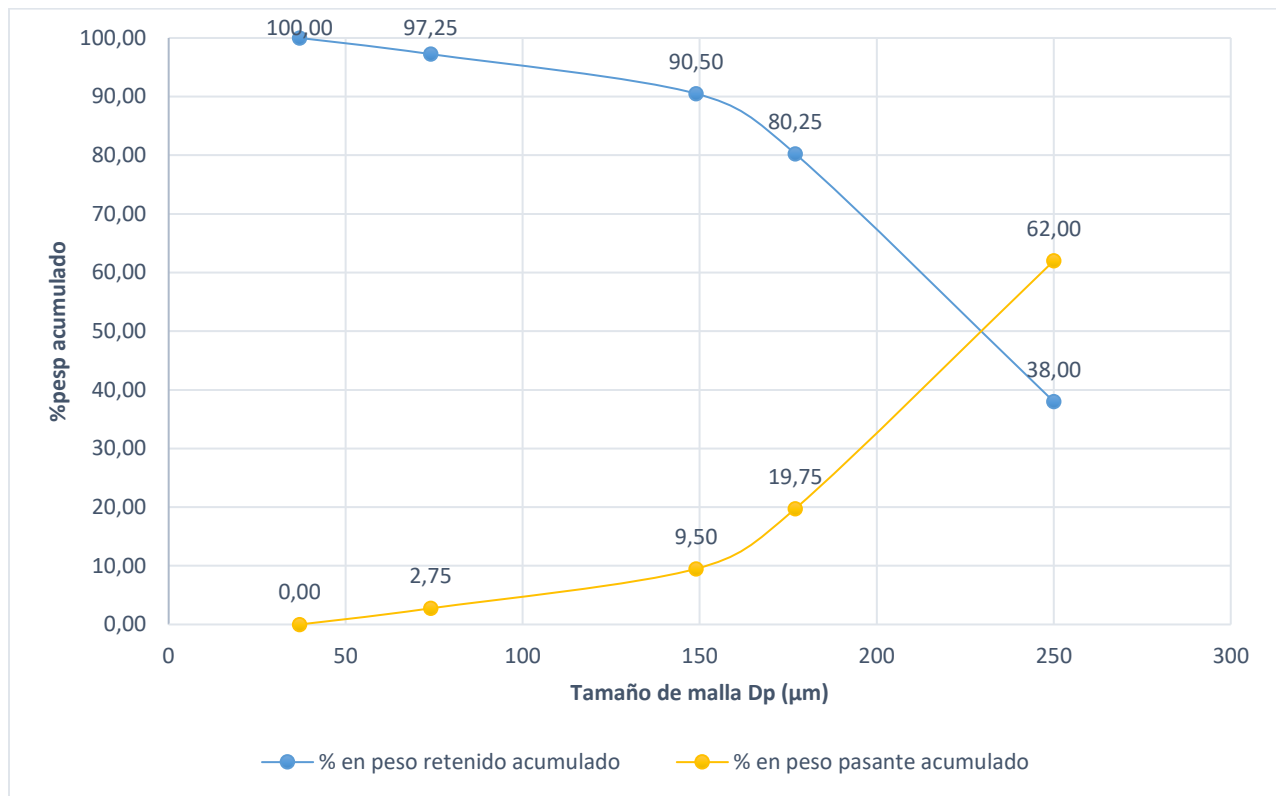
La Figura 3 muestra las tendencias de cada tamizada mediante la distribución granulométrica, determinando el porcentaje acumulado de pasante para cada tamaño de partícula en (μm). Donde se evidencia, que el mayor porcentaje de mineral, se encuentra en los tamices de 177 μm y 250 μm, es decir, malla Tyler No. 60 y No. 80, respectivamente.

**Figura 3***Gráfico de la distribución granulométrica %en peso pasante acumulado vs Dp*

La Figura 4, muestra el análisis granulométrico, donde se comprueba que para la malla Tyler No. 60 se obtiene la mayor cantidad de peso pasante acumulado D60, con porcentaje de 62%.

#### Figura 4

Gráfico de % en peso acumulado vs Dp (%retenido y %pasante)



En la Tabla 6, con relación a los datos obtenidos mediante el análisis de ensayo al fuego y absorción atómica, se evidencia que las muestras de mineral cabeza presentan un promedio de 3,52 g/ton de Au y 7,72 g/ton de Ag.

**Tabla 6***Resultado ley tenor de mineral sin concentrar*

Au							
ID MUESTRA	ppm	Factor de dilución	Ppm	Aforo (L)	Peso de muestra (g)	Ley (g/ton)	Ley Promedio (g/ton)
IMET-1	4,32	1	4,3	0,025	31,000	3,48	3,52
IMET-2	4,41	1	4,4	0,025	31,000	3,56	
Ag							
ID MUESTRA	ppm	Factor de dilución	Ppm	Aforo (L)	Peso de muestra	Ley (g/ton)	Ley Promedio (g/ton)
IMET-1	0,952	10	9,5	0,025	31,000	7,68	7,72
IMET-2	0,96	10	9,6	0,025	31,000	7,77	

A continuación, se observan las condiciones de trabajo de la metodología empleada en el ensayo de difracción de rayos X.

**Tabla 7***Reporte de resultados de ensayo por difracción de rayos X*

METODOLOGÍA DEL TRABAJO	
	El registro de datos se realizó en un difractómetro de polvo marca BRUKER modelo B8 ADVANCE CON Geometría DaVinci
	Voltaje (kV) 40
	Corriente (mA) 40
	Rendija de Divergencia (mm) 0,6
	Rendijas Soller Primario (*) 2,5
	Rendijas Soller Secundario (*) 2,5
Condiciones de Registro	Tamaño de Paso (*2 Theta) 0,02035
	Tiempo por paso (s) 0,6
	Rango de registro (*2 Theta) 4,0 a 70,0
	Radiación CuK $\alpha$ 1
	Filtro Níquel
	Uso de Anti-dispersor de Aire Si
	Detector Lineal LynxEye
	Tipo de barrido A pasos

La Tabla 8 presenta los resultados del ensayo por difracción de rayos X, mediante el análisis cuantitativo de las fases mineralógicas, donde se evidencia que la composición mineral contiene en su mayoría cuarzo (48.8%), moscovita (19.8%), pirita (4.9%) y otros compuestos en menor cantidad (26,5%)

**Tabla 8**

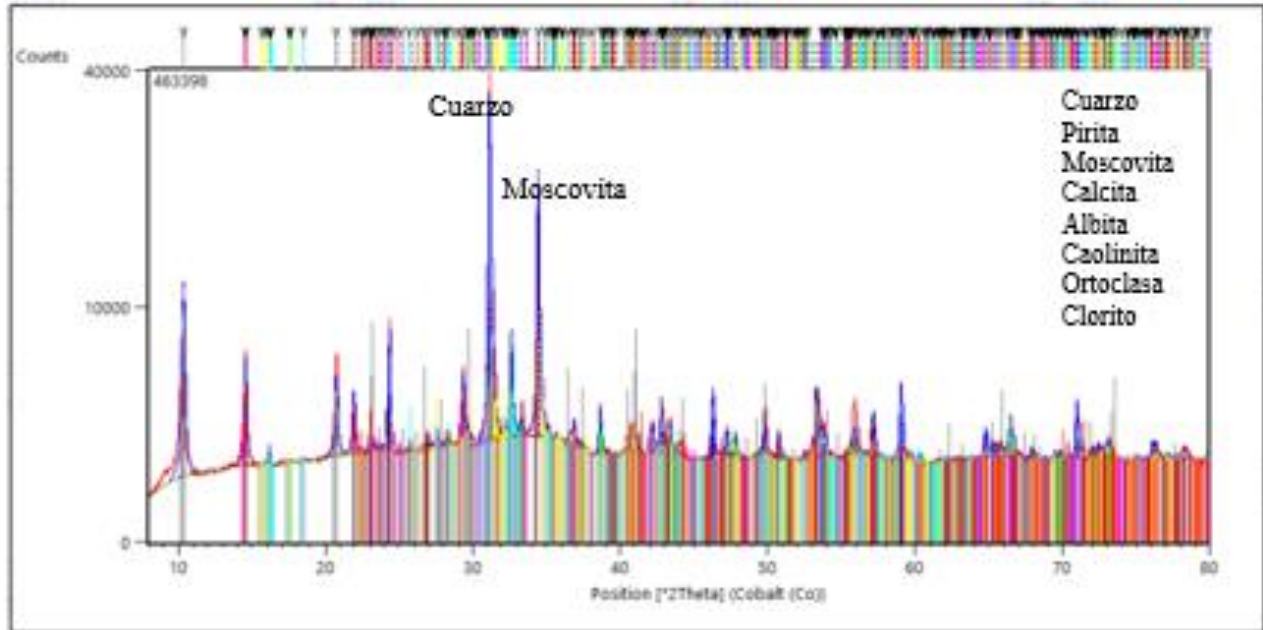
*Análisis cuantitativo de fases mineralógicas por espectrometría de difracción de rayos X por método Rietveld.*

Compuesto	Fórmula Química	%	Dureza Mohs	Densidad (g/cm <sup>3</sup> )
Quartz / Cuarzo	$SiO_2$	48.8	7	2.65
Pyrite / Pirita	$FeS_2$	4.9	6-6.5	4.8-5.0
Muscovite / Moscovita	$KAl_2(Si_3Al)O_{10}(OH, F)_2$	19.8	2-2.5	2.76
Calcite / Calcita	$CaCO_3$	9.1	3	2.71
Albite / Albita	$NaAlSi_3O_8$	6.7	6-6.5	2.62-2.66
Kaolinite / Caolinita	$Al_2Si_2O_5(OH)_4$	0.9	2-2.5	2.6
Orthoclase / Ortoclasa	$KAlSi_3O_8$	3.5	6	2.56-2.58
Chlorite / Clorito	$Mg_{9.17}.Fe_{1.02}Al_{3.46}Si_{6.35}O_{36.00}$	6.3	2-2.5	2.6-3.3

En la Figura 5, se observa el reporte arrojado por el equipo de difracción de rayos X.

**Figura 5**

*Reporte equipo de difracción de rayos X*



A continuación, la Tabla 9, presenta un análisis cuantitativo de óxidos por espectrometría de fluorescencia de rayos X de dispersión de longitud de onda. El análisis por FRX cuantifica con precisión los elementos con mayor presencia.

**Tabla 9**

*Reporte de resultados de ensayo por fluorescencia de rayos X*

<b>Analito</b>	<b><i>SiO<sub>2</sub></i></b>	<b><i>Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub></i></b>	<b><i>CaO</i></b>	<b><i>SO<sub>3</sub></i></b>	<b><i>Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub></i></b>	<b><i>K<sub>2</sub>O</i></b>	<b><i>MgO</i></b>	<b><i>ZnO</i></b>	<b><i>Na<sub>2</sub>O</i></b>	<b><i>TiO<sub>2</sub></i></b>
%	52.42	12.76	9.41	6.78	5.65	3.48	1.53	1.03	0.86	0.40
<b>Analito</b>	<b><i>MnO</i></b>	<b><i>PbO</i></b>	<b><i>P<sub>2</sub>O<sub>5</sub></i></b>	<b><i>CuO</i></b>	<b><i>As<sub>2</sub>O<sub>3</sub></i></b>	<b><i>V<sub>2</sub>O<sub>5</sub></i></b>	<b><i>ZrO<sub>2</sub></i></b>	<b><i>Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub></i></b>	<b><i>SrO</i></b>	<b><i>PPC</i></b>
%	0.22	0.13	0.13	0.04	0.04	0.03	0.02	0.02	0.01	4.99

*Nota.* PPC: Pérdidas por calcinación a  $950\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 25\text{ }^{\circ}\text{C}$  durante una hora. Los resultados se encuentran normalizados.

La Tabla 10, presenta las variables que se utilizaron para esta etapa de concentración en la mesa Wilfley y las variables en el posterior secado de la muestra.

**Tabla 10**

*Parámetros Mesa Wilfley*

Separación gravimétrica	Alimentación del mineral (g)	500
	Caudal (ml/s)	200
	Frecuencia (Hz)	55
Secado en la estufa	Temperatura $^{\circ}\text{C}$	100
	Tiempo (min)	30

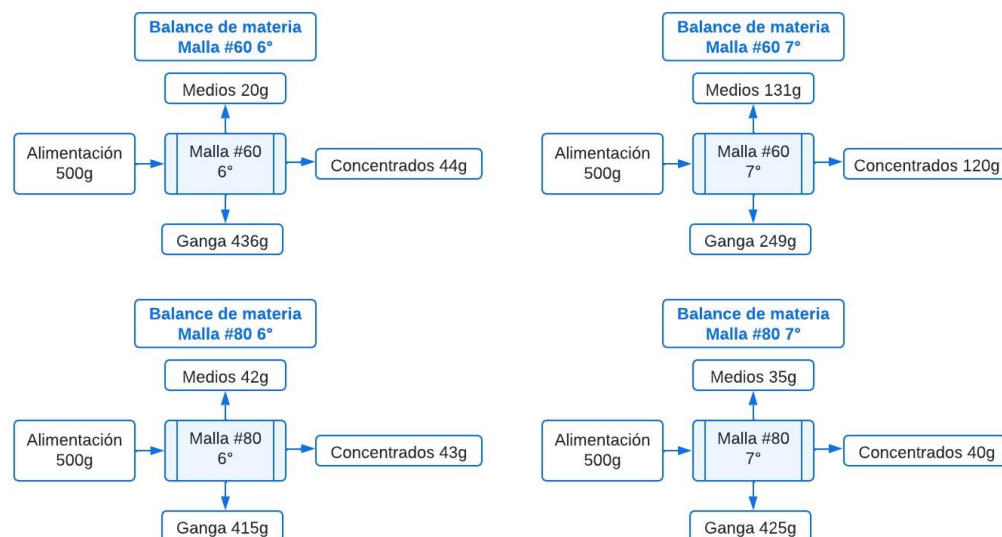
Por otra parte, la Tabla 11, presenta la cantidad de mineral que se obtiene en los concentrados, medios y ganga, para cada uno de los dos tipos de mallas y la variable de ángulo específica.

**Tabla 11**

*Resultados Mesa Wilfley*

Mesa Wilfley				
#malla	Ángulo	Concentrados (g)	Medios (g)	Ganga (g)
60	6	44	20	436
60	7	120	131	249
80	6	43	42	415
80	7	40	35	425

La Figura 6 presenta un balance de materia para cada muestra de mineral utilizada en la etapa de extracción. Este balance permite determinar la relación entre la cantidad de mineral alimentado y la cantidad obtenida en forma de ganga, medios y concentrados.

**Figura 6***Balances de materia*

En la Tabla 12, se registran los datos obtenidos para la tostación, la pérdida de peso es el resultado de la eliminación de humedad, la descomposición de minerales, la oxidación de sulfuros, la quema de materia orgánica y la volatilización de ciertos componentes.

**Tabla 12***Resultados Tostación*

Tostación						
#malla	Ángulo	Peso Crisol (g)	Peso total (g)	Peso final (g)	Peso inicial (g)	Peso final (g)
60	6	86.45	116.47	114.62	30.02	28.17
60	7	95.95	125.97	124.65	30.02	28.7
80	6	74.72	104.78	102.9	30.06	28.18
80	7	79.89	109.92	108.4	30.03	28.51
200	-	83.26	113.28	112.5	30.02	29.24

La Tabla 13, revela las cantidades de cada uno de los componentes que se deben usar para preparar la mezcla del flux que se emplea en el ensayo al fuego.

**Tabla 13***Cantidades de material usadas en ensayo al fuego*

Litargirio	45 g
Carbonato	35 g
Bórax	5 g
Harina	5 g
Sal	1 g

En la Tabla 14, se registran los pesos del doré al inicio y al final de la etapa, tras el ataque con ácido nítrico y la disolución de los elementos distintos al Au. Esta pérdida de masa permite determinar la ley de oro y plata del mineral.

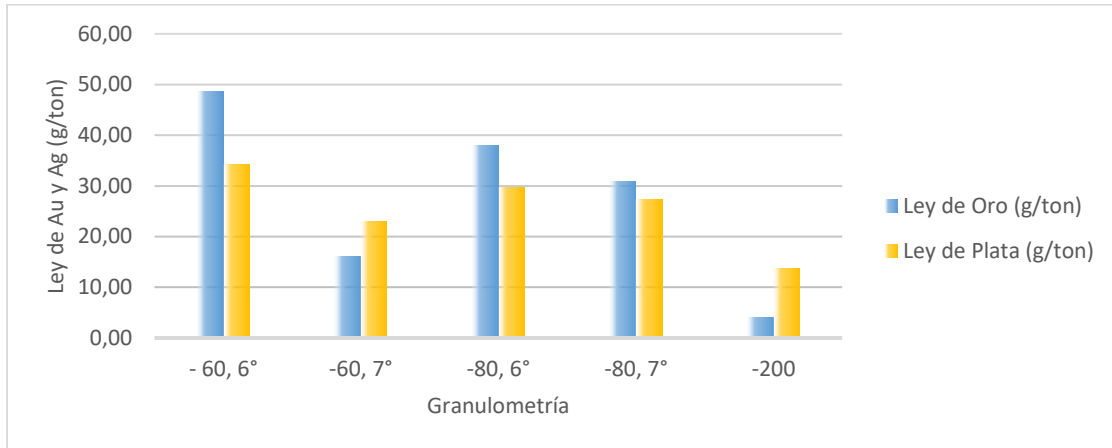
**Tabla 14***Resultados ley tenor de mineral concentrado*

Ensayo al fuego					
#malla	Ángulo	Peso inicial (g)	Peso final (g)	Ley de Oro (g/Ton)	Ley de Plata (g/Ton)
60	6	0.00249	0.00146	48.63	34.31
60	7	0.00117	0.00048	15.99	22.98
80	6	0.00203	0.00114	37.92	29.61
80	7	0.00175	0.00093	30.97	27.31
200	-	0.00053	0.00012	4.00	13.66

En la Figura 7, se evidencia la ley de Au y Ag para cada muestra. Así se revela un valor mayor de ley para la malla 60 con un ángulo de 6°.

**Figura 7**

*Ley de Au y Ag en (g/ton) para cada granulometría*



A continuación, en la Tabla 15 se registran los resultados obtenidos mediante el análisis de espectrometría de absorción atómica para cada una de las muestras cianuradas. Los cuales arrojaron resultados similares a los obtenidos mediante el ensayo al fuego.

**Tabla 15**

*Resultados de absorción atómica para cianuración*

Muestra	mg Au/L	mg Ag/L
1er cianurado #200 sin concentrar	5,25	3,56
2do cianurado #200 sin concentrar	5,30	3,42
1er cianurado #60-6° concentrado	5,32	5,22
2do cianurado #60-6° concentrado	5,36	5,03

En la Tabla 16, se encuentran los parámetros para clasificar el grado de lixiviabilidad de acuerdo al porcentaje de oro disuelto.

**Tabla 16**

*Grado de lixiviabilidad para %Au disuelto. Fuente: Universidad Nacional José Faustino*

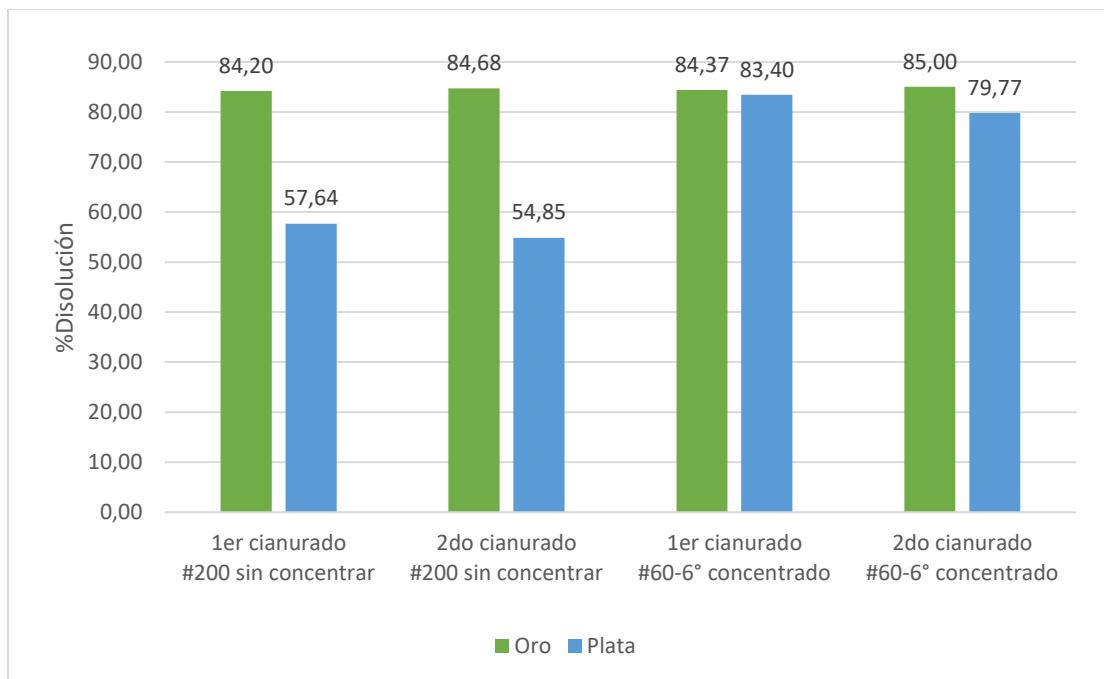
*Sánchez Carrión*

Grado de lixiviabilidad	%Au disuelto
Difícilmente lixiviable	<65
Medianamente lixiviable	65-85
Altamente lixiviable	>85

En la siguiente Figura 8, se encuentran los porcentajes de disolución de oro y plata respecto a cada una de las muestras analizadas mediante espectrometría de absorción atómica.

**Figura 8**

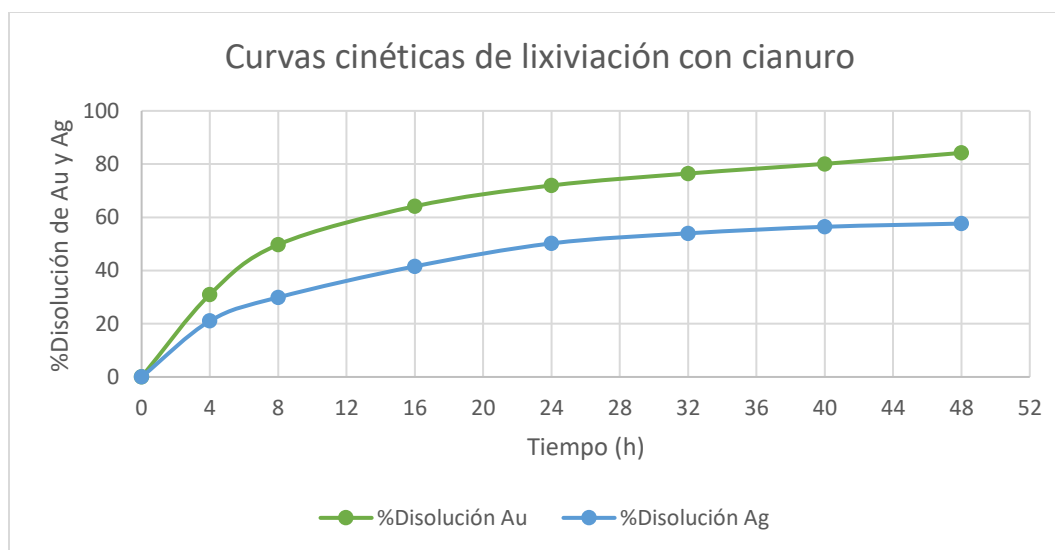
*%Disolución de oro y plata*



A continuación, se observan las curvas cinéticas de lixiviación con cianuro del oro y la plata en un tiempo de 48 horas. De allí se observa que al final del proceso, se obtuvo un 84,2% de disolución del oro y un 57,64% de disolución de plata.

### Figura 9

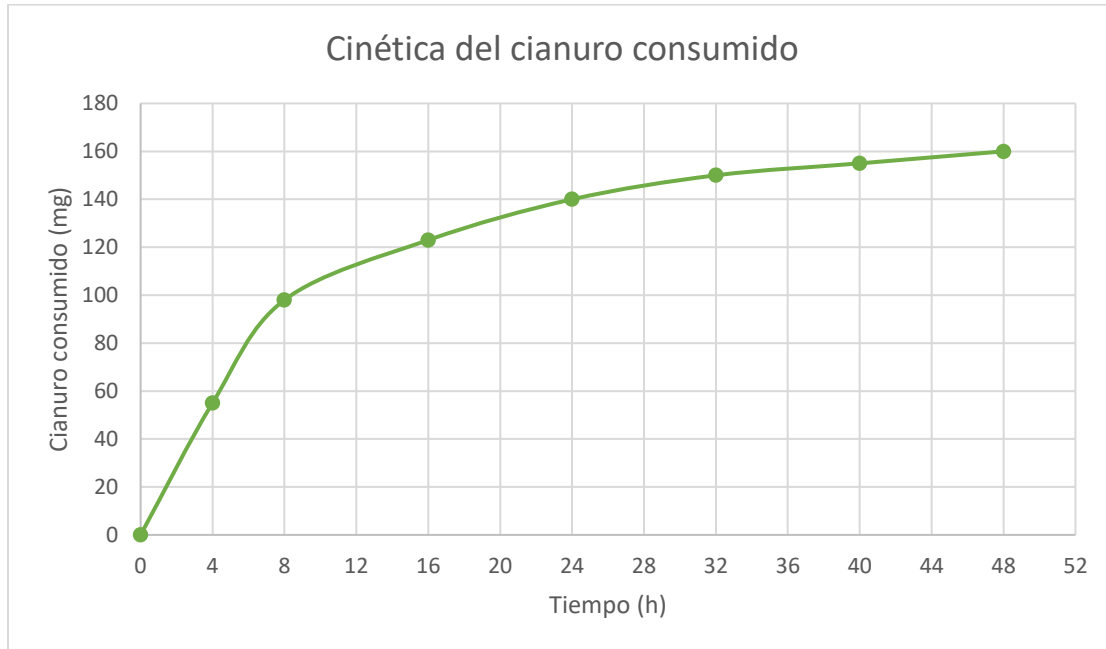
*Curvas cinéticas de lixiviación con cianuro del oro y la plata*



En la Figura 10, se muestra la cinética del cianuro consumido en mg durante el proceso de cianuración. Se observa que la velocidad de consumo de cianuro es mayor al inicio y disminuye con el tiempo. Durante el período de lixiviación evaluado, se registró un consumo de cianuro de 640 g por tonelada de mineral tratado. Según los valores estándar, el consumo de cianuro suele oscilar entre 500 y 1000 g/ton, lo que indica que el mineral tratado presenta un consumo de cianuro dentro de los rangos normales (Garza, 2015).

**Figura 10**

*Cinética del cianuro consumido durante el proceso de cianuración*



## 6 Conclusiones

1. El análisis granulométrico reveló que las mayores concentraciones de minerales se encuentran retenidas en las fracciones más gruesas, correspondientes a las mallas Tyler No. 60 y No. 80. Por ello, se realizó un ensayo al fuego por duplicado en las muestras de cada una de estas mallas, obteniendo que la ley de oro y plata es mayor en comparación con la ley obtenida en el análisis de la muestra de la malla Tyler No. 200. Esto indica que el proceso de conminución utilizado es adecuado para la liberación efectiva de los metales preciosos, sin necesidad de una molienda excesivamente fina.
2. Los ensayos al fuego del mineral sin concentrar arrojaron leyes promedio de 3.52 g/ton de Au y 7.72 g/ton de Ag. Estos valores, aunque moderados, señalan una oportunidad de

investigación de métodos de concentración y extracción para el aprovechamiento económico del yacimiento.

3. Utilizando una malla Tyler No. 60 y un ángulo de inclinación de  $6^\circ$ , se lograron valores significativos en la fracción concentrada: 48.63 g/ton de oro (Au) y 34.31 g/ton de plata (Ag). Esto representa un impresionante aumento del 1216% en la ley de oro y un 251% en la ley de plata, por lo que el método demostró ser altamente eficaz bajo estas condiciones.
4. Para los resultados con la misma malla Tyler No. 60 y ángulo de inclinación de  $7^\circ$  el aumento en la ley de oro fue del 400%, y en la ley de plata, del 168%. Por lo tanto, se concluye que el ángulo de  $7^\circ$  produce buenos resultados y se obtiene una cantidad alta de concentrados.
5. El proceso de cianuración, llevado a cabo durante 48 horas, demostró ser efectivo para la extracción de oro y plata. La alta disolución del oro (84,2%), plata (57,64%) y la concentración significativa de oro en las muestras (5,36 mg/L para malla Tyler No.60- $6^\circ$ ) indican un buen resultado para la explotación.
6. La caracterización mineralógica por difracción de rayos X (DRX) mostró una composición mineral dominada por cuarzo (48.8%) y moscovita (19.8%), con presencia significativa de pirita (4.9%) y en especies de menor proporción (26,5%). Esta composición proporciona información valiosa para el diseño de procesos de beneficio eficientes.
7. El análisis por fluorescencia de rayos X (FRX) cuantificó los elementos presentes, confirmando los hallazgos del análisis por difracción de rayos X (DRX). Las concentraciones encontradas fueron de 52.42%  $\text{SiO}_2$ , de alúmina 12.76%  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , cal 9.41%  $\text{CaO}$  y el conjunto de otras especies en menor proporción de 25.41%, son coherentes con la mineralogía observada, validando así la metodología utilizada.

## 7 Recomendaciones

- Se recomienda implementar la metodología desarrollada en este estudio, que combina técnicas analíticas avanzadas como la difracción de rayos X (DRX) y la fluorescencia de rayos X (FRX), junto con métodos de concentración física como la separación gravimétrica. Asimismo, se aconseja seguir el protocolo de evaluación fisicoquímica presentado, ya que es replicable y aplicable a yacimientos similares. La implementación de estas recomendaciones contribuirá significativamente al desarrollo de prácticas mineras más eficientes y sostenibles, no solo en la región de Arauca sino en toda Colombia.
- En el manejo de vertederos de residuos de minería con cianuro, es fundamental implementar controles tales como: la neutralización química, la descomposición controlada, la solidificación adecuada y la disposición segura. Además, se recomienda capacitar al personal, llevar un control de descargas y monitoreo constante para prevenir riesgos ambientales y proteger la salud pública.

### Referencias Bibliográficas

- Agencia Nacional de Minería. (2023). Informe Minero. En Informe de Gestión. [https://www.anm.gov.co/sites/default/files/Informe\\_Ejecutivo\\_RdC\\_ANM\\_2023\\_261020\\_23\\_v3.pdf](https://www.anm.gov.co/sites/default/files/Informe_Ejecutivo_RdC_ANM_2023_261020_23_v3.pdf)
- American Society for Testing and Materials. (2007). ASTM E400-02: Standard Test Method for Analysis of Ores, Minerals, and Rocks by the Fire Assay Preconcentration Optical Emission Spectroscopy. ASTM International.
- ASTM International. (1997). ASTM E1024-97: Guía estándar para el análisis químico de metales y minerales metálicos por espectrofotometría de absorción atómica de llama. <https://cdn.standards.iteh.ai/samples/7762/edf04646e5164addb1b19bdc891eea17/ASTM-E1024-97.pdf>
- Azañero Ortiz, Á. (2001). Recuperación de oro y plata de minerales por lixiviación. Revista del Instituto de Investigación de la Facultad de Minas, Metalurgia y Ciencias Geográficas, 4(7).
- Ellen MacArthur Foundation. (2020). Introducción a la economía circular. <https://www.ellenmacarthurfoundation.org/es/temas/presentacion-economia-circular/vision-general>
- Garza, C. (2015). Análisis químico de cianuro en el proceso de cianuración: revisión de los principales métodos. [https://www.academia.edu/11153865/An%C3%A1lisis\\_qu%C3%ADmico\\_de\\_cianuro\\_en\\_el\\_proceso\\_de\\_cianuraci%C3%B3n\\_revisi%C3%B3n\\_de\\_los\\_principales\\_m%C3%A9todos](https://www.academia.edu/11153865/An%C3%A1lisis_qu%C3%ADmico_de_cianuro_en_el_proceso_de_cianuraci%C3%B3n_revisi%C3%B3n_de_los_principales_m%C3%A9todos)

Gupta, A., & Yan, D. S. (2006). *Mineral Processing: Principles and Practices*. Elsevier.

Jeffrey, M. I., Breuer, P. L., & Choo, W. L. (2001). A Kinetic Study That Compares the Leaching of Gold in the Cyanide, Thiosulfate, and Chloride Systems. *Metallurgical and Materials Transactions B*, 32(6), 979-986.

Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. (2022, 26 enero). Convenio de Minamata. <https://www.minambiente.gov.co/asuntos-ambientales-sectorial-y-urbana/convenio-de-minamata/>

Nava-Alonso, F., Elorza-Rodríguez, E., Uribe-Salas, A., & Pérez-Garibay, R. (2007). Análisis químico de cianuro en el proceso de cianuración: revisión de los principales métodos. *Revista de Metalurgia*, 43(1), 20-28. [https://www.researchgate.net/publication/44200310\\_Analisis\\_quimico\\_de\\_cianuro\\_en\\_el\\_proceso\\_de\\_cianuracion\\_revision\\_de\\_los\\_principales\\_metodos](https://www.researchgate.net/publication/44200310_Analisis_quimico_de_cianuro_en_el_proceso_de_cianuracion_revision_de_los_principales_metodos)

Pardo Jaimes, C. A., & Sánchez Agudelo, M. G. (2022). Diseño de planta de 100 TPD para el beneficio de minerales auríferos provenientes de la zona minera del cauca. Repositorio de la Universidad Industrial de Santander. <https://noesis.uis.edu.co/items/2cdbded8-b6bb-42fb-abbb-ca1a3d4fe345>

Prada Carvajal, L. T., & Castro Rodríguez, F. G. (2022). Diseño de planta piloto para fabricación de ladrillos y material agregado de vías a partir de residuos de flotación de minerales polimetálicos del municipio de California, Santander. <https://noesis.uis.edu.co/server/api/core/bitstreams/4ab3a37a-fd2d-475f-86f6-19a6722ba5bd/content>

- Ríos Reyes, C. A., Pardavé Livia, W., & Santamaria Galvis, C. (2020). Estudio geo metalúrgico del beneficio del oro en un depósito mineral en la Cordillera Oriental de los Andes Colombianos. <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=8278262>
- Salinas, E., Rivera, I., Carrillo, F. R., Patiño, F., Hernández, J., & Hernández, L. E. (2004). Mejora del proceso de cianuración de oro y plata, mediante la preoxidación de minerales sulfurosos con ozono. *Revista de la Sociedad Química de México*, 48(4). [https://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S0583-76932004000400021](https://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0583-76932004000400021)
- Segura Viviescas, & Pardave Livia, W. (2020). Diseño de una planta de 200 TPD para el beneficio de minerales polimetálicos de la zona de California Santander. Universidad Industrial de Santander.
- Tiempo Minero. (2019). ¿Qué es la conminución de minerales en metalurgia? <https://camiper.com/tiempominero-noticias-en-mineria-para-el-peru-y-el-mundo/que-es-la-conminucion-de-minerales-en-metalurgia/>
- Unidad de Planeación Minero Energética. (2007). Producción más limpia en la minería del oro en Colombia: Mercurio, cianuro y otras sustancias. UPME.
- Universidad Nacional José Faustino Sánchez Carrión. (2024). Universidad Nacional José Faustino Sánchez Carrión. <https://unjfsc.edu.pe/>
- UPTC. (2018). Caracterización, beneficio y usos potenciales de minerales estratégicos del departamento de Boyacá. Editorial UPTC.

World Health Organization. (2017, 31 marzo). El mercurio y la salud.  
<https://www.who.int/es/news-room/fact-sheets/detail/mercury-and-health>

Yáñez Traslaviña, J., Vargas Ávila, M. A., García Páez, I. H., & Pedraza Rosas, J. E. (2005). Mejora de los procesos de beneficio y extracción de minerales auro-argentíferos del asentamiento minero de San Pedro Frío, Colombia. *Revista de Metalurgia*, 41(2), 116–125.  
<https://doi.org/10.3989/revmetalm.2005.v41.i2.195>

Yáñez Traslaviña, J. J. (2006). Caracterización de los minerales auríferos de la zona minera de San Pedro Frío (Bolívar-Colombia), para la selección de los procesos de extracción. *Red Dyna*.  
<https://elibro-net.bibliotecavirtual.uis.edu.co/es/lc/uis/titulos/358>

## Apéndices


### Apéndice 1

#### Resultado GIMBA ensayo al fuego

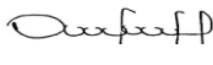
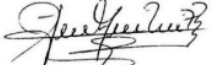
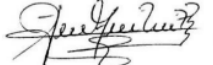
Cliente: Externo Fecha Analisis: 14/11/2023 Quien realizó el analisis: Yury Lopez Analisis: [Au-Ag] Muestra estudiante							
<b>Au</b>							
ID muestra	ppm	factor de dilucion	ppm	Aforo (L)	peso de muestra	LEY g/Ton	PROMEDIO
IMET-1	4,32	1	4,3	0,025	31,000	3,48	3,52
IMET-2	4,41	1	4,4	0,025	31,000	3,56	
<b>Ag</b>							
ID muestra	ppm	factor de dilucion	ppm	Aforo (L)	peso de muestra	LEY g/Ton	PROMEDIO
IMET-1	0,952	10	9,5	0,025	31,000	7,68	7,72
IMET-2	0,96	10	9,6	0,025	31,000	7,77	

### Apéndice 2

#### Resultado análisis DRX

 UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER LABORATORIO DE RAYOS X		Código: F-T-21 Versión: 03 Elaborado: 2023 Folio No.: ____	
<b>FORMATO INFORME DE RESULTADOS DE ANÁLISIS DRX</b>			
<b>Fecha (aaaa-mm-aa)</b>	2023-11-30	<b>INFORME N°</b>	INF-23365-DRX
<b>DATOS DEL CLIENTE</b>			
<b>Empresa</b>	ESCUELA DE INGENIERIA QUÍMICA UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER		
<b>Nombre</b>	Jhon Freddy Palacios-UIS		
<b>Dirección</b>	Cra 27 con Novena Ciudadela Universitaria	<b>NIT o C.C</b>	901483435-0
<b>Ciudad</b>	Bucaramanga, Santander	<b>Orden de Compra</b>	
<b>e-mail</b>	jhon.palacios1@correo.uis.edu.co	<b>Teléfono</b>	3156272583
<b>TIPO DE ENSAYO</b>			
<b>Ensayo</b>	DRX-06	Registro de datos por Difracción de Rayos X para análisis cualitativo y cuantitativo	
<b>Observaciones</b>	Registro de datos de una (1) muestra.		

METODOLOGÍA DE TRABAJO			
Condiciones de Registro	El registro de datos se realizó en un difractómetro de polvo marca BRUKER modelo D8 ADVANCE con Geometría DaVinci bajo las siguientes condiciones:		
	Voltaje (kV)		40
	Corriente (mA)		40
	Rendija de Divergencia (mm)		0,6
	Rendijas Soller Primario (°)		2,5
	Rendijas Soller Secundario (°)		2,5
	Tamaño de Paso (° 2Theta)		0,02035
	Tiempo por paso (s)		0,6
	Rango de registro (° 2 Theta)		4,0 a 70,0
	Radiación		CuK $\alpha$ 1
	Filtro		Níquel
	Uso de Anti-dispersor de Aire		Si
	Detector		Lineal LynxEye
	Tipo de barrido		A pasos
Observaciones		Ninguna	
TOMA Y ANÁLISIS DE DATOS			
Fecha de Recepción de las Muestras (aaaa-mm-dd)	2023-11-21	Fecha de Registro (aaaa-mm-dd)	2023-11-23
Tipo de Muestras	Inorgánica	Fecha de finalización de análisis (aaaa-mm-dd)	N/A
RESULTADOS OBTENIDOS			
Se anexan en archivos .raw y .xy, el registro por DRX de la muestra 23-1351			

Código interno de laboratorio	Referencia cliente	Descripción o Clasificación Preliminar de la muestra
23-1351	IMET 1-2-3	Muestra procedente del departamento de arauca con contenido de oro y plata con posibilidad de contener otros elementos adicionales
OBSERVACIONES		
Los resultados se relacionan únicamente a los especímenes de las muestras analizadas.		
Si desea expresar su percepción con respecto al presente servicio o ensayo, hágalo por medio del correo electrónico <a href="mailto:calidadrx@uis.edu.co">calidadrx@uis.edu.co</a> al PBX: (57-7) 6344000 extensión: 3512.		
No se debe reproducir el informe de ensayo excepto en su totalidad, sin la aprobación escrita del laboratorio		
Atentamente:		
Analizó y Elaboró	Revisó	Aprobó
		
Diego Fernando Hernández Pardo Supervisor Área de Materiales Laboratorio de Rayos X MSc. Ingeniería de Materiales SN231-69869	José Antonio Henao Martínez Director Laboratorio de Rayos X PhD-MSc -Químico PQ-0321	José Antonio Henao Martínez Director Laboratorio de Rayos X PhD-MSc -Químico PQ-0321
COPIA CONTROLADA		

## Apéndice 3

## Resultado análisis DRX #2



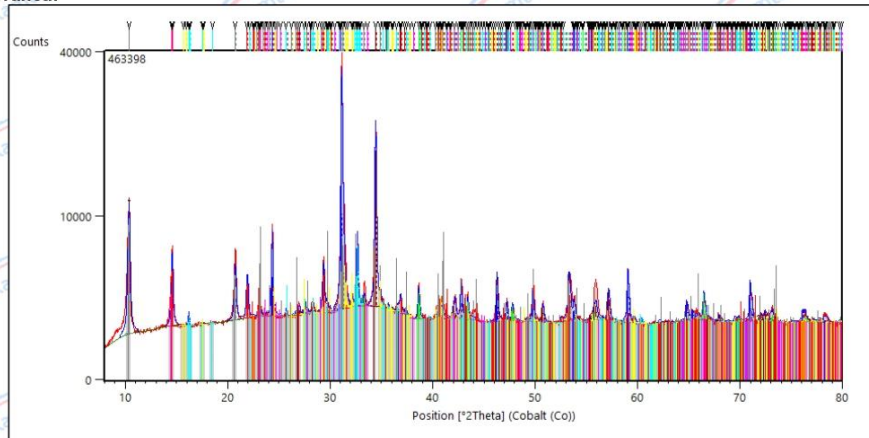
Reporte de Ensayo No.:463.399 DRX - V1

### REPORTE DE RESULTADOS DE ENSAYO POR DIFRACCIÓN DE RAYOS X

ID interno: 463.398  
 ID cliente\*: Mineral auro argentífero  
 Material\*: Geológico minero  
 Fecha de análisis: 2024-04-11

Compuesto	Fórmula Química	%
Quartz	SiO <sub>2</sub>	48.8
Pyrite	FeS <sub>2</sub>	4.9
Muscovite	KAl <sub>2</sub> (Si <sub>3</sub> Al)O <sub>10</sub> (OH,F) <sub>2</sub>	19.8
Calcite	CaCO <sub>3</sub>	9.1
Albite	NaAlSi <sub>3</sub> O <sub>8</sub>	6.7
Kaolinite	Al <sub>2</sub> Si <sub>2</sub> O <sub>5</sub> (OH) <sub>4</sub>	0.9
Orthoclase	KAlSi <sub>3</sub> O <sub>8</sub>	3.5
Chlorite	Mg <sub>9.17</sub> Fe <sub>1.02</sub> Al <sub>3.46</sub> Si <sub>6.35</sub> O <sub>36.00</sub>	6.3

## Gráfica:



## Método:

- Preparación de muestra: Pastilla prensada
- Ensayo: ME-09 - Cuantificación de fases minerales por DRX - Método Rietveld.  
Análisis cuantitativo de fases mineralógicas por espectrometría de difracción de rayos X por método Rietveld.

## Notas:

1. En la muestra no se tuvo en cuenta la fase amorfa, por lo tanto, de presentarse, las fases identificadas pueden estar sobre estimadas.

\* Información suministrada por el cliente.

Tatiana  
 Milena  
 Bemal  
 Espinosa

## FIN DE REPORTE

Se prohíbe la reproducción parcial del presente Reporte, sin la aprobación escrita del laboratorio

## Apéndice 4

## Resultado análisis FRX



Reporte de Ensayo No.: 463.399 FRX - V1

**REPORTE DE RESULTADOS DE ENSAYO POR FLUORESCENCIA DE RAYOS X**

**ID interno:** 463.398  
**ID cliente\*:** Mineral auro argentífero  
**Material\*:** Geológico minero  
**Fecha de análisis:** 2024-04-11

Analito	%
SiO <sub>2</sub>	52.42
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	12.76
CaO	9.41
SO <sub>3</sub>	6.78
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	5.65
K <sub>2</sub> O	3.48
MgO	1.53
ZnO	1.03
Na <sub>2</sub> O	0.86
TiO <sub>2</sub>	0.40
MnO	0.22
PbO	0.13
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0.13
CuO	0.04
As <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.04
V <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0.03
ZrO <sub>2</sub>	0.02
Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.02
SrO	0.01
PPC	4.99
TOTAL	100

**Método:**

- Preparación de muestra: Perla fundida
- Ensayo: ME-07 - Análisis químico de materiales sólidos por FRX - UniQuant®  
Análisis cuantitativo de óxidos por espectrometría de fluorescencia de rayos X de dispersión de longitud de onda.

**Notas:**

1. PPC: Pérdidas por calcinación a 950 °C ± 25 °C durante una hora.
2. Los resultados se encuentran normalizados.

\* Información suministrada por el cliente.

Tatiana  
 Milena  
 Bernal  
 Espinosa  
 Firmado digitalmente por  
 Tatiana Milena  
 Bernal Espinosa  
 Fecha: 2024.04.11  
 15:30:54 -05'00'

**FIN DE REPORTE**

Se prohíbe la reproducción parcial del presente Reporte, sin la aprobación escrita del laboratorio

## Apéndice 5

*Información de las muestras de Espectrometría de Absorción Atómica*

INFORMACIÓN DE LA(S) MUESTRA(S)			
TIPO DE MUESTRA	APTA O NO APTA PARA ANÁLISIS	IDENTIFICACIÓN EXTERNA	IDENTIFICACIÓN INTERNA
Líquida	Apta	Mineral Cabeza #1 cianurado	G-133-O-24
Líquida	Apta	Mineral cabeza #2 cianurado	G-134-O-24
Líquida	Apta	Concentrado #1 cianurado	G-135-O-24
Líquida	Apta	Concentrado #2 cianurado	G-136-O-24
<b>FECHA DE RECEPCIÓN:</b> 04/07/2024	<b>RESPONSABLE DE LA RECEPCIÓN:</b> Viviana Rojas / Coordinadora de Calidad del Laboratorio		<b>RESPONSABLE DEL MUESTREO:</b> ---
<b>FECHA DEL MUESTREO:</b> ---	<b>LUGAR Y PUNTO DEL MUESTREO:</b> Muestra traída al laboratorio	<b>FECHA REALIZACIÓN ENSAYO(S):</b> 04/07/2024 hasta 10/07/2024	
METODOLOGÍA Y MÉTODO UTILIZADO			
<p><b>Método Metales:</b> La muestra fue analizada por Espectrofotometría de Absorción Atómica empleando patrones certificados marca CertiPUR® de Merck.</p> <p>Digestión: Agua regia Lecturas: Estándar Métodos SM 3111 B [Au, Ag]</p>			
LÍMITE DE CUANTIFICACIÓN			
[Au]: 0,25 mg/L [Ag]: 0,50 mg/L			
EQUIPOS UTILIZADOS			
ESPECTROFOTÓMETRO DE ABSORCIÓN ATÓMICA AGILENT SPECTRAA 240 S			

**Apéndice 6***Resultados de Espectrometría de Absorción Atómica*

RESULTADOS		
Muestra	Oro mg Au/L	Plata mg Ag/L
Mineral Cabeza #1 cianurado	5,25	3,56
Mineral cabeza #2 cianurado	5,30	3,42
Concentrado #1 cianurado	5,32	5,22
Concentrado #2 cianurado	5,36	5,03

**Apéndice 7***Veta de mineral de Arauca*

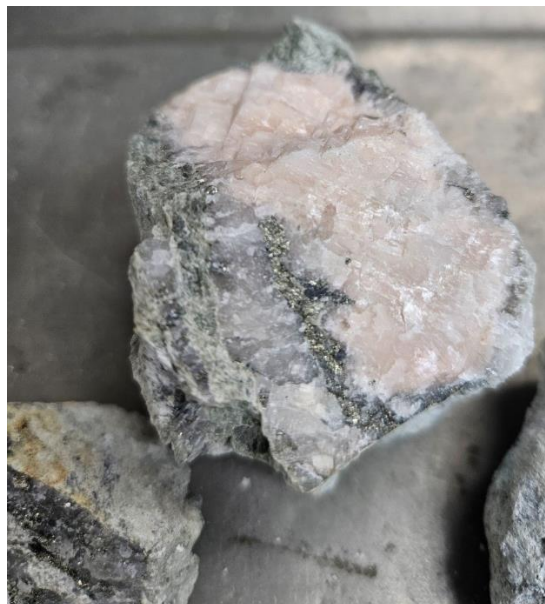
## Apéndice 8

*Trituradora GIMBA*



## Apéndice 9

*Apariencia mineral sin conminución*



**Apéndice 10**

*Mineral de estudio*



**Apéndice 11**

*Molino anillos GIMBA*



**Apéndice 12**

*Mineral triturado por anillos*



**Apéndice 13**

*Tamizadora GIMBA*



## Apéndice 14

*Materiales para flux ensayo al fuego*



## Apéndice 15

*Mezcla flux*



**Apéndice 16**

*Etapa copelación*



**Apéndice 17**

*Escoria y régulo*



**Apéndice 18**

*Régulo en los crisoles calcinando*



**Apéndice 19**

*Doré ensayo al fuego*



**Apéndice 20**

*Doré moldeado*



**Apéndice 21**

*Soluciones para partición con ácido nítrico*



**Apéndice 22**

*Mesa Wilfley*



**Apéndice 23**

*Frecuencia de trabajo mesa Wilfley*



**Apéndice 24**

*Ángulo de la mesa*



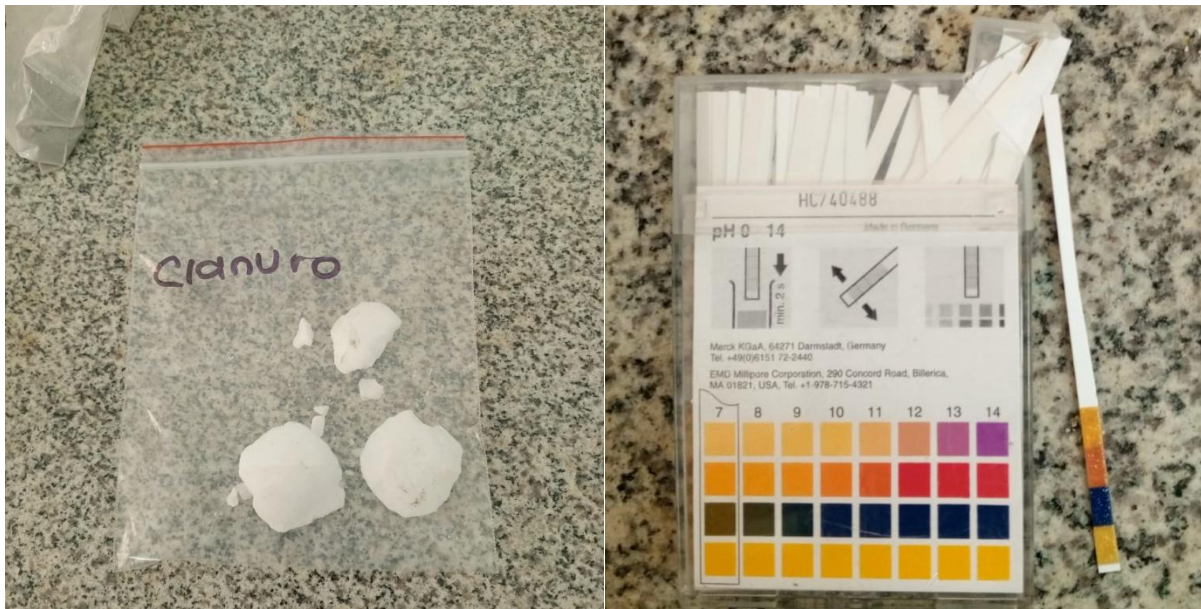
**Apéndice 25**

*Concentrados del mineral*



**Apéndice 26**

*Cianuro y medidores de pH*



**Apéndice 27**

*Etapas de cianuración*



**Apéndice 28**

*Filtración para obtener lixiviado*

