Diseño de una planta de beneficio de minerales auríferos para las minas Cálamo y Manantial ubicadas en el municipio de San Roque, Antioquia.

Laura Alejandra García Lerma, Steffany Monsalve Barragán

Trabajo de Grado para Optar al Título de Ingeniero Metalúrgico

Director

Walter Pardavé Livia

Magister en Ingeniería Metalúrgica

Universidad Industrial de Santander

Facultad de Ingenierías fisicoquímicas

Escuela de Ingeniería Metalúrgica y Ciencia de Materiales

Ingeniería Metalúrgica

Bucaramanga

2024

Dedicatoria

Primero doy gracias a Dios por cada prueba, lección, enseñanza y bendiciones que me ha dado a lo largo de mi vida.

A mi madre Luz Dallanara Lerma que amo con todo mi corazón, me ha acompañado en cada paso, apoyado y animado a luchar por lo que quiero, ella siempre tiene una palabra de amor y aliento para mí y nunca ha dejado de decirme lo orgullosa que se siente de mí.

A todos mis compañeros y amigos que conocí en la universidad con los cuales compartí excelentes momentos, en especial a María Paula Galán y Milton Ballen quienes siempre han creído y confiado en mí, finalmente a mi compañera de tesis Steffany Monsalve con la cual compartí buenos y malos momentos, alegrías y tristezas. Para todos muchas gracias, las mejores energías y vibras.

A cada profesor de la Escuela de Ingeniería Metalúrgica y Ciencia de los Materiales por guiarme en este proceso de aprendizaje, a la profesora Ana Emilse Coy que hizo de mi primera experiencia con la Metalurgia algo increíble, al profesor Sergio Blanco por siempre tener palabras de apoyo, al profesor Pedro por enseñar con tanto amor y dedicación y finalmente al profesor Walter Pardavé por ser un excelente director de tesis, guiarnos a lo largo de este proyecto, confiar en nosotras y apoyarnos.

"Laura Alejandra García Lerma"

Dedicatoria

A mi madre quien ha hecho presencia a lo largo de este viaje. A mis hermanas que han sido una fuente de aliento y de inspiración a lo largo de este camino.

A mis compañeros con quienes he compartido gratos momentos y me han demostrado el valor de la amistad, en especial a Jimena Durán, Brayan Uribe y Alejandra García.

A cada uno de los docentes que con su dedicación, esfuerzo y trabajo sirven de inspiración; Especialmente a la Profesora Ana María y al Profesor Sergio Blanco quienes fueron un gran apoyo personal y académico en mi inicio laboral.

A Ternium SAS por confiar siempre en mi trabajo y brindarme la oportunidad de iniciar en el mundo laboral especialmente al Ingeniero Julián Granada y al Ingeniero César Cárdenas quienes siempre creyeron en mis capacidades

Finalmente, a mí por tener paciencia en los momentos de crisis, por no desistir de mi sueño.

"Steffany Monsalve Barragán"

Agradecimientos

Agradecemos a la Universidad Industrial de Santander por brindarnos la oportunidad de aprender, formarnos, crecer personal y profesionalmente, propiciando espacios de integración y enseñanza.

Un agradecimiento enorme al profesor Walter Pardavé Livia, director de tesis por su dedicación, apoyo, y humor, gracias por dirigirnos a lo largo de este proyecto sin su gran experiencia hubiese sido difícil.

Al técnico Javier por su apoyo en la etapa práctica de este proyecto.

Finalmente agradecemos al laboratorio de Nanotecnología de la Universidad Pontificia Bolivariana, seccional Bucaramanga por brindarnos el servicio para realizar las pruebas de SEM-EDX.

Tabla de Contenido

Pág.

Introducción 16

1. Objetivos 17

1.1 Objetivo General 17

1.2 Objetivos Específicos 17

2. Fundamentación Teórica 18

2.1 Caracterización mineralógica 19

2.1.1 Caracterización microscópica 19

2.1.2 Microscopia electrónica de barrido (SEM) 20

2.2 Liberación de minerales 20

2.3 Concentración gravimétrica 21

2.4 Hidrometalurgia 21

2.4.1 Cianuración por agitación 22

2.5 Diseño CAD 24

3. Metodología 24

3.1 Revisión bibliográfica 24

3.2 Muestreo del mineral 24

3.3 Caracterización química 25

3.4 Liberación de minerales 25

3.5 Caracterización física 27

3.6 Pruebas de concentración de mesa Wilfley 27

3.7 Prueba de cianuración por agitación 27

3.8 Balance de masa 28

3.9 Tratamiento de efluentes 29

3.10 Diseño de planta CAD 29

4. Resultados y discusión 29

4.1 Caracterización del mineral 29

4.1.1 Caracterización macroscópica 29

4.1.2 Microscopia óptica mineral de cabeza 30

4.1.3 SEM-EDX mineral de cabeza 31

4.2 Caracterización química 33

4.2.1 Tenores de oro y plata del mineral de cabeza 33

4.3 Caracterización granulométrica 34

4.4 Caracterización Física 36

4.4.1 Densidad aparente y gravedad especifica 36

4.5 Cianuración por agitación 37

4.5.1 Microscopia óptica mineral cianurado 40

4.5.2 SEM – EDX mineral cianurado 40

4.6 Balance de materia 42

4.7 Tratamiento de pasivos ambientales 46

4.8 Diseño de planta 46

4.9 Análisis de costos 51

5. Conclusiones 54

Recomendaciones 55

Referencias Bibliográficas 56

Apéndices..... 59

Lista de Tablas

Pág.

Tabla 1. *Tenores de oro y plata de mineral de cabeza* 33

Tabla 2. *Orden de tamices según ASTM E11.* 34

Tabla 3. *Datos para análisis granulométrico* 34

Tabla 4. *Tenores de oro y plata para pasante malla #50 y #70* 35

Tabla 5. *Datos para calcular la densidad aparente* 36

Tabla 6. *Datos obtenidos de la cianuración* 37

Tabla 7. *Grado de lixiaviabilidad de un mineral (La Brooya, S. R., et al 1994, T.,2000)* 39

Tabla 8. *Concepto y valor* 51

Tabla 9. *Tabla de costos de operación de planta de beneficio de 200 TPD*..... 52

Tabla 10. *Tabla de análisis general de Capex planta de beneficio de 200 TPD*..... 52

Tabla 11. *Tabla de análisis general de Opex de planta de beneficio de 200 TPD*..... 52

Lista de Figuras

Pág.

Figura 1. *Fases en el proceso hidrometalúrgico* 22

Figura 2. *Diagrama de Pourbaix para el sistema Au-CN-H2O a 25° para [Au]=10-4 M y [CN]=10-3 M (Hiskey y Atlury, 1988)* 23

Figura 3. *Etapas del proceso de reducción primaria* 26

Figura 4. *Mineral roca de las minas Cálamo y Manantial ubicadas en San Roque, Antioquía*... 30

Figura 5. *Micrografías de mineral cabeza a 400X y 900X* 31

Figura 6. *Micrografías obtenidas por SEM del mineral de cabeza a 200X y 500X* 32

Figura 7. *Espectro y composición elemental obtenido por EDX para el mineral de cabeza* 32

Figura 8. *Oro disuelto vs tiempo de cianuración*..... 39

Figura 9. *Micrografías del mineral cianurado a 600X y 900X*..... 40

Figura 10. *Micrografías por SEM del mineral cianurado a 200X* 41

Figura 11. *Espectro y composición elemental obtenido por EDX para el mineral cianurado*..... 41

Figura 12. *Balance de trituración para el beneficio de 200 TPD de mineral* 42

Figura 13. *Balance de molienda primaria para el beneficio de 200 TPD de mineral* 43

Figura 14. *Balance de concentración gravimétrica para el beneficio de 200 TPD de mineral* ... 43

Figura 15. *Balance de molienda secundaria para el beneficio de 200 TPD de mineral*..... 44

Figura 16. *Balance de cianuración en planta de 200 TPD de mineral* 44

Figura 17. *Balance del proceso de Merrill-Crowe para planta de 200 TPD*..... 45

Figura 18. *Balance de fundición para planta de 200 TPD.*..... 45

Figura 19. *Balance para tratamiento de efluente de mineral cianurado.*..... 46

Figura 20. *Diseño trituración de mineral* 47

Figura 21. *Diseño molienda de mineral* 48

Figura 22. *Diseño concentración gravimétrica* 49

Figura 23. *Diseño proceso de cianuración* 49

Figura 24. *Recuperación del mineral* 50

Figura 25. *Fundición* 50

Figura 27. *Recepción del mineral roca* 59

Figura 28. *Trituración manual* 59

Figura 29. *Trituración* 59

Figura 30. *Molienda* 59

Figura 31. *Concentración de mesa Wilfley* 60

Figura 32. *Concentración de mesa Wilfley* 60

Figura 33. *Concentrado obtenido de la mesa Wilfley para malla #50* 60

Figura 34. *Concentrado obtenido de la mesa Wilfley para malla #70* 60

Figura 35. *Colas obtenido de la mesa Wilfley para malla #50* 61

Figura 36. *Colas obtenido de la mesa Wilfley para malla #70* 61

Figura 37. *Medios obtenidos de la mesa Wilfley para malla #50* 61

Figura 38. *Medios obtenidos de la mesa Wilfley para malla #70* 61

Figura 39. *Cianuración por agitación malla #50* 62

Figura 40. *Cianuración por agitación malla #70* 62

Figura 41. *Filtración solución cianurada* 62

Figura 42. *Solución cianurada* 62

Figura 43. *Micrografía mineral cabeza a 134X* 63

Figura 44. *Micrografía mineral cabeza a 400X* 63

Figura 45. *Micrografía mineral cabeza a 600X*..... 63

Figura 46. *Micrografía mineral cabeza a 900X*..... 63

Figura 47. Micrografías obtenidas por SEM del mineral de cabeza a 200X 64

Figura 48. Micrografías obtenidas por SEM del mineral de cabeza a 500X 64

Figura 49. *Micrografías obtenidas por SEM del mineral de cabeza a 1000X* 64

Figura 50. *Composición química mineral de cabeza obtenida por EDX* 65

Figura 51. *Micrografía mineral cianurado a 134X* 66

Figura 52. *Micrografía mineral cianurado a 400X* 66

Figura 53. *Micrografía mineral cianurado a 600X* 66

Figura 54. *Micrografía mineral cianurado a 900X* 66

Figura 55. *Micrografías obtenidas por SEM del mineral cianurado a 500X*..... 67

Figura 56. *Micrografías obtenidas por SEM del mineral cianurado a 1000X*..... 67

Figura 57. *Composición química mineral de cianurado obtenida por EDX* 68

Lista de Apéndices

pág.

Apéndice A. Liberación de minerales 59

Apéndice B. Pruebas de concentración de mesa Wilfley 60

Apéndice C. Cianuración 62

Apéndice D. Microscopia mineral de cabeza 63

Apéndice E. SEM – EDX mineral de cabeza 64

Apéndice F. Microscopia mineral cianurado 66

Apéndice G. SEM – EDX mineral cianurado 67

Glosario

Cianuración: método analítico donde se estudia la disolución del oro y la plata en un medio acuoso.

Lixiviación: Proceso mediante el cual se extrae un soluto de un sólido, mediante la utilización de un disolvente líquido

Mesa Wilfley: Dispositivo de concentración gravimétrica que separa un mineral en base a su densidad

Mineral: sustancia inorgánica que se halla en la superficie o en las diversas capas de la corteza terrestre y que contiene características fisicoquímicas particulares

Veta: depósito mineral que se rellena una antigua grieta de rocas de un terreno.

Resumen

Título: Diseño de una planta de beneficio de minerales auríferos para las minas Cálamo y Manantial ubicadas en el municipio de San Roque, Antioquia. [*]

Autor: Laura Alejandra García Lerma, Steffany Monsalve Barragán[**]

Palabras Clave: Beneficio de minerales, Mesa Wilfley, Oro, Diseño CAD

Descripción

En el presente proyecto se diseñó una planta de tratamiento de mineral aurífero proveniente del departamento de Antioquia, Para ello se realizó una caracterización del mineral a través de pruebas físicas y químicas como ensayo al fuego, análisis granulométricos con el fin de determinar la composición del mineral; Además se realizó la caracterización granulométrica utilizando la mesa Wilfley donde posteriormente se obtuvo tenores de 24,08 g/Ton de oro. Teniendo en cuenta este tenor de oro se procedió a realizar pruebas de cianuración por agitación con el fin de realizar un aprovechamiento mayor del mineral, así mismo se realizó un proceso de lixiviación y diagnóstico lo que arrojó que el mineral procedente de esta zona que es difícilmente lixiviable.

Teniendo en cuenta los resultados de las pruebas se realizó un diseño CAD 3D donde se plantea esquemática y específicamente cada uno de los procesos de extracción junto con la capacidad que se requiere para la extracción de 200TPD. Finalmente se proponen métodos de recuperación del mineral y los posibles usos que se le dan al mismo, esto con el fin de no generar desechos tóxicos.

---

[*] Trabajo de grado

[**] Facultad de Fisicoquímicas. Escuela de Ingeniería Metalúrgica y Ciencia de los Materiales. Ingeniería Metalúrgica. Director: Walter Pardave Livia. Magister de Ingeniería Metalúrgica.

Abstract

Title: Design of a gold minerals beneficiation plant for the Cálamo and Manantial mines located in the town of San Roque, Antioquia.[*]

Author(s): Laura Alejandra García Lerma, Steffany Monsalve Barragán[**]

Key Words: Minerals beneficiation, Wilfley Table, Gold, CAD Design

Description

In this project a treatment plant for gold ore from the department of Antioquia was designed. For this purpose, a characterization of the ore was carried out through physical and chemical tests such as fire test, granulometric analysis in order to determine the composition of the gold; in addition, the granulometric characterization was carried out using the Wilfley table where higher tenors of 24.08 g/Ton of gold were obtained. Taking into account this gold content, agitation cyanidation tests were carried out in order to make a better use of the mineral. A leaching process and diagnosis was also carried out, which showed that the ore coming from this area is difficult to leach.

Taking into account the results of the tests, a 3D CAD design was made where each one of the extraction processes is schematically and specifically proposed, together with the capacity required for the extraction of 200TPD. Finally, mineral recovery methods and possible uses for the mineral are proposed in order to avoid generating toxic waste.

[*] Bachelor Thesis

[**] Facultad de Fisicoquímicas. Escuela de Ingeniería Metalúrgica y Ciencia de los Materiales. Ingeniería Metalúrgica. Director: Walter Pardave Livia. Magister de Ingeniería Metalúrgica.

Introducción

La extracción y procesamiento de minerales auríferos ha desempeñado un papel importante en la economía colombiana contribuyendo al desarrollo del país, según cifras de la (Agencia Nacional de Minería (ANM), 2023) en el territorio nacional hay 9602 títulos mineros vigentes, de los cuales 1996 corresponden a títulos de minería aurífera, estos depósitos de oro se distribuyen en departamentos asociados a cinturones metalogénicos como lo son Santander, Tolima, Huila, Caldas, Nariño, Cauca, Bolívar y Antioquia.

Según datos reportados por la (Asociación Colombiana de minería (ACM), 2023) en este mismo año se produjeron 250.769 onzas de oro, consolidándolo como uno de los principales productos de exportación del país, lo que requiere mejorar la extracción y beneficio para maximizar el rendimiento económico y cumplir con las regulaciones ambientales.

Una de las zonas con gran potencial aurífero es San Roque, ubicado sobre la cordillera central en el departamento de Antioquia, esta región se beneficia de una geología favorable caracterizada por la presencia de rocas con alto contenido de oro. La explotación aurífera en San Roque se caracteriza por la coexistencia de la minería artesanal y la actividad a gran escala. La primera, practicada por familias durante generaciones, aporta un importante valor cultural a la región. La segunda, impulsada por empresas mineras, ha elevado significativamente la producción de oro en los últimos años.

Sin embargo, muchos de estos minerales no se recuperan de forma óptima. Para enfrentar este desafío y aumentar la producción de las minas Cálamo y Manantial ubicadas en dicha zona, se propone el diseño de una planta de beneficio de minerales que cumpla con los estándares del código minero colombiano.

1. Objetivos

1.1 Objetivo General

Diseñar una planta de beneficio de minerales auríferos provenientes de la zona minera de San Roque, Antioquia, con una capacidad de producción diaria a 200 toneladas.

1.2 Objetivos Específicos

Caracterizar física, química, mineralógica, microscópica y granulométricamente los minerales auríferos.

Proponer un esquema o flujograma de beneficio que incluya tratamiento de efluentes aurocianurados generados en el beneficio del mineral.

Diseñar la planta de beneficio de minerales con capacidad de 200 TPD, que incluya equipos principales, variables, áreas y equipos auxiliares, y estimativo de costos de planta.

Sugerir posibles alternativas para el aprovechamiento de los pasivos ambientales generados.

2. Fundamentación Teórica

Colombia cuenta con una gran diversidad de recursos minerales debido a su ubicación geográfica, los procesos geológicos que formaron cordilleras, valles y costas favorecieron la creación de depósitos minerales de oro, plata, cobre, carbón y petróleo. (ANM, 2023) afirma que "el país posee una extensión territorial de 114 millones de hectáreas de las cuales solo el 5% están tituladas y autorizadas para realizar actividad minera, el 2.3% se encuentra en la etapa de exploración, 1.6% en construcción y 1.1% en explotación", entre los departamentos con mayor producción de oro y títulos mineros se encuentra Antioquia, Bolívar, Cauca, valle del cauca y Santanderes.

Según el (Departamento Administrativo Nacional de Estadistica (DANE), 2024) la minería de oro en Colombia es una de las principales fuentes de ingresos ya que aporta el 3.8% al PIB, representando el 80% de la economía en los municipios mineros, generando empleo en cada etapa de la cadena productiva, desde la exploración, extracción, procesamiento y comercialización del oro. Adicional a ello, la (ANM, 2023) registró que en el 2023 se generaron 20.387 millones de dólares en las exportaciones de los diferentes minerales entre los que se encuentra el oro, siendo los compradores principales países como Estados Unidos e Italia.

Una de las regiones con mayor actividad minera es San Roque, en el departamento de Antioquia, este municipio está en la cordillera de los Andes, influenciada por la orogenia andina, un proceso geológico que ha llevado a la formación de montañas y a la concentración de minerales en la región, que cuentan con granitos, dioritas, gabros y cuarcitas que ayudan a la formación de yacimientos auríferos que pueden ser aluviales o vetas. En este último, el oro se deposita en fisuras y venas dentro de los diferentes minerales presentes como la pirita, calcopirita y cuarzo.

Para llevar a cabo la extracción minera se deben realizar estudios previos tales como de suelos, geológicos, antropológicos, conectividad de la fauna, sociales, entre otros. Si la extracción es subterránea se usa maquinaria especializada para cavar túneles, pozos y galerías, una vez obtenido el mineral se beneficia de este, este proceso consiste en separar la mena de la ganga. Inicialmente se realizan lavados para elimina el lodo y material orgánico presente, seguido se tritura para disminuir el tamaño de la roca, luego se separan los diferentes minerales presentes, para ello se emplean métodos de separación físicos, químicos y/o magnéticos dependiendo de la naturaleza de estos. Posteriormente se realiza una transformación por vía hidrometalúrgica en donde se busca lixiviar el mineral con ayuda de reactivos para que el oro se disuelva y finalmente sea precipitado.

No todos los minerales poseen las mismas características mineralógicas, por lo que es importante realizar pruebas para suministrar información de propiedades fisicoquímicas, morfológicas y de pureza. A partir de la información se realizaron los estudios requeridos para hallar la cantidad de mineral de interés de la mena.

2.1 Caracterización mineralógica

Suministra información de los minerales a estudiar y sus propiedades. (Servicio Geológico Colombiano, 2010), para ello se usan las diferentes técnicas de caracterización cuantitativas y/o cualitativas, dependiente de lo que se quiere hallar.

2.1.1 Caracterización microscópica

Permite identificar los minerales mediante el uso del microscopio, distinguiendo por su color sulfuros, óxidos, silicatos y otros minerales relacionados.

2.1.2 Microscopia electrónica de barrido (SEM)

Es una técnica que permite conocer la composición química de lo que constituye la muestra de mineral a través de un haz de electrones que atraviesa la pieza lo que genera una mayor resolución a elevados aumentos. (UAM Manuel Pozo Rodríguez).

2.2 Liberación de minerales

Se emplea con el propósito de separar el mineral de interés de la ganga o de las impurezas; Este proceso de realiza a través de técnicas como trituración y molienda que buscan reducir el tamaño de partícula y aumentar la superficie del contacto del mineral para su posterior análisis.

Durante la etapa de trituración, se busca reducir el tamaño de las partículas utilizando una trituradora de mandíbulas, Esta máquina genera un movimiento oscilatorio en la placa de trituración y combinado con la presión que, aplicada sobre los minerales al hacerlos chocar con las paredes internas de la trituradora, provoca la fragmentación de las partículas, logrando así la reducción de tamaño deseado (Quimi net 2024). Este proceso se realiza por vía seca ya que facilita la selección del material reducido sin producir finos. el proceso de molienda se liberan partículas como sulfuros, óxidos, silicatos, oro o grupos de partículas asociadas entre sí donde se emplean cuerpos moledores que se deslizan por el molino y fracturan el agregado del mineral original de manera que los minerales se comporten de acuerdo con su identidad mineralógica. (Servicio geológico colombiano, 2010).

El análisis granulométrico se realiza con el fin de conocer el avance de la reducción de tamaño de las partículas, así como el planteamiento, seguimiento y control en el procesamiento del mineral de estudio mediante una serie de tamices donde el material pasa a través de mallas lo que produce la selección adecuada del tamaño de partículas por medio de una la vibración producida por Rop-tap. (Servicio Geológico Colombiano, 2010).

2.3 Concentración gravimétrica

La concentración gravimétrica es un método para la separación de minerales de acuerdo con su densidad; este método se aplica en una mesa Wilfley la cual divide el mineral colocado en 3 grupos: concentrado, medios y ganga gracias al movimiento relativo y a las fuerzas gravitacionales.

Para que la separación sea eficiente, hay que considerar la diferencia de densidad entre el mineral de interés y la ganga. Teniendo en cuenta el criterio de la concentración que se aplica en el proceso, se tiene en cuenta la ecuación 1:

$$\rho = \frac{\rho_h - \rho_f}{\rho_l - \rho_f}$$

Ecuación 1. *Función de distribución Gaudin Schumann*

Donde:

$$\rho_h = Densidad\ relativa\ del\ mineral\ pesado$$

$$\rho_f = Densidad\ relativa\ del\ ineral\ ligero$$

$$\rho_l = Densidad\ relativa\ del\ medio\ fluido$$

La eficiencia del ensayo varía de acuerdo con las características del mineral y parámetros de la mesa como lo son el caudal de agua, frecuencia del movimiento, amplitud del recorrido y grado de inclinación. (Universidad de Sonora (UNISON), 2020).

2.4 Hidrometalurgia

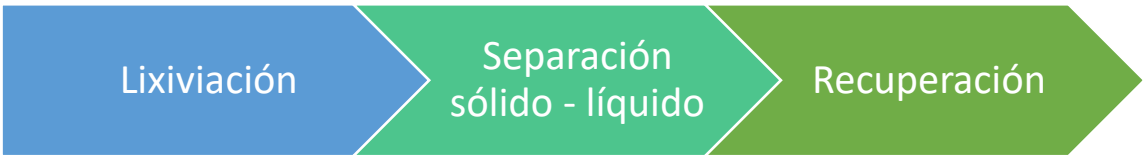
Se define como la extracción de mineral mediante métodos físicos o químicos en ambientes acuosos a través de 3 etapas principales que ocurren dentro del proceso, las cuales se observan en la figura 1. La primera es la etapa de lixiviación donde se encuentra una disolución selectiva de

los metales de interés que contiene el mineral en el medio acuoso el cual contiene los reactivos modificadores necesarios y el agente lixiviante el cual se encarga de realizar la disolución a través de las reacciones de oxido reducción. (Gaviria, Restrepo, & Bustamante, 2007).

En la segunda etapa se realiza una separación sólido líquido mediante procesos como decantación, filtración, sedimentación, evaporación, entre otros, eligiendo el que más se adapte a la mezcla; al hacer esto, se obtiene una solución enriquecida con los metales disueltos que luego pasa a la tercera etapa, recuperación selectiva donde se le da paso a otros procesos metalúrgicos para la obtención final del metal de interés y un sólido al cual se debe neutralizar los reactivos que contenga para que estos no afecten el entorno.

Figura 1.

Fases en el proceso hidrometalúrgico



2.4.1 Cianuración por agitación

La cianuración se fundamenta en la afinidad del cianuro de potasio o sodio por las partículas de oro metálico, este proceso se describe mediante la ecuación 2, la cual fue propuesta por Elsner (1846) y Bodlander (1896). Durante el proceso de lixiviación, el mineral con tamaño menor a 75µm se agita en la solución alcalina diluida de cianuro durante periodos que van de 8 a 96 horas.

$$2Au^0 + 4CN^- + O_2 + 2H_2O \rightarrow H_2O_2 + 2HO^- + 2Au(CN)_2^-$$

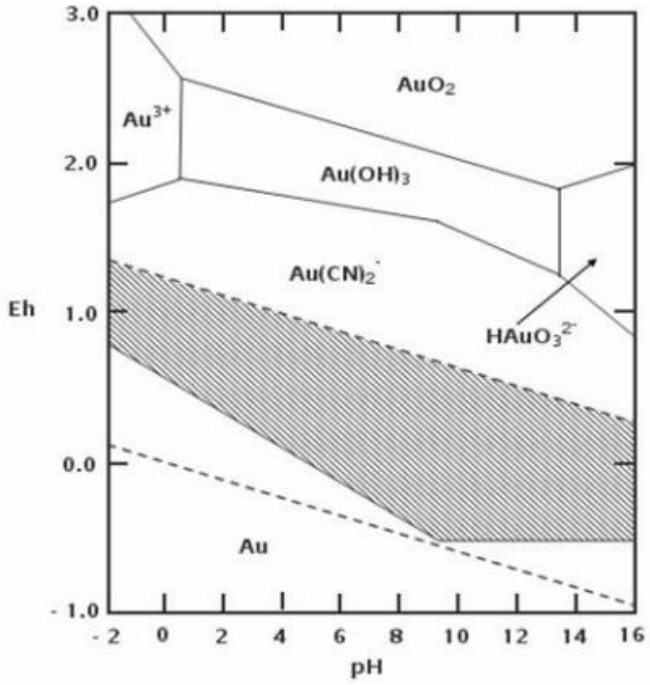
Ecuación 2. *Ecuación de ELSNER*

El pH de la solución juega un papel muy importante tanto para la lixiviación ya que neutraliza los compuestos ácidos contenidos en el mineral, como para la seguridad de las personas que lo realicen debido a que a pH ácidos se lleva a cabo la hidrolisis del ion cianuro el cual es altamente toxico.

Para ello se usa el diagrama de Pourbaix para el sistema $Au - CN - H_2O$ mostrado en la figura 2, allí se observa el pH y potencial al cual se estabiliza el ion complejo $Au(CN)_2^-$.

Figura 2.

Diagrama de Pourbaix para el sistema Au-CN-H2O a 25° para [Au]=10-4 M y [CN]=10-3 M (Hiskey y Atlury, 1988)



2.5 Diseño CAD

El Diseño asistido por computador (CAD) es una herramienta que agiliza el proceso de diseño de sólidos 2D y 3D, ya que permite crear, modificar, cambiar y tener precisión de los dibujos que se realiza, así misma mejora la "obtención una documentación más sólida y sencilla del diseño, que incluye geometría, dimensiones y listas de materiales".

3. Metodología

Para cumplir con los objetivos propuestos en el presente proyecto se realizó una revisión bibliográfica de los temas relacionados con la caracterización, concentración, cianuración y diseño de la planta además las actividades realizadas las cuales se nombran en el siguiente esquema:

3.1 Revisión bibliográfica

Se realizó la revisión bibliográfica en bases de datos de acceso libre como Science direct y Nature, así como libros, proyectos basados en diseños de plantas anteriormente realizados en la universidad y de manera externa en otras instituciones aplicados dentro de zonas mineras del país y de la región andina.

3.2 Muestreo del mineral

Para llevar a cabo el presente proyecto, se trabajó con 100kg de mineral aurífero de cabeza el cual se recibió como mineral roca, es decir sin realizarle procesos de conminución. Dicho mineral proviene de las minas Cálamo y manantial ubicadas en el municipio de San Roque, Antioquia.

Para conocer las especies asociadas se tomó 2g del mineral de cabeza, las cuales se llevaron al estereoscopio marca Olympus Japan SZ61 ubicado en el laboratorio de microscopia de la

Universidad Industrial de Santander, estas fueron observadas a aumentos de 0.67 (134X), 2 (400X), (600X) y 4.5 (900X) respectivamente. Adicionalmente se analizó por medio de las técnicas de espectroscopia de dispersión de energía de rayos X (EDX) la cual permite conocer la composición química y microscopia electrónica de barrido (SEM) que proporciona una imagen de los componentes, identificando la forma, tamaño y distribución de fases, los aumentos usados para observar el mineral fueron 200X, 500X, 1000X, estas pruebas se realizaron usando los equipos SEM marca TESCAN, modelo Mira 3 FEG y el detector de rayos x para EDS marca BRUKER alineado con el software SPRIT 2.0, estos ensayos se llevaron a cabo en el laboratorio de nanotecnología de la Universidad Pontificia Bolivariana seccional Bucaramanga.

3.3 Caracterización química

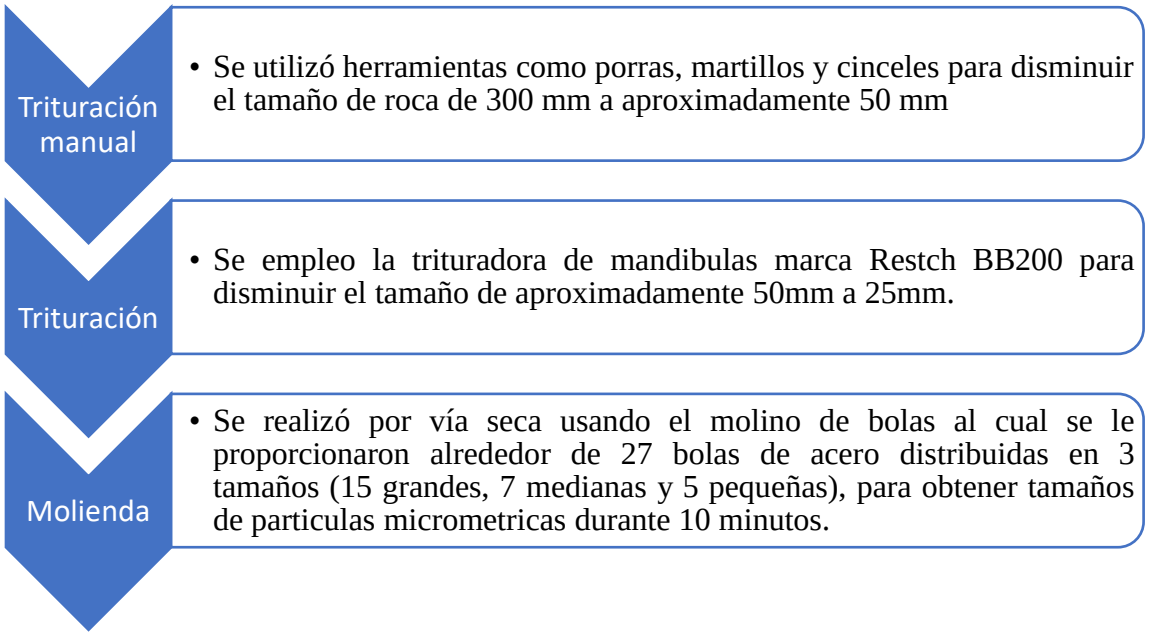
Para conocer los tenores de oro y plata del mineral, se tomó tres muestras de 50g, la primera del mineral de cabeza, la segunda del concentrado pasante malla #50 y la tercera del concentrado malla #70, realizando previamente cuarteos para asegurar que sean muestras representativas, posteriormente se realizó tres veces ensayo al fuego a cada una para que los resultados fueran representativos, cumpliendo con la norma ASTM E 400-02.

3.4 Liberación de minerales

Para llevar a cabo el proceso de conminución se trabajó en 3 etapas: muestreo manual, trituración y molienda, tal como se muestra en la figura 3.

Figura 3.

Etapas del proceso de reducción primaria



La medición de la distribución de tamaño de partículas se realizó empleando la técnica de cono y cuarteo con el fin de obtener una muestra representativa del mineral la cual se trabajó bajo la norma ASTM C136. Seguido se usó la máquina Ro-Tap con tamices malla # 20, 50, 70 en un tiempo estimado de 10 minutos, esto se realizó con el fin de tamizar la muestra para realizar la distribución granulométrica.

El análisis de distribución granulométrica se realizó 8 veces en un tiempo de 10 minutos cada una a una muestra de 245g, obtenida luego de realizar cuatro cuarteos a la muestra inicial de 3240g, para garantizar que la muestra sea representativa, luego de ello se pasó al Ro-tap ubicando tamices según la norma ASTM E11-17. Este proceso se muestra en el apéndice A.

Finalmente, el mineral pasante malla #50 y #70 se sometieron nuevamente a ensayo al fuego para comparar el contenido del oro y plata a menor tamaño.

3.5 Caracterización física

Se realizó el cálculo de densidad aparente bajo los parámetros de la norma ASTM D2346-21, para ello se usaron tres picnómetros de 50ml, los cuales se llenaron con agua destilada, las muestras usadas fueron de 3g, 4g y 5g respectivamente.

3.6 Pruebas de concentración de mesa Wilfley

El proceso se realizó para separar el mineral, considerando la diferencia de densidad de las partículas contenidas. El equipo usado fue la mesa concentradora marca Holman-Wilfley modelo 800, ubicada en el laboratorio de beneficio de minerales, el montaje se muestra en el apéndice B. El tamaño de los minerales de prueba fue de 300 micras (malla # 50) y 212 micras (malla # 70), se ubicaron los rifles de la mesa con el fin de recoger el concentrado, los medios y las colas respectivamente. Las constantes de trabajo fueron el caudal de agua de lavado con 0.055 L/s para malla #50 y 0.04 L/s para malla #70, ángulo de inclinación de la mesa 7°, frecuencia de sacudida de la mesa máximo (100Hz) y la alimentación del mineral 100g/min.

El mineral obtenido se separó en concentrado, medios y colas, se introdujo al horno de secado a 100°C por 12 horas, finalmente se pesó. Disponiendo el concentrado para hacer ensayo al fuego y los mixtos para cianuración por agitación.

3.7 Prueba de cianuración por agitación

Esta prueba se le realizó al mineral correspondiente a los mixtos producto del proceso de mesa Wilfley, para ello se obtuvieron dos muestras de con el fin de hallar la cantidad de oro procedente de los mixtos y colas. Se procedió a realizar el montaje como se muestra en el apéndice c, teniendo en cuenta las siguientes condiciones:

- Masa del mineral: 500gr de malla #50 y #70 respectivamente
- Volumen de solución: 1 L

- Concentración de cianuro: 0.7 g/L

-Cal: 8 g

- pH: 10.5 -11.0

- Tiempo total: 8 horas

Para llevar un control de la velocidad de disolución de oro, se tomó 1 alícuota de 20ml cada 2 horas, este volumen se iba reponiendo para mantener las condiciones iniciales. Por otro lado, para asegurar que el pH de la solución se mantuviera alcalino, con ayuda del pH metro se media el pH cada 2 horas, en caso de variar se adicionaba 3g de cal para neutralizar la solución

Una vez pasadas las 8 horas, se filtró la solución separando el sólido del líquido, se midió el volumen y se dejó secar el sólido a la temperatura ambiente para posteriormente realizar pruebas de microscopia óptica usando el estereoscopio marca Olympus Japan SZ61 ubicado en el laboratorio de microscopia, estas fueron observadas a aumentos de 0.67 (134X), 2 (400X), (600X) y 4.5 (900X) respectivamente, adicionalmente se realizó pruebas SEM y EDX, los aumentos a los cuales se observó el mineral fueron 200X, 500X, 1000X respectivamente. Los equipos usados para SEM son marca TESCAN, modelo Mira 3 FEG y el detector de rayos x para EDS marca BRUKER alineado con el software SPRIT 2.0, estos ensayos se llevaron a cabo en el laboratorio de nanotecnología de la Universidad Pontificia Bolivariana seccional Bucaramanga.

3.8 Balance de masa

Se realizó el balance de masa teniendo en cuenta los datos obtenidos en la etapa de beneficio de minerales e hidrometalurgia para la recuperación de oro, considerando perdida de mineral por volatilización, transporte, almacenamiento, etc.

3.9 Tratamiento de efluentes

Una vez terminado el proceso de cianuración, la solución se filtra y el sólido se seca a temperatura ambiente; acto seguido se realiza el tratamiento de efluentes aurocianurados a través del proceso de Merrill Crowe con el fin de obtener un lodo, el cual se funde y la solución remanente de este proceso se mezcla con sulfato ferroso ($FeSO_4$) para eliminar las impurezas; adicional el lodo se filtra para obtener una solución clarificada que se envía a corriente de agua, el sólido restante es utilizado como materia prima en proceso de elaboración de pinturas.

3.10 Diseño de planta CAD

Al obtener los datos necesarios, se procedió a realizar el diseño de la planta de tratamiento la cual consta de seis (6) secciones distribuidas de acuerdo con la capacidad: Trituración, molienda, concentración gravimétrica en mesas tipo Wilfley, cianuración, precipitación del mineral y tratamiento de relave. El plano de esta planta se realizó con ayuda del programa Auto CAD 3D teniendo como base los diseños de balance de masa, así como la ubicación geográfica de la zona.

4. Resultados y discusión

A continuación, se detallan los resultados obtenidos, así como su análisis correspondiente.

4.1 Caracterización del mineral

Para realizar la caracterización mineralógica del mineral de cabeza se realizaron diferentes pruebas que permitieran conocer su composición química, la pureza de oro y contenido de otros elementos presentes en el mineral.

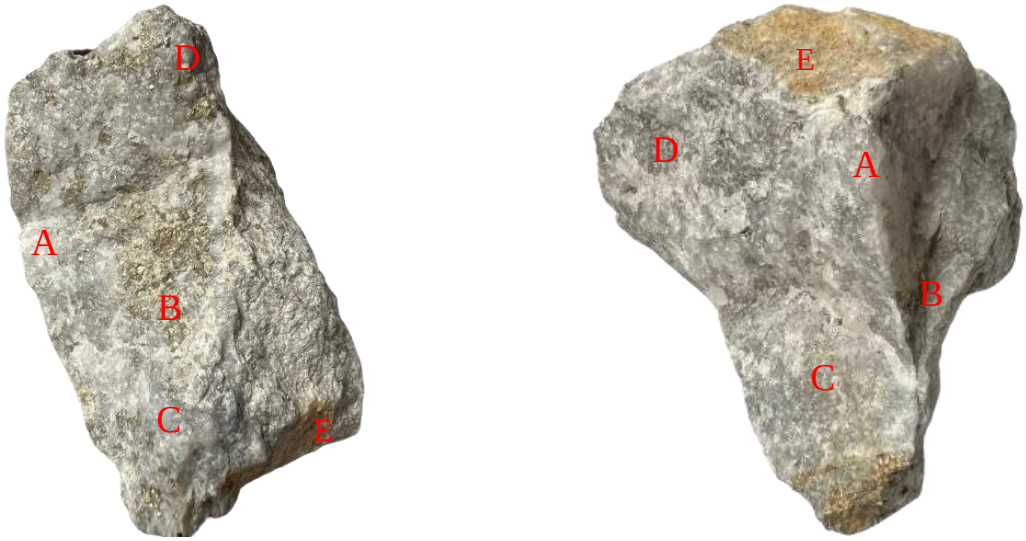
4.1.1 Caracterización macroscópica

Se realizó una inspección inicial para identificar el tipo de roca y minerales de las muestras recibidas las cuales se muestran en la figura 4, en ellas se observa que el aspecto predominante es

de color blanco proveniente del cuarzo (SiO_2)[A], con incrustaciones de colores dorado de posible pirita (FeS_2)[B], gris claro [C], oscuro [D] a los cuales se les deben realizar pruebas posteriores para identificar a que especies pertenecen y restos de arcilla [E].

Figura 4.

Mineral roca de las minas Cálamo y Manantial ubicadas en San Roque, Antioquía



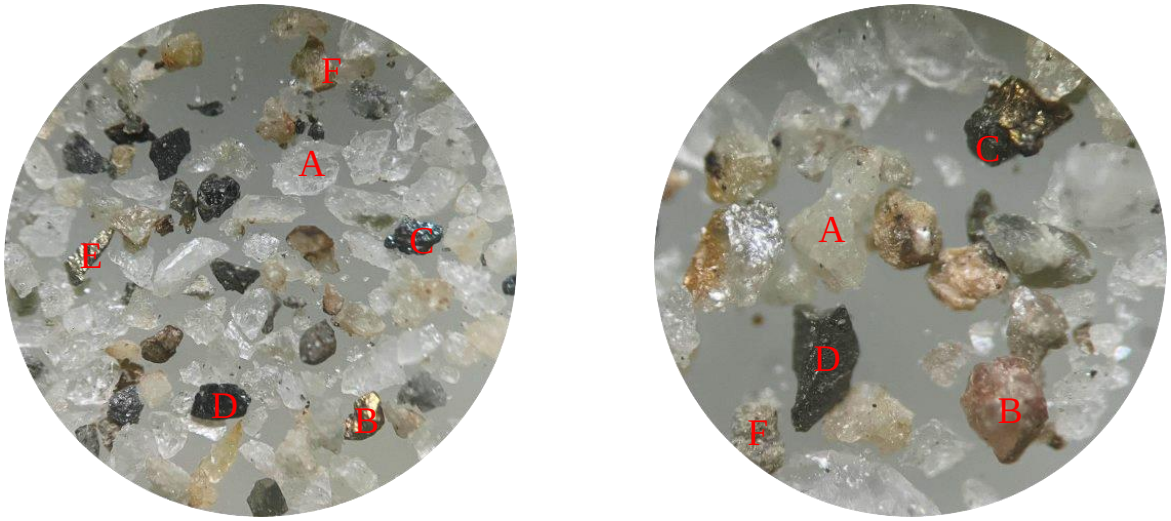
4.1.2 Microscopia óptica mineral de cabeza

Con el fin de analizar de manera más detallada las especies contenidas en el mineral, se observó en el estereoscopio una muestra representativa para realizar una identificación en cuanto a sus propiedades ópticas como color, pleocroísmo y el comportamiento al reflejar la luz.

En la figura 5 se observan las micrografías a 400X y 900X respectivamente, en estas se distingue el cuarzo en su mayoría (SiO_2) [A], calcopirita ($CuFeS_2$) [B], galena (PbS) [C], carbón (C) [D], pirita (FeS_2) [E] y elementos arcillosos [F].

Figura 5.

Micrografías de mineral cabeza a 400X y 900X



4.1.3 SEM-EDX mineral de cabeza

Los resultados de las pruebas de SEM – EDX, suministradas por el laboratorio de nanotecnología de la Universidad Pontificia Bolivariana seccional Bucaramanga, el cual presentan en la figura 6 cantidades de oro libre en una visión de 500x además de presencia de otros minerales que son compuestos como aluminio, hierro, calcio, silicio, cuarzo y otros elementos arcillosos donde el otro hace presencia a través de pequeñas incrustaciones, adicionalmente en la figura 7 se muestra el espectro obtenido por EDX donde se detallan los elementos característicos.

Figura 6.

Micrografías obtenidas por SEM del mineral de cabeza a 200X y 500X

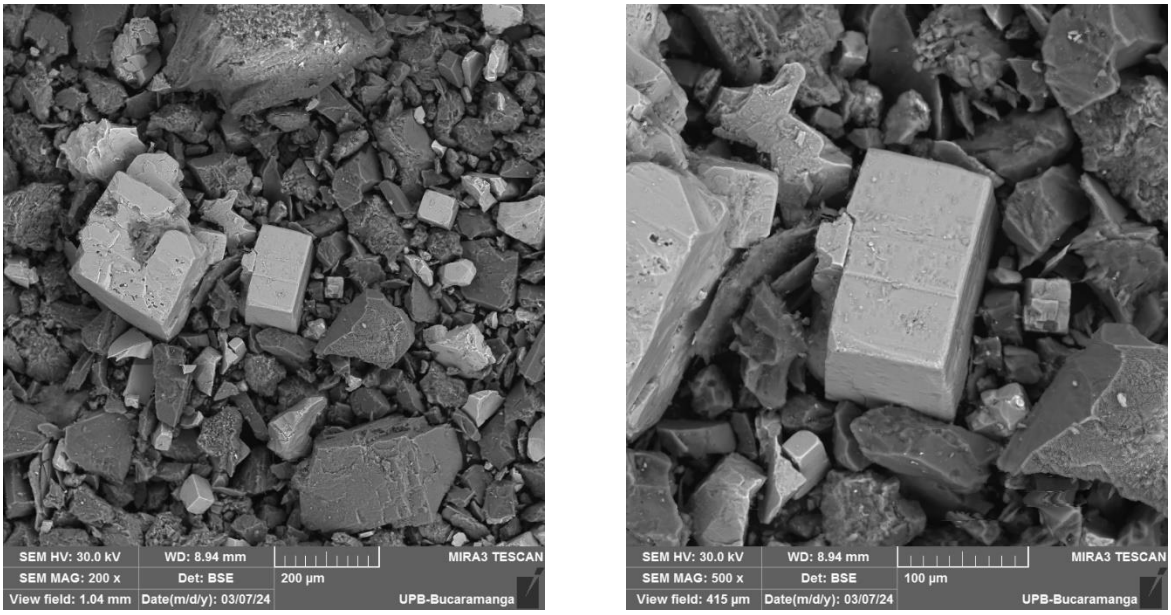
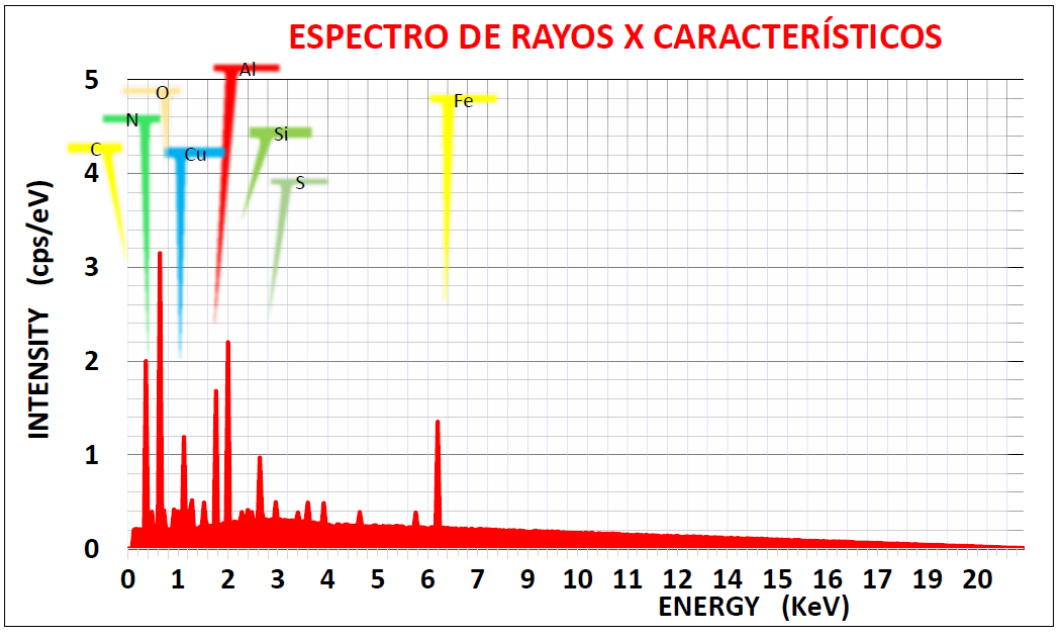


Figura 7.

Espectro y composición elemental obtenido por EDX para el mineral de cabeza



Element	Mass %	Atom %
C	9.31	15.3
N	1.19	0.72
O	16.79	14.1
Cu	5.95	6.96
Al	7.51	10.53
Si	9.48	13.35
S	8.93	9.5
Fe	9.74	11.6

4.2 Caracterización química

4.2.1 Tenores de oro y plata del mineral de cabeza

Mediante la técnica de ensayo al fuego y posterior lectura en el espectrofotómetro de absorción atómica con llama se analizó la cantidad de oro y plata por tonelada del mineral, para ello se tomaron muestras representativas del mineral de cabeza, la prueba se realizó por triplicado para que el resultado fuera representativo, estos se muestran en la tabla 1.

Tabla 1.

Tenores de oro y plata de mineral de cabeza

Metal	Muestra	Plata [g/Ton]	Oro [g/Ton]
Mineral de cabeza	1	83,04	24,67
	2	81,01	23,03
	3	81,05	24,56
	Promedio	81,69	24,08

Según la ley de corte de la (ANM, 2017) la concentración mínima de mineral valioso debe ser de 1g/ton para que sea viable realizar el beneficio de este, lo cual indica que la mena Cálamo y Manantial cumplen a cabalidad con la exigencia anteriormente descrita debido a que el tenor de oro es de 24,08 g/ton y el de plata de 81,69 g/ton.

4.3 Caracterización granulométrica

El análisis de distribución granulométrica se realizó 8 veces en un tiempo de 10 minutos cada una a una muestra de 245g, obtenida luego de realizar cuatro cuarteos a la muestra inicial de 3240g, para garantizar que la muestra sea representativa, luego de ello se pasó al Ro-tap ubicando tamices según la norma ASTM E11-17, la serie de tamices de muestra en la tabla 2.

Tabla 2.

Orden de tamices según ASTM E11.

Apertura (µm)	2360	850	500	300	212	150	106	75	Fondo
N° de malla	8	20	35	50	70	100	140	200	Fondo

Adaptada de ASTM E11

Por efectos de estudio solo se consideraron las mallas #20, #50 y #70 respectivamente, con un tiempo de 10 minutos teniendo en cuenta los factores que propone la norma de acuerdo con el tipo de material, tamaño de partícula y tipo de tamiz vibratorio, en la tabla 3 se muestra la cantidad de material retenido en las mallas usadas.

Tabla 3.

Datos para análisis granulométrico

N° de malla	**Gramos retenidos**	**% Retenido**	**%Retenido acumulado**	**% Pasante**
20	74.7	37.35	37.35	62.65
50	28.4	14.2	51.55	48.45
70	42.5	21.25	72.8	27.2
Fondo	54.3	27.15	99.95	0.1

Se utilizaron los 3 tipos de aberturas, siendo estos los principales para una correcta distribución del mineral dentro del proceso. Además de ello, se realizó una proyección de la cantidad de mallas necesarias en el ensayo teniendo en cuenta la disponibilidad de estas determinando así que la variación en los resultados del proceso al utilizar una cantidad mayor de mallas no sería alta.

Una vez que se tuvo la pasante malla #50 y #70, se realizó nuevamente la prueba de ensayo al fuego con el fin de determinar el porcentaje de enriquecimiento de los tenores de oro y plata después de la liberación por mallas, esta prueba se realizó por triplicado para garantizar que el resultado sea representativo, los datos se muestran en la tabla 4.

Tabla 4.

Tenores de oro y plata para pasante malla #50 y #70

Metal	Muestra	Plata [g/Ton]	Oro [g/Ton]
Malla #50	1	112.66	100.02
	2	112.48	99.98
	3	112.83	100.00
	Promedio	112.66	100.00
Malla #70	1	309.58	130.02
	2	309.40	130.08
	3	309.02	130.00
	Promedio	309.33	130.03

Comparando los datos obtenidos del ensayo al fuego inicial (tabla 1) y el realizado después de la liberación por mallas (tabla 4), se observa que el aumento de los tenores de oro y plata fue

excelente, lo cual indica que gran parte del oro se encuentra libre y es fino, por lo cual no se necesita de un proceso de molienda y trituración secundario.

4.4 Caracterización Física

4.4.1 Densidad aparente y gravedad especifica

El cálculo de la densidad aparente y gravedad especifica del mineral se realizó con el picnómetro, los datos obtenidos se muestran en la tabla 5.

Tabla 5.

Datos para calcular la densidad aparente

Mineral [g]	**Picnómetro vacío [g]**	**Picnómetro, agua [g]**	**Picnómetro, agua y mineral [g]**
3	33.2	84.1	85.2
4	33.9	83.6	86.1
5	33.8	83.9	86.9
Promedio	33.63	83.86	86.06

Para hallar la gravedad especifica y densidad aparente del mineral, se empleó la ecuación 3 y 4 respectivamente.

$$\mathrm{G} = \frac{d_1 * d_2(\mathrm{W} - \mathrm{p})}{0.999[d_2(w_1 - \mathrm{p}) - d_1(w_2 - \mathrm{W})]}$$

Ecuación 3. *Gravedad especifica*

Donde:

d_1,d_2: Densidad absoluta del agua

p: Peso del picnómetro vacío

w: Peso del picnómetro y el mineral

w_1: Peso del picnómetro con agua

w_2: Peso del picnómetro, agua y mineral

$$D = [G(d - a)] + a$$

Ecuación 4. *Densidad aparente*

Donde:

G: Gravedad especifica

d: Densidad absoluta del agua

a: Densidad absoluta del aire

Reemplazando los datos en las ecuaciones anteriores se obtiene que la gravedad especifica es de 2.224 g/cm^3 y la densidad aparente de 2.223 g/cm^3 lo cual indica, según la literatura que el mineral se encuentra en el rango estimado donde las reservas auríferas y la calidad del mineral son ideales para que este sea extraído. Se halló el porcentaje de sólidos con el fin de determinar la eficiencia del proceso de separación y la recuperación del metal de interés.

4.5 Cianuración por agitación

En la tabla 6 se muestran las condiciones de estudio para la cianuración a las que se sometieron los mixtos del pasante mall #50 y #70 respectivamente.

Tabla 6.

Datos obtenidos de la cianuración

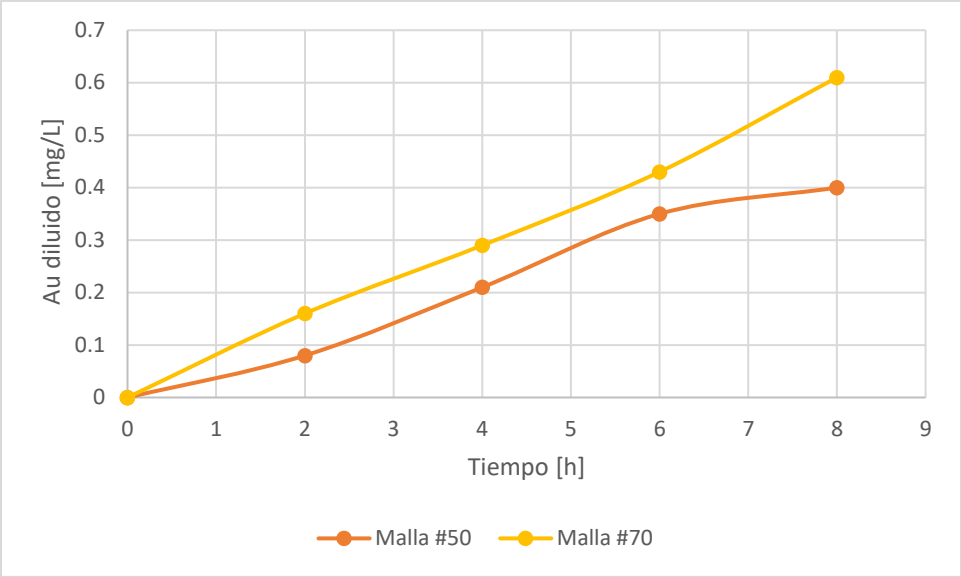
Muestra	pH	Volumen Inicial [ml]	Volumen Final [ml]
Malla #50	11	1000	850
Malla #70	10 – 10.5	1000	830

Una vez filtrada la solución, se midió el volumen y se observó que hubo perdidas en cuanto al volumen final, estas son atribuidas a la volatilización de la solución, adicional se encuentra una diferencia de 20ml entre la malla #70 y la malla #50, lo cual se explica mediante el tamaño de partícula, ya que al ser más fino es más propenso a volatilizarse. Por otro lado, es importante mencionar que a pesar de que se controló la variación del pH, la muestra de pasante malla #70 tendió a disminuir su pH oscilando entre 10 – 10.5 por lo cual fue necesario adicionar 3g de cal entre cada toma de pH.

Con el propósito de conocer el grado de lixiviación de oro en la solución líquida cianurada, se tomó una alícuota de 20ml cada 2horas, para un total de 4 alícuotas las cuales fueron analizadas por espectroscopia de absorción atómica por llama, los resultados obtenidos se muestran en la figura 8. Se observa que la cinética de disolución de oro es rápida para las muestras de malla #50 y malla #70, ya que alcanzan porcentajes de 8% y 16% respectivamente en las primeras 2 horas de ensayo lo que indica que se disolvió las partículas de oro libre y finas contenidas, en la hora 4 la cinética es intermedia debido a que la disolución del oro fue del 21% para la malla #50 y 29% para la #70, durante esta etapa se diluyeron las partículas gruesas y el oro libre por lo cual el aumento no fue rápido, para la hora 6 la disolución del oro aumenta para las dos mallas, finalmente en la hora 8 la cinética de disolución de la malla #50 se ralentiza llegando a un 40% en la cual se diluyo solo una parte del oro no liberado, por otro lado la disolución de la malla #70 sigue aumentando exponencialmente teniendo una disolución final del 61% de oro contenido en el mineral. Estas disimilitudes de disoluciones se deben a la cantidad de oro libre presente en cada muestra y la diferencia del tamaño de partícula ya que al ser menor el de malla #70 (212µm) se cuenta con mayor área de contacto para que el cianuro penetre con más fácilmente.

Figura 8.

Oro disuelto vs tiempo de cianuración



Para saber en qué rango de lixiviedad se encuentra el mineral de estudio, se recurre a la literatura en donde Brooya en 1994 planteo la clasificación de lixiaviabilidad para minerales auríferos la cual se muestra en la tabla 7. Por lo tanto, el mineral aurífero proveniente de las minas Cálamo y Manantial ubicadas en el municipio de san Roque, Antioquia es difícilmente lixiviable.

Tabla 7.

Grado de lixiaviabilidad de un mineral (La Brooya, S. R., et al 1994, T.,2000)

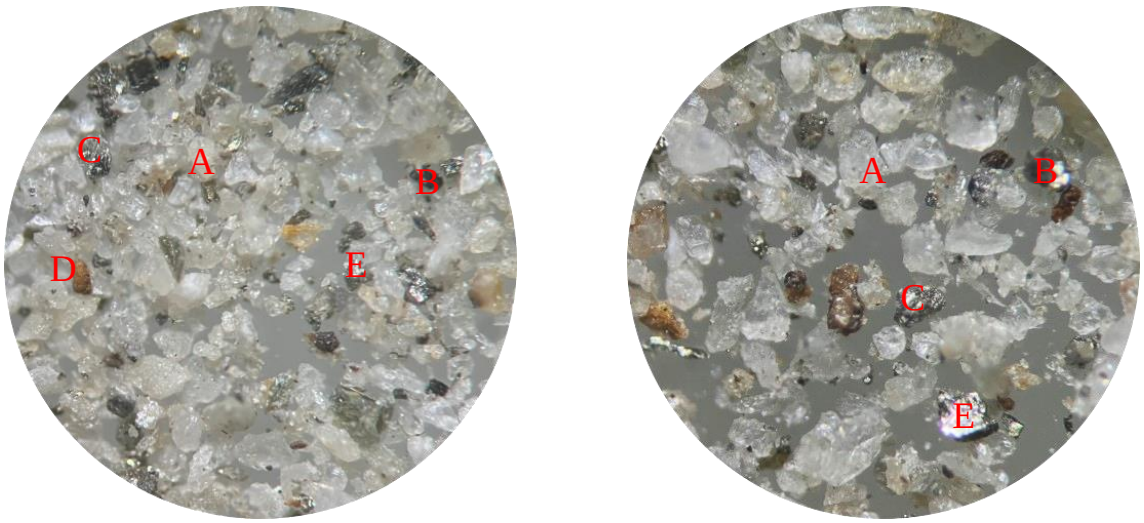
Oro disuelto [%]	Grado de lixiaviabilidad
<65	Difícilmente lixiviable
65 - 85	Medianamente lixiviable
>85	Altamente lixiviable

4.5.1 Microscopia óptica mineral cianurado

Una vez que el sólido del mineral cianurado se secó, se llevó al estereoscopio una muestra representativa de 2g para realizar la identificación de las especies que quedaron después de la cianuración. En la figura 9 se muestran las micrografías a 600X y 900X respectivamente, allí se observa permaneció el cuarzo (SiO_2) [A] en la muestra, al igual que el carbón (C) [B], hierro (Fe) [C], elementos arcillosos [D], galena $(PbS)[E]$, entre otros.

Figura 9.

Micrografías del mineral cianurado a 600X y 900X



4.5.2 SEM – EDX mineral cianurado

Se analizó una muestra del mineral cianurado por el método SEM-EDX con el fin de realizar una comparación entre el mineral cabeza sin cianuro y el mineral cianurado; En la figura 10 se observa que en 200x el oro sobresale de los otros elementos, así como la presencia de silicatos dentro de la muestra. En la figura 11 se representa la cantidad de los elementos presentes en el mineral.

Figura 10.

Micrografías por SEM del mineral cianurado a 200X

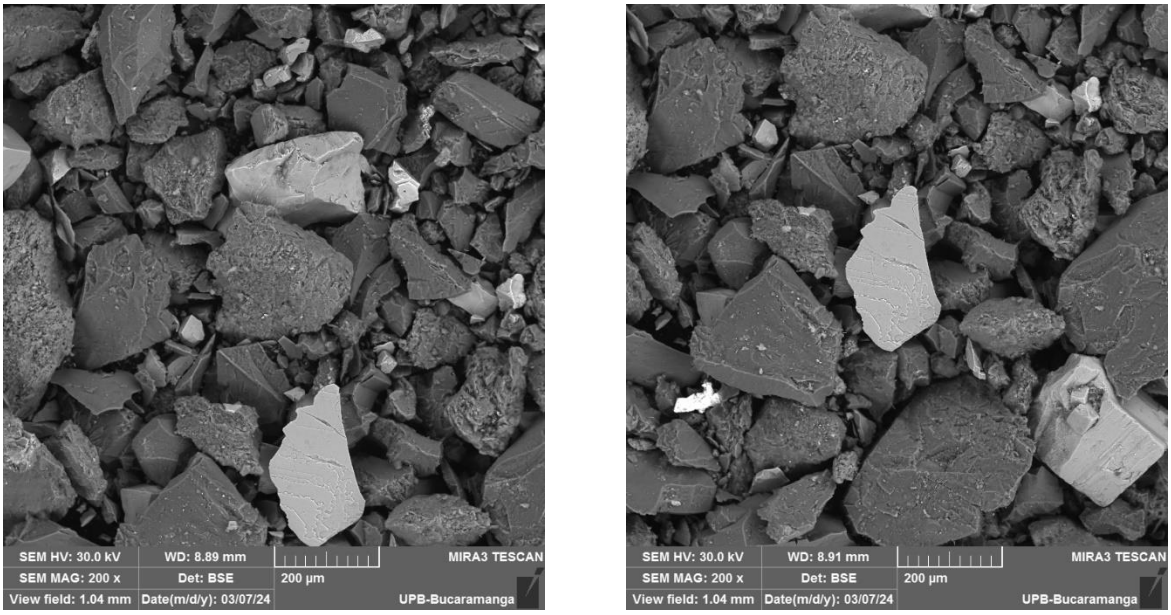
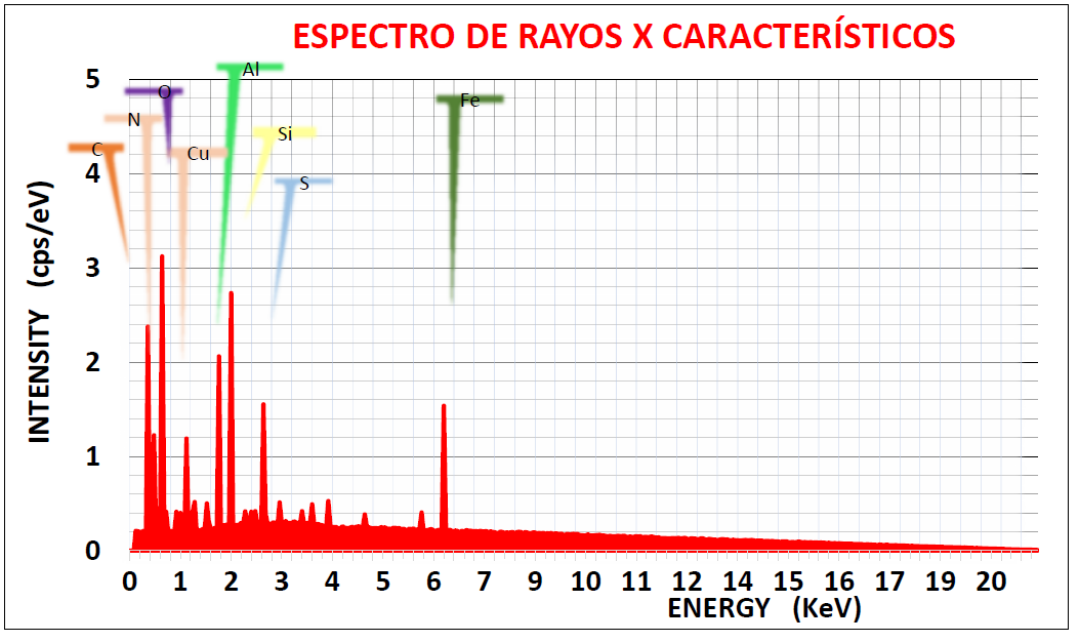


Figura 11.

Espectro y composición elemental obtenido por EDX para el mineral cianurado



Element	Mass %	Atom %
C	11.23	14.3
N	5.21	5.92
O	14.4	22.71
Cu	6.32	6.21
Al	5.85	10.01
Si	9.91	8.15
S	7.01	8.4
Fe	8.67	9.41

4.6 Balance de materia

Figura 12.

Balance de trituración para el beneficio de 200 TPD de mineral

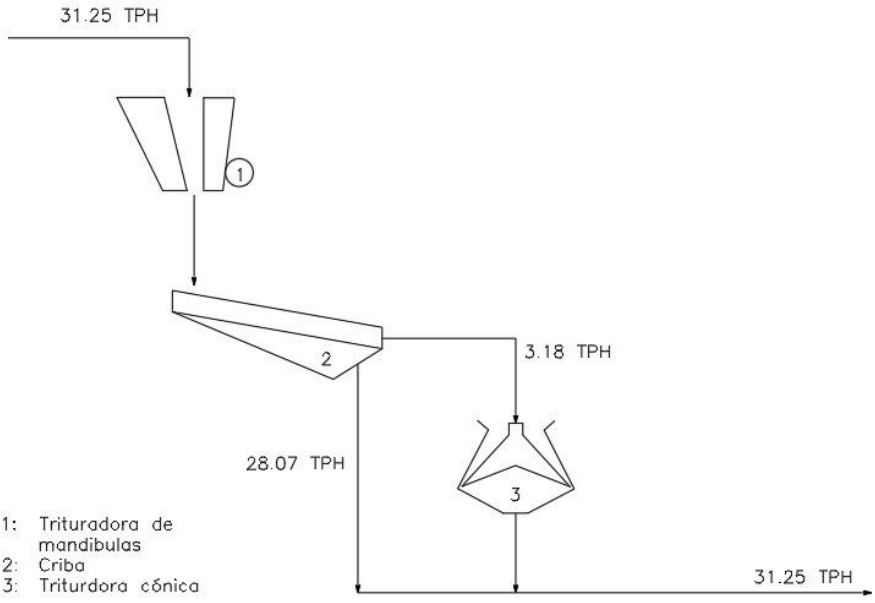


Figura 13.

Balance de molienda primaria para el beneficio de 200 TPD de mineral

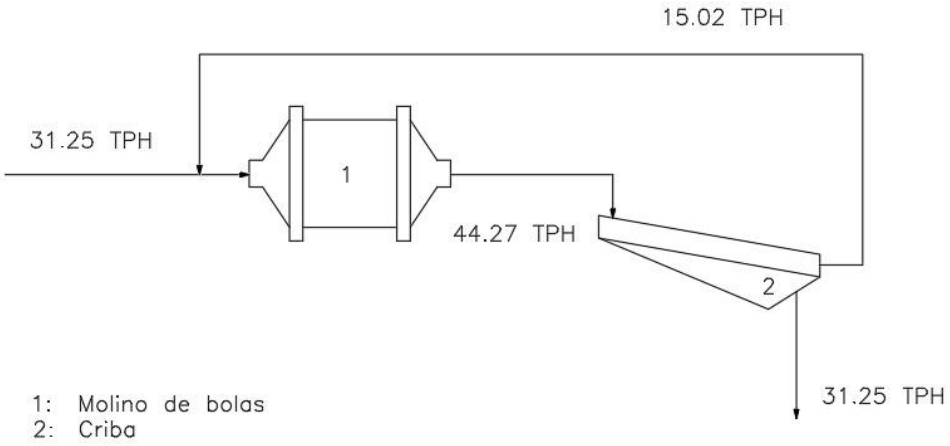


Figura 14.

Balance de concentración gravimétrica para el beneficio de 200 TPD de mineral

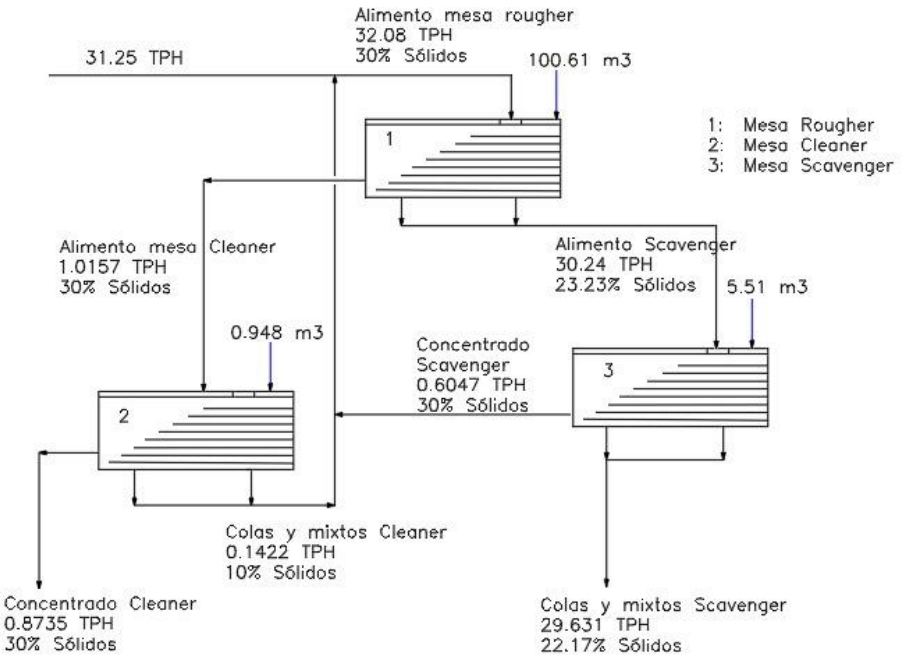


Figura 15.

Balance de molienda secundaria para el beneficio de 200 TPD de mineral

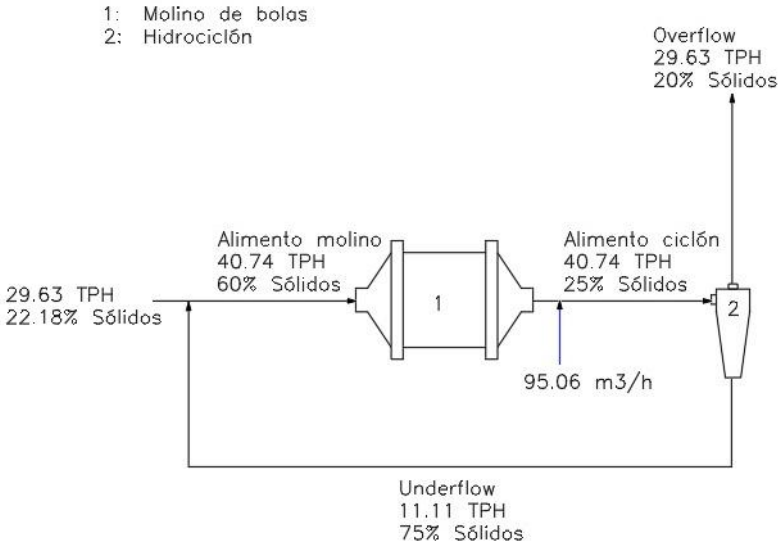


Figura 16.

Balance de cianuración en planta de 200 TPD de mineral

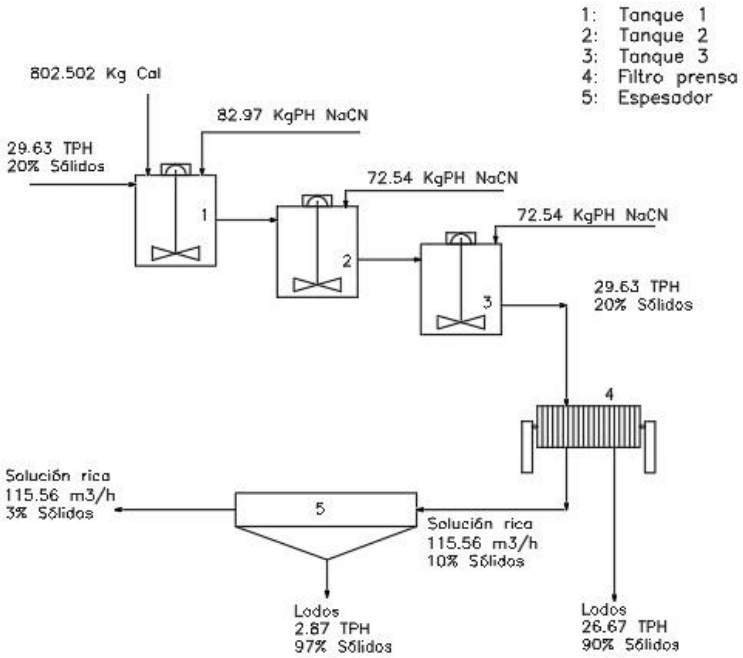


Figura 17.

Balance del proceso de Merrill-Crowe para planta de 200 TPD

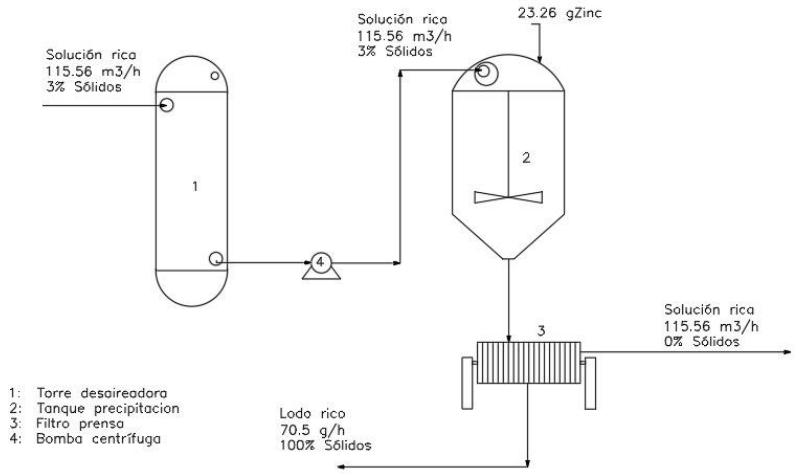


Figura 18.

Balance de fundición para planta de 200 TPD.

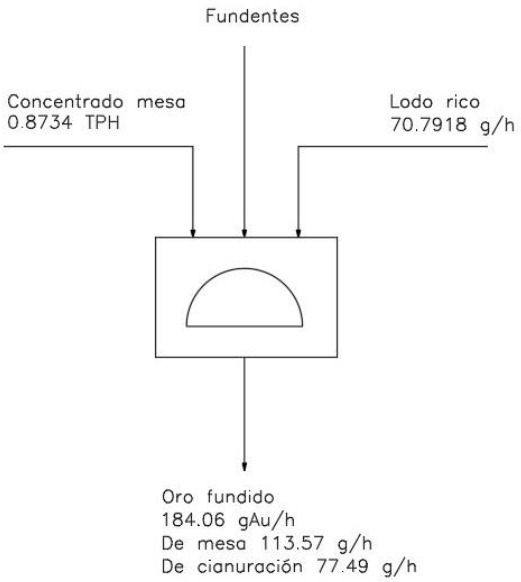
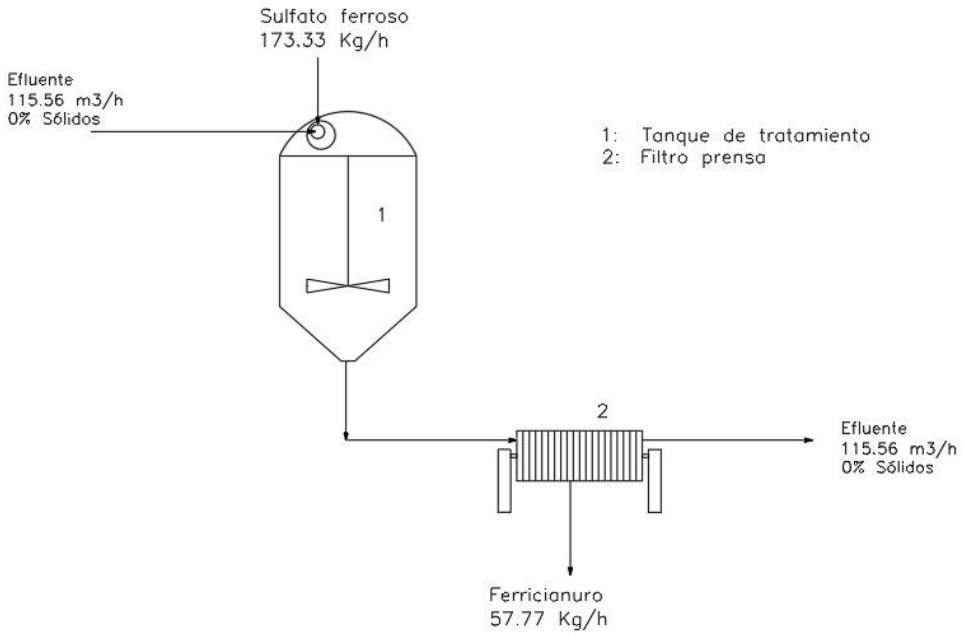


Figura 19.

Balance para tratamiento de efluente de mineral cianurado.



4.7 Tratamiento de pasivos ambientales

Como se observa en el difractograma, en este se concentran elementos importantes como aluminio, hierro, oxígeno y cianuro, entre otros. En el caso específico del cianuro que se encuentra dentro de la muestra sólida se lava, siguiendo la literatura, en tres ocasiones para limpiar a través de la corriente de agua el sólido. Este a su vez se somete a un proceso de descontaminación que finalmente se usará como materia prima para la elaboración de elementos de construcción.

4.8 Diseño de planta

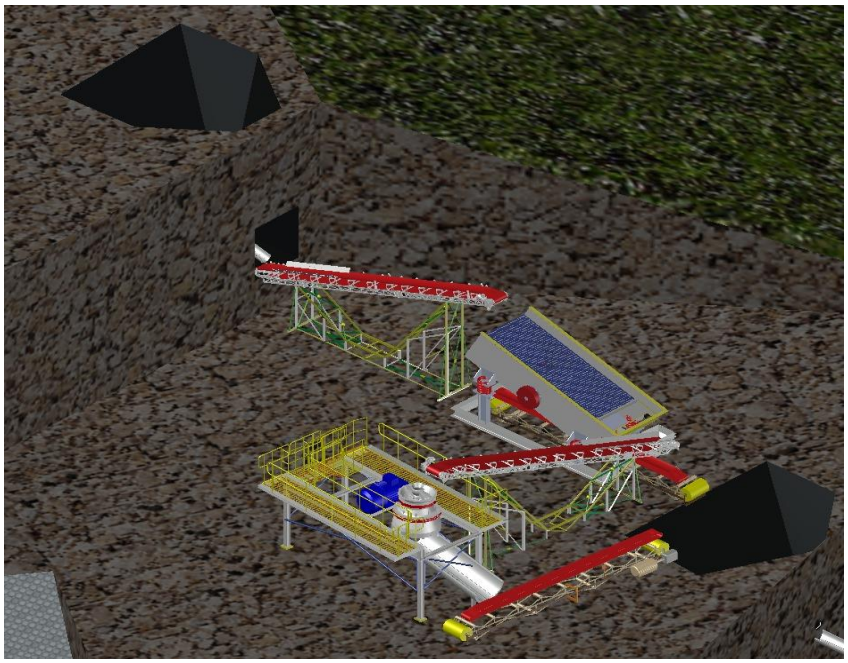
El diseño de la planta 3D se realizó utilizando el software AutoCAD 3D, esta herramienta es una de las más usadas en proyectos que integran varios procesos. El diseño consta de 8 circuitos de procesamiento que son: Trituración, molienda primaria, concentración en mesa, molienda

secundaria, cianuración, proceso de Merril Crowe, fundición y tratamiento de relaves. El diseño de la planta tiene como principio cumplir con las políticas ambientales exigidas por las entidades gubernamentales así mismo tener en cuenta la seguridad de cada uno de los actores del proceso. Es por ello por lo que se busca realizar la recirculación del mineral y de las soluciones que se encuentren contaminadas para que estas no tengan ningún efecto negativo sobre la población aledaña.

El mineral procedente de la veta es llevado al proceso de trituración a través de vagones que lo cargan en un alimentador vibratorio, el cual lentamente hace descender las rocas a la trituradora de mandíbulas. El producto de este proceso pasa a una primera zaranda con abertura de 1´´ donde el overflow retorna a la trituradora de cono con el fin de disminuir hasta una abertura de 0.30´´ que lo guía hasta el centro de acopio y seguidamente al segundo circuito.

Figura 20.

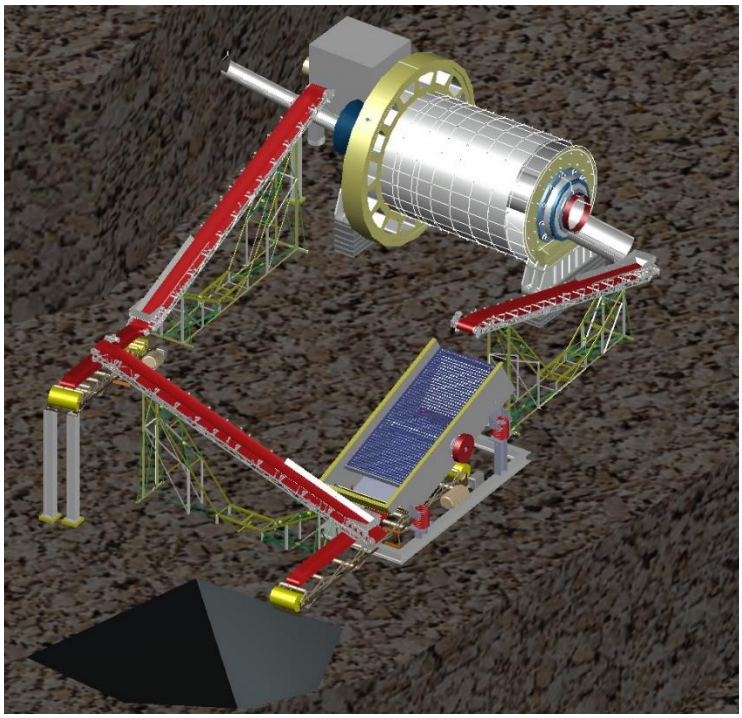
Diseño trituración de mineral



El segundo circuito es la molienda primaria, este circuito se recibe el producto de la trituración, el cual pasa a través de una banda transportadora al molino y su producto es menor a 212µm. en el Underflow que pasa directamente al siguiente circuito que corresponde a la concentración gravimétrica a través de mesa de sacudidas y el Overflow pasa nuevamente por el molino.

Figura 21.

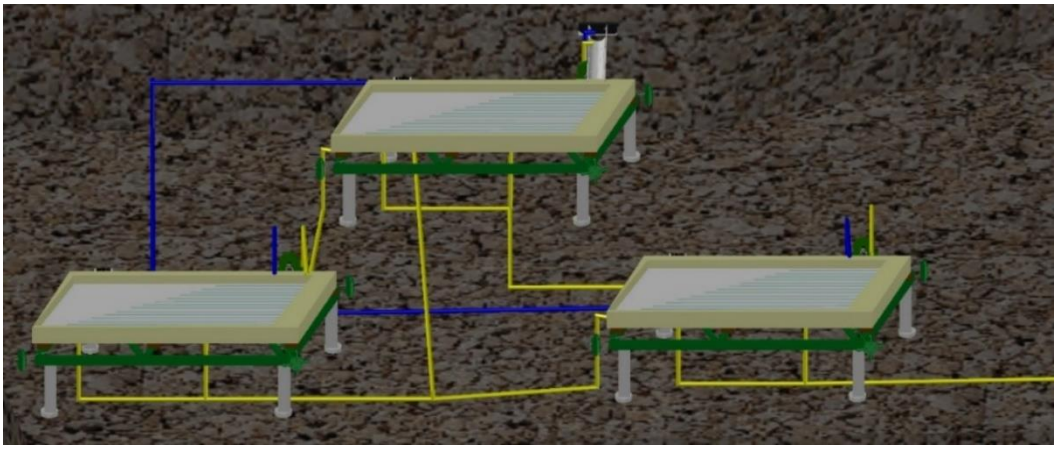
Diseño molienda de mineral



En cuanto al tercer circuito, el mineral molido pasa de manera directa a la mesa de sacudidas por medio de bandas transportadoras y se distribuye en dos mesas principales de mayor cantidad de procesado del mineral por hora para la etapa denominada Rougher que pasa en una misma corriente a una mesa para la etapa del Cleaner para obtener finalmente un producto concentrado de oro. En cuanto a los mixtos y colas, estos de unen en una misma corriente para producir una pulpa que se envía a la molienda secundaria.

Figura 22.

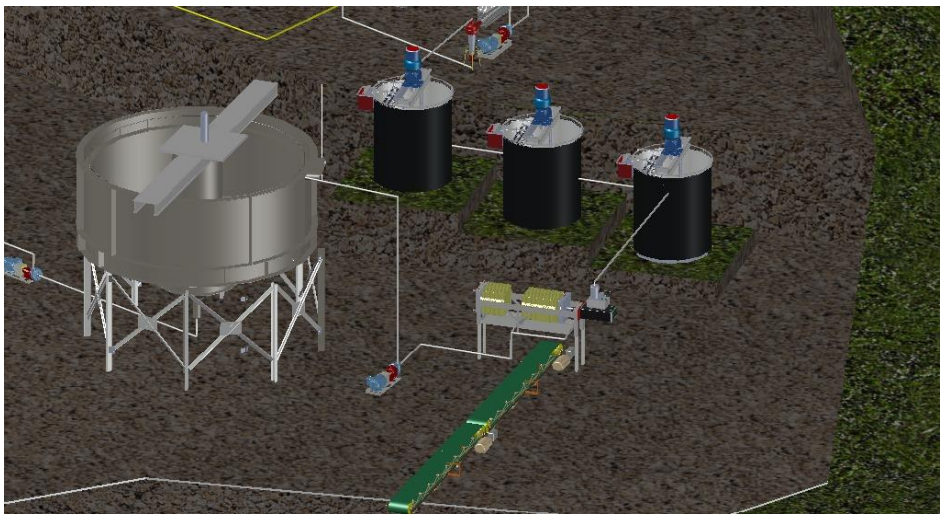
Diseño concentración gravimétrica



La etapa hidrometalúrgica comienza con el alimento del Overflow que viene de la molienda secundaria que se acondiciona la pulpa y luego pasa al proceso de lixiviación, en este proceso va directamente a un tanque homogeneizador que luego de un tiempo de agitación, la pulpa se filtra y continúa el proceso hacia la cementación y el sólido pasa a un lavado con agua; El agua producto del lavado se recircula al primer tanque de la cianuración como una solución Barren.

Figura 23.

Diseño proceso de cianuración



El proceso siguiente es el de la recuperación del oro y este se realiza a través del proceso Merril-Crowe, en este proceso la solución que contiene el mineral va hacia la torre des aireadora y posteriormente se dirige a un tanque de agitación cerrada, esto con el fin de evitar que se inhibe la cementación. El producto sólido va a un horno donde se funde el doré que se requiere.

Figura 24.

Recuperación del mineral

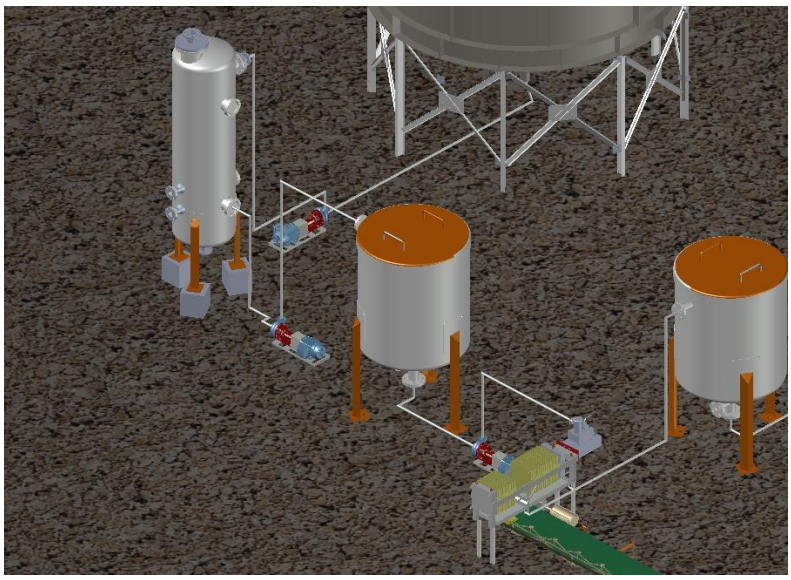


Figura 25.

Fundición

4.9 Análisis de costos

El análisis de Capex y Opex de la planta de beneficio, se presentan a continuación:

Tabla 8.

Concepto y valor

Actividad capex		**US$**
Actividades previas	$	35.000
Obras generales	$	108.000
Obras civiles	$	76.000
Suministro equipos mayores	$	464.281
Suministro equipos menores	$	100.792
Auxiliares	$	40.000
Laboratorio	$	90.133
Mantenimiento de planta	$	66.367
Transporte de planta china-buenaventura + seguro	$	50.000
Transporte buenaventura – san roque+seguro	$	12.000
Total, base	$	1.115.553
Base+impuestos (30+15%)	$	2.028.279

Tabla 9.

Tabla de costos de operación de planta de beneficio de 200 TPD

Actividad opex		**US$/Mes**
Consumo de potencia	$	44.270
Consumo de agua	$	311
Consumo de reactivos	$	37.986
Transporte	$	12.029
Mano de obra	$	35.176
Total	$	129.773

Tabla 10.

Tabla de análisis general de Capex planta de beneficio de 200 TPD

Capex, US	**US$**	**US$/Mes**	**T/Mes**	**US$/**T
	$2.0280279	$8.451	6000	$1.4

Tabla 11.

Tabla de análisis general de Opex de planta de beneficio de 200 TPD

Opex, US/Mes	**US$/Mes**	**T/Mes**	**US$/**T
	$129.773	6660	$20.9

El valor total de la planta es de 22.3 US$/tonelada procesada, para un tiempo de 20 años de vida útil. (Fuente: Autoras, Prof. Walter Pardavé e Ing. Jorge Ventosilla Shaw de JVS Ingenieros S.A.C https://jvsingenieros.com/)

5. Conclusiones

La caracterización del mineral proveniente de las minas Cálamo y Manantial ubicadas en San Roque, Antioquia analizadas por medio de espectroscopia de dispersión de energía de rayos X (EDX) microscopia electrónica de barrido (SEM), microscopia óptica y ensayo al fuego permitieron determinar que este está constituido principalmente por 35.6% de cuarzo (SiO_2), 12.3% de pirita (FeS), 18.2% de elementos arcillosos ($Al_2O_3.2SiO_2.2H_2O$), 7.3% calcopirita ($CuFeS_2$). Adicional se identificó que gran parte del oro se encuentra de manera libre a tamaños de partícula finos menores a 212µm, esto se corroboró por medio de ensayo al fuego el cual arrojo una ley de 309.33 g/ton Ag y 130.03 g/ton Au.

El esquema adecuado para el beneficio del mineral está compuesto por ocho circuitos, inicialmente el mineral ingresa a trituración y cribado, este se conecta a la molienda, pasando por las mesas de concentración gravimétrica, conectada a la molienda secundaria que pasa a la cianuración por agitación, de allí va al proceso Merril Crowe la solución liquida cianurada que posteriormente va a fundición y los sólidos se disponen al circuito de tratamiento de efluentes, adicional a ello se concluye que la planta es viable económicamente.

Las alternativas de uso de pasivos ambientales se centran en la industria de la construcción debido a que los elementos que lo conforman son de gran utilidad en la fabricación de los productos utilizados en la construcción, dentro de ello se encuentran los residuos de roca que se agregan al hormigón para rellenar caminos y rellenos.

Recomendaciones

Debido a que el mineral proveniente de las minas Cálamo y manantial ubicadas en el municipio de San Roque, Antioquia se categorizan como difícilmente lixiviable según la literatura propuesta en La Brooya en 1994, se recomienda aumentar el tiempo de lixiviación a 18 horas y disminuir el tamaño de las partículas para que el cianuro tenga mayor área de contacto y por lo tanto estas alcancen un mayor grado de lixiaviabilidad.

Teniendo en cuenta las pruebas realizadas a través de SEM-EDX es importante aclarar que la presencia de mercurio en el mineral cabeza puede deberse a la práctica artesanal anteriormente utilizada durante la extracción del mineral de interés.

Referencias Bibliográficas

American Society for Testing Materials (ASTM). (2017). Standard Test Method for Analysis of Ores, Minerals, and Rocks by the Fire Assay Preconcentration Optical Emission Spectroscopy (ASTM E400-02).

American Society for Testing Materials (ASTM). (Jan 22, 2020). Standard Test Method for Sieve Analysis of Fine and Coarse Aggregates (ASTM C136/C136M-19).

American Society for Testing Materials (ASTM). (May 06, 2020). Standard Specification for Woven Wire Test Sieve Cloth and Test Sieves (ASTM E11-17).

American Society for Testing Materials (ASTM). (Jan 05, 2022). Standard Test Method for Apparent Density of Leather (ASTM D2346-21)

Agencia Nacional de Minería (ANM). (2023). Colombia, Minería para la vida. *Colombia, potencia de la vida*, 6. Obtenido de https://mineriaencolombia.anm.gov.co/contenido/mineria-para-la-vida

Agencia Nacional de Mineria. (2019). *Colombia un país con grandes recursos minerales y potencial productivo*. AMN. https://www.anm.gov.co/?q=colombia-un-pais-con-grandes-recursos-minerales-y-potencial-productivo

ANM. (15 de mayo de 2017). *CÓDIGO COLOMBIANO PARA EL REPORTE PÚBLICO DE RESULTADOS DE EXPLORACIÓN, ESTIMACIÓN Y CLASIFICACIÓN DE RECURSOS MINERALES Y*. Obtenido de https://www.anm.gov.co/sites/default/files/DocumentosAnm/ccrr_v1.docx.pdf

ANM. (2023). *Colombia potencia de la vida*. Obtenido de https://www.anm.gov.co/?q=Asi-es-nuestra-Colombia-minera

Asociación Colombiana de minería (ACM). (6 de septiembre de 2023). *Asociación Colombiana de Mineria*. Obtenido de https://acmineria.com.co/mineria-en-cifras-2023/

Asociación Colombiana de Minería (ACM). (6 de septiembre de 2023). *Asociación Colombiana de Mineria* . Obtenido de Minería en cifras – 2023: https://acmineria.com.co/mineria-en-cifras-2023/

Beneficio y transformación de minerales. (2023, 1 octubre). https://www.sgm.gob.mx/Web/MuseoVirtual/Aplicaciones_geologicas/Beneficio-y-transformacion--minerales.html

CAD / Computer-aided design. (s. f.). Siemens Digital Industries Software. https://www.plm.automation.siemens.com/global/es/our-story/glossary/computer-aided-design-cad/12507

De Alicante Departamento de Ingeniería Química, U. (2008, 24 octubre). *Tema 6. Espectroscopia de rayos X y electrónica*. https://rua.ua.es/dspace/handle/10045/8250

Departamnto Administrativo Nacional de Estadistica (DANE). (15 de 2 de 2024). *Producto Interno Bruto (PIB) nacional trimestral*. Obtenido de https://www.dane.gov.co/index.php/estadisticas-por-tema/cuentas-nacionales/cuentas-nacionales-trimestrales/pib-informacion-tecnica

Gaviria, A. C., Restrepo, O. J., & Bustamante, O. (junio de 2007). Notas de clase de hidrometalurgia aplicada. Medellin, Colombia.

La explotación minera. (s. f.). https://www.icmm.com/es/mineria-y-los-metales/acerca-de-la-mineria/la-explotacion-minera

López, B. S. (2021, 13 agosto). *¿Qué es el diseño y distribución en planta?* Ingeniería Industrial Online. https://www.ingenieriaindustrialonline.com/diseno-y-distribucion-en-planta/que-es-el-diseno-distribucion-en-planta/

Universidad de Burgos. (4 de marzo de 2020). *Fluorescencia de Rayos X (FRX)*. Obtenido de https://www.ubu.es/parque-cientifico-tecnologico/servicios-cientifico-tecnicos/rayos-x/fluorescencia-de-rayos-x-frx

Universidad de Sonora (UNISON). (2020). *Procesamiento y Beneficio de minerales.* Sonora.

UNIVERSIDAD PEDAGOJICA Y TECNOLOGICA DE COLOMBIA (UPTC). Caracterización, beneficio y usos potenciales de minerales estratégicos del departamento de Boyacá, Tunja: Editorial UPTC.

Apéndices

Apéndice A. Liberación de minerales

Figura 26. *Recepción del mineral roca*

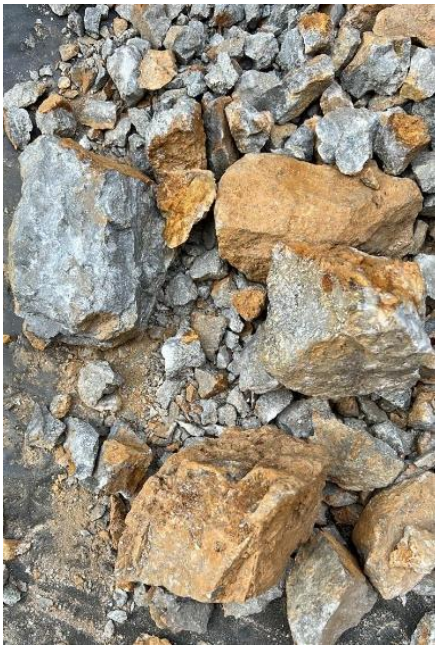


Figura 27. *Trituración manual*

Figura 28. *Trituración*

Figura 29. *Molienda*

Apéndice B. Pruebas de concentración de mesa Wilfley

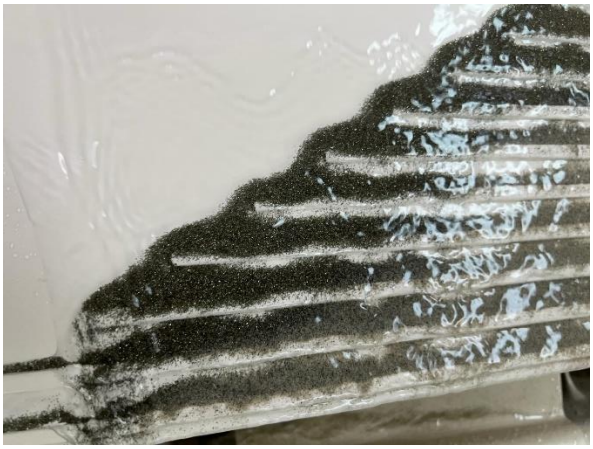


Figura 30. *Concentración de mesa Wilfley*

Figura 31. *Concentración de mesa Wilfley*

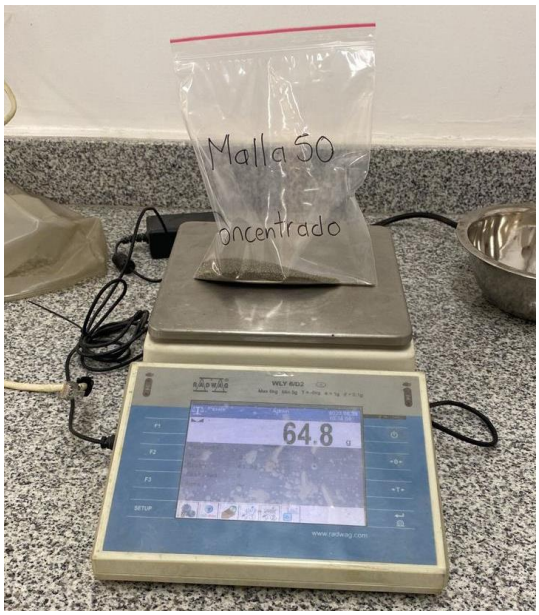


Figura 32. *Concentrado obtenido de la mesa Wilfley para malla #50*

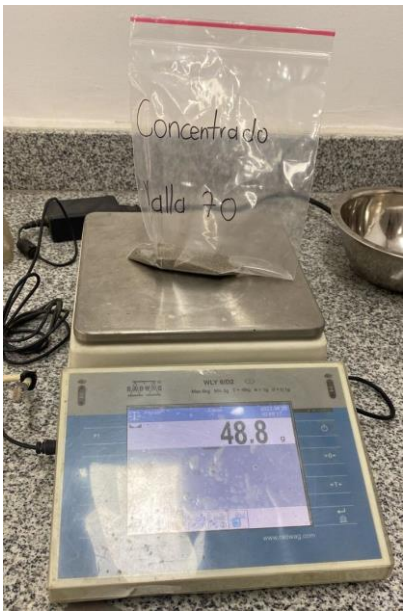


Figura 33. *Concentrado obtenido de la mesa Wilfley para malla #70*

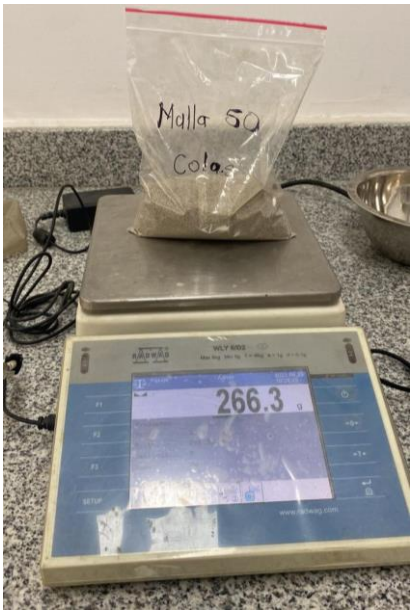


Figura 34. *Colas obtenido de la mesa Wilfley para malla #50*

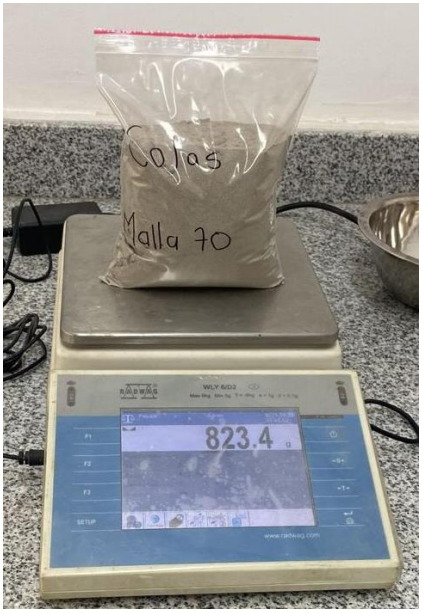


Figura 35. *Colas obtenido de la mesa Wilfley para malla #70*

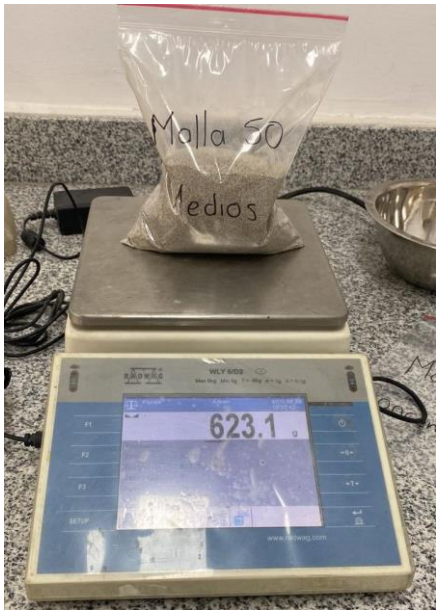


Figura 36. *Medios obtenidos de la mesa Wilfley para malla #50*

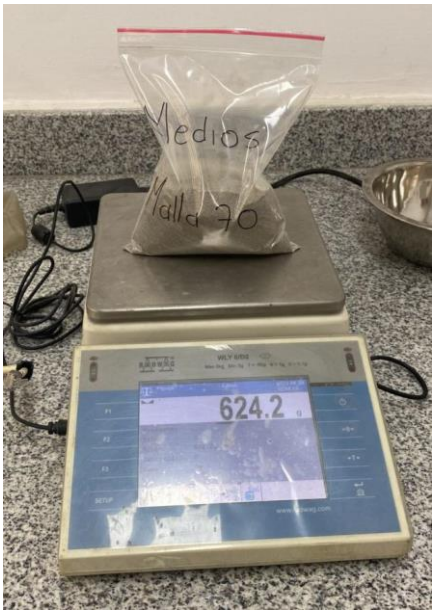


Figura 37. *Medios obtenidos de la mesa Wilfley para malla #70*

Apéndice C. Cianuración

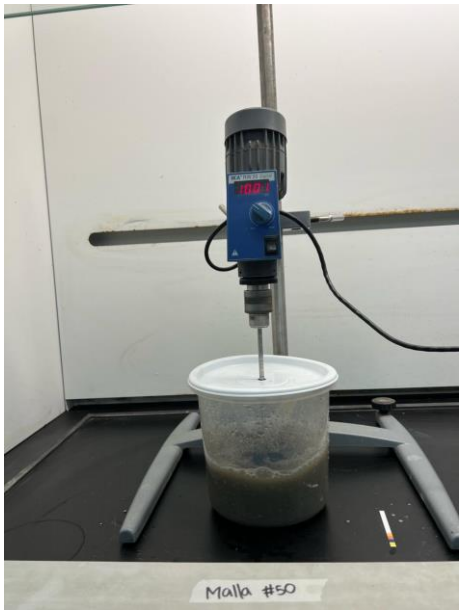


Figura 38. *Cianuración por agitación malla #50*

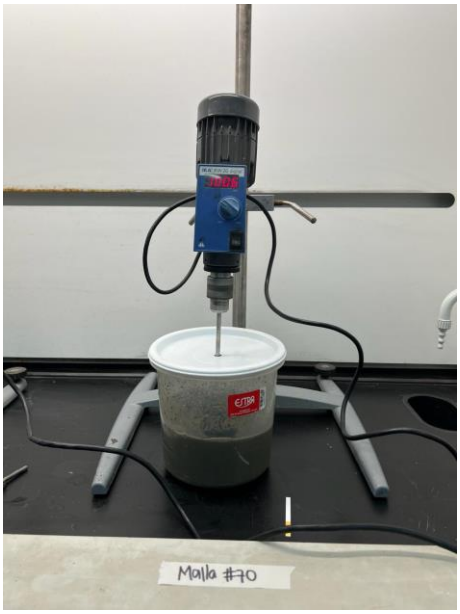


Figura 39. *Cianuración por agitación malla #70*

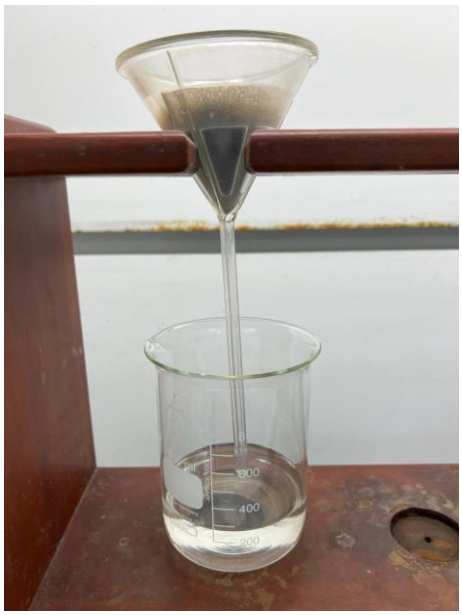


Figura 40. *Filtración solución cianurada*

Figura 41. *Solución cianurada*

Apéndice D. Microscopia mineral de cabeza

Figura 42. *Micrografía mineral cabeza a 134X*

Figura 43. *Micrografía mineral cabeza a 400X*

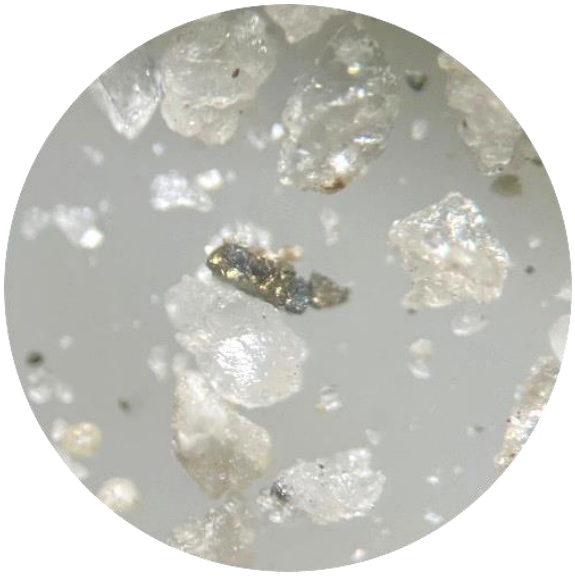


Figura 44. *Micrografía mineral cabeza a 600X*

Figura 45. *Micrografía mineral cabeza a 900X*

Apéndice E. SEM – EDX mineral de cabeza

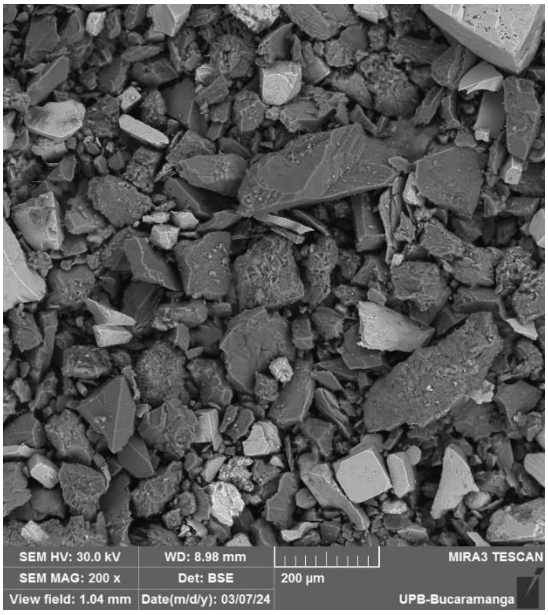


Figura 46. Micrografías obtenidas por SEM del mineral de cabeza a 200X

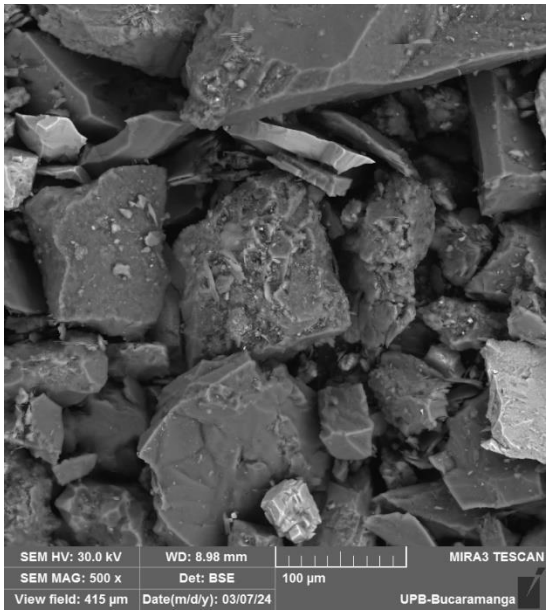
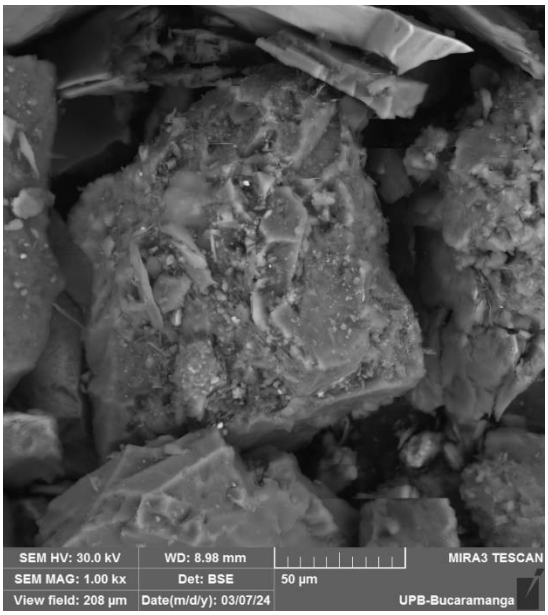


Figura 47. Micrografías obtenidas por SEM del mineral de cabeza a 500X



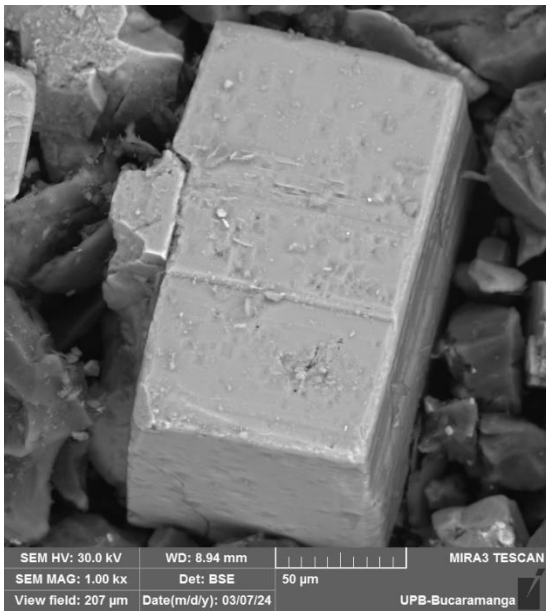


Figura 48. *Micrografías obtenidas por SEM del mineral de cabeza a 1000X*

Element	At. No.	Line S.	Netto	Mass [%]	Mass Norm. [%]	Atom [%]	Abs. Error [%] 1 sigma	Abs. Error [%] 2 sigma	Abs. Error [%] 3 sigma
Carbono	6	K-serie	10361	9,31	11,35	15,30	2,04	4,09	6,13
Oxígeno	8	K-serie	5695	16,79	19,75	14,10	2,96	5,93	8,89
Silicio	14	K-serie	1931	9,48	13,35	13,35	3,87	7,74	11,61
Aluminio	13	K-serie	2234	7,51	10,01	10,53	2,50	5,01	7,51
Magnesio	12	k-serie	2576	0,68	0,90	0,88	0,22	0,43	0,65
Sodio	11	K-serie	2827	1,69	2,22	2,40	0,53	1,07	1,60
Potasio	19	K-serie	887	0,89	1,17	0,83	0,28	0,56	0,84
Calcio	20	K-serie	902	2,13	2,42	2,13	0,29	0,58	0,87
Hierro	26	K-serie	487	9,74	11,20	11,60	1,46	2,91	4,37
Cadmio	48	L-serie	967	0,35	0,45	0,52	0,10	0,21	0,31
Nitrógeno	7	K-serie	8622	1,19	1,38	0,72	0,19	0,39	0,58
Fósforo	15	K-serie	1692	0,31	0,41	0,40	0,10	0,19	0,29
Zinc	30	L-serie	2895	0,41	0,53	0,37	0,12	0,23	0,35
Cobre	29	L-serie	3341	5,95	6,84	6,96	0,89	1,78	2,67
Manganeso	25	K-serie	495	0,43	0,60	0,46	0,17	0,35	0,52
Cromo	24	L-serie	5017	0,29	0,40	0,62	0,11	0,21	0,32
Niquel	28	L-serie	3687	0,53	0,64	0,62	0,11	0,22	0,33
Cobalto	27	L-serie	4232	1,09	1,37	1,92	0,27	0,55	0,82
Cloro	17	K-serie	1259	0,62	0,70	1,01	0,08	0,15	0,23
Azufre	16	K-serie	1373	8,93	10,50	9,50	1,58	3,15	4,73
oro	79	M-serie	1441	1,34	1,52	2,42	0,18	0,36	0,55
Mercurio	80	M-serie	1472	0,73	0,85	1,27	0,12	0,24	0,36
Plomo	82	M-serie	1200	0,39	0,51	0,62	0,12	0,24	0,37
Titanio	22	K-serie	692	0,78	0,91	1,44	0,13	0,25	0,38
Arsénico	33	L-serie	2332	0,03	0,04	0,05	0,01	0,02	0,02
				81,57	**100,00**	**100,00**			

Figura 49. *Composición química mineral de cabeza obtenida por EDX*

Apéndice F. Microscopia mineral cianurado

Figura 50. *Micrografía mineral cianurado a 134X*

Figura 51. *Micrografía mineral cianurado a 400X*

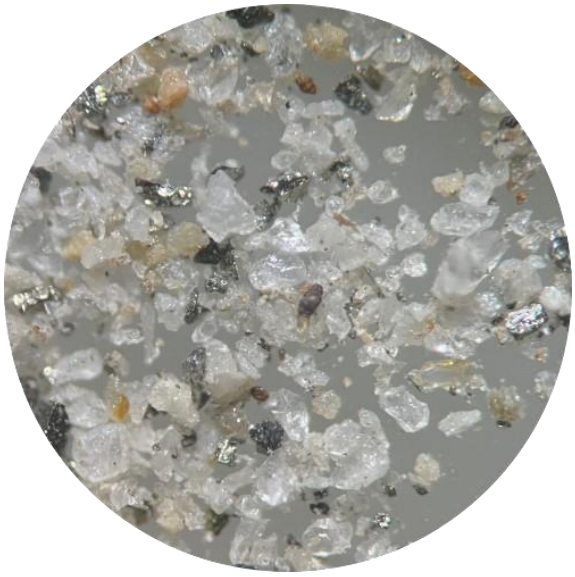


Figura 52. *Micrografía mineral cianurado a 600X*

Figura 53. *Micrografía mineral cianurado a 900X*

Apéndice G. SEM – EDX mineral cianurado

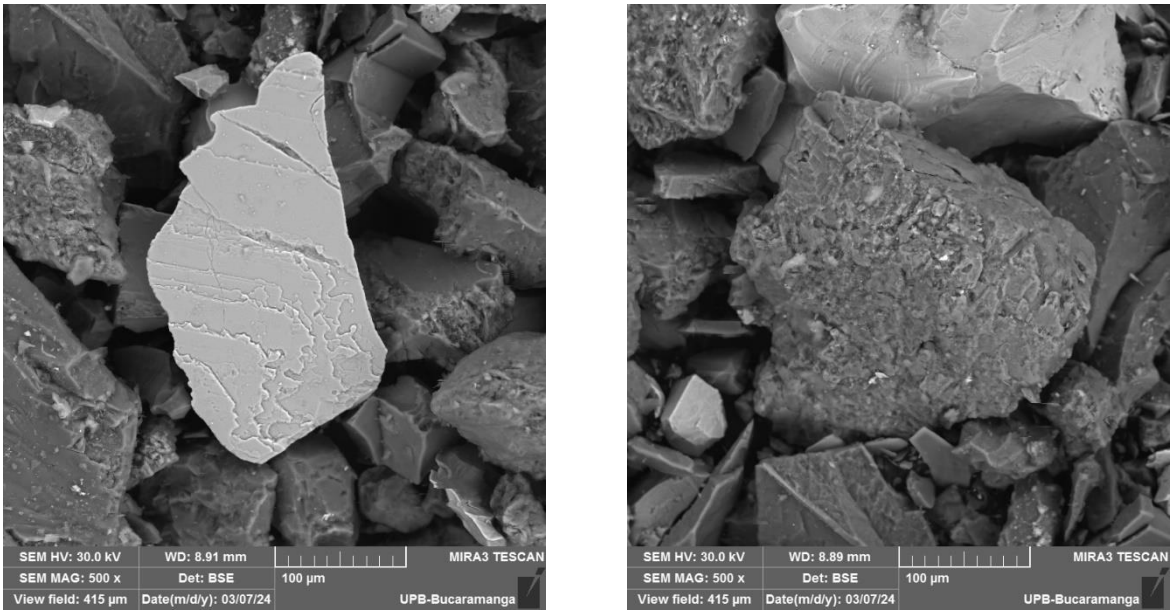


Figura 54. *Micrografías obtenidas por SEM del mineral cianurado a 500X*

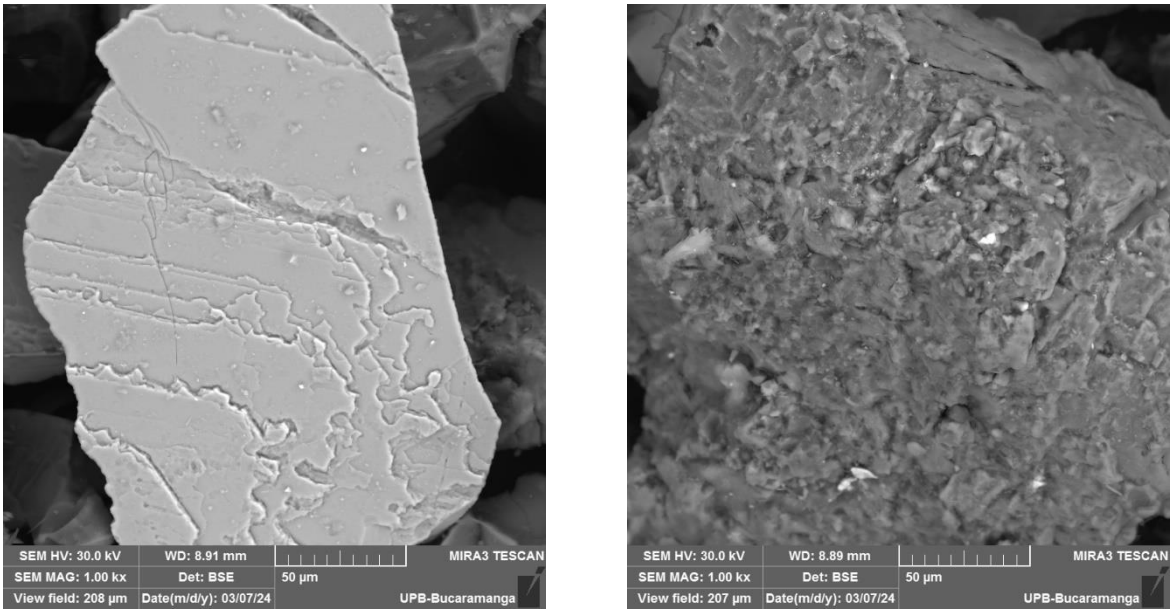


Figura 55. *Micrografías obtenidas por SEM del mineral cianurado a 1000X*

Element	At. No.	Line S.	Netto	Mass [%]	Mass Norm. [%]	Atom [%]	Abs. Error [%] 1 sigma	Abs. Error [%] 2 sigma	Abs. Error [%] 3 sigma
Carbono	6	K-serie	11155	11,23	13,05	14,30	1,83	3,65	5,48
Oxígeno	8	K-serie	5962	14,40	16,00	22,71	1,60	3,20	4,80
Silicio	14	K-serie	1707	9,91	12,55	8,15	2,64	5,27	7,91
Aluminio	13	K-serie	2248	5,85	7,91	10,01	2,06	4,11	6,17
Magnesio	12	k-serie	2679	0,78	0,90	0,86	0,12	0,23	0,35
Sodio	11	K-serie	2798	1,82	2,09	1,86	0,27	0,54	0,81
Potasio	19	K-serie	972	1,06	1,50	0,95	0,43	0,87	1,30
Calcio	20	K-serie	783	2,05	2,57	2,97	0,51	1,03	1,54
Hierro	26	K-serie	519	8,67	10,70	9,41	2,03	4,07	6,10
Cadmio	48	L-serie	1079	0,25	0,35	0,41	0,10	0,20	0,31
Nitrógeno	7	K-serie	8240	5,21	6,06	5,92	0,85	1,70	2,54
Fósforo	15	K-serie	1398	0,24	0,34	0,38	0,10	0,20	0,31
Zinc	30	L-serie	2905	0,43	0,55	0,41	0,11	0,23	0,34
Cobre	29	L-serie	3103	6,32	7,80	6,21	1,48	2,96	4,44
Manganeso	25	K-serie	556	0,63	0,70	0,45	0,07	0,14	0,21
Cromo	24	L-serie	5542	0,32	0,36	0,46	0,04	0,08	0,12
Niquel	28	L-serie	3969	0,46	0,61	0,72	0,15	0,29	0,44
Cobalto	27	L-serie	4387	1,28	1,62	1,11	0,34	0,68	1,02
Cloro	17	K-serie	1187	0,71	0,85	0,52	0,14	0,27	0,41
Azufre	16	K-serie	1221	7,01	9,35	8,40	2,34	4,67	7,01
oro	79	M-serie	1333	1,31	1,64	1,40	0,33	0,66	0,98
Mercurio	80	M-serie	1508	0,68	0,82	0,99	0,15	0,30	0,45
Plomo	82	M-serie	1311	0,47	0,54	0,62	0,07	0,14	0,21
Titanio	22	K-serie	625	0,92	1,12	0,76	0,20	0,40	0,60
Arsénico	33	L-serie	2473	0,04	0,05	0,04	0,01	0,01	0,02
				82,04	**100,00**	**100,00**			

Figura 56. *Composición química mineral de cianurado obtenida por EDX*