

Diseño de planta de 100 TPD para el beneficio de minerales auríferos provenientes de la zona
minera del cauca

Martha Gysela Sánchez Agudelo y César Augusto Pardo Jaimes

Proyecto de grado para optar al título de Ingeniero Metalúrgico

Director:

Walter Pardavé Livia

Magister en Ingeniería Metalúrgica

Codirector

Pedro Luis Delvasto Angarita

Doctor en Ciencia y Tecnología de Materiales

Universidad Industrial de Santander

Facultad de Ingenierías fisicoquímicas

Escuela de Ingeniería Metalúrgica y Ciencia de Materiales

Bucaramanga

2022

Dedicatoria

A Dios por darme la fortaleza y perseverancia para lograr superar las dificultades vividas en este lindo proceso de aprendizaje.

A mis padres, Rosa Eugenia Jaimes Sandoval y Basilio Pardo Lizcano por prestarme su ayuda incondicional dejando su juventud para sacar adelante mi formación académica y personal, por la paciencia en aquellos momentos de dificultad, por los consejos y ejemplo grato a mi vida, por todo lo que hicieron y hacen por mí. Les estaré eternamente agradecido.

Los amo.

A mi abuela Nicanora Sandoval por ser parte de mi vida y mi crianza.

A Jhon Aceros que brindó su compañía y guía académica, además de una gran amistad desde el colegio.

A mis compañeros y amigos Laura, Geraldine, Franklin, Adrián y Angie con los cuales compartí momentos gratos en las aulas de clase e instalaciones del campus lo cual hoy hace parte de una formación personal muy enriquecedora.

A mi compañera de tesis Martha Sánchez por su paciencia y gran apoyo en esta travesía que decidimos afrontar juntos, gracias por siempre perseverar conmigo para lograr lo que en aquel curso de precálculo parecía muy lejano.

A la Universidad Industrial de Santander por ser una cuna del conocimiento, la mejor del país, donde pude formarme como Ingeniero Metalúrgico.

Siempre UIS.

César Augusto Pardo Jaimes

Dedicatoria

A Dios. A mis padres Luis Sánchez , Dianny Agudelo, por apoyarme en cada una de las etapas de mi vida y estar conmigo en los mejores momentos y en los más difíciles. Por brindarme su amor y enseñanza e inculcar en mí los valores necesarios para afrontar con valentía cada obstáculo presentado.

A mi hermana Yurley Sánchez y mi abuelita Noris Hernández, por ser aquellas personas incondicionales y pacientes, quienes estuvieron presente en todo momento, por el amor brindado, la motivación y las risas obsequiadas.

A mi compañero de tesis y amigo, César Pardo, quien con su dedicación y esfuerzo ha hecho posible este logro, gracias por confiar en mí y por cada uno de los momentos compartidos y consejos dados.

A mis amigos Geraldine Collazos y Rafael Uribe con quienes compartí increíbles experiencias a lo largo de mi carrera. La universidad no solo me permitió desarrollarme profesionalmente, también hizo de mi la persona que soy ahora y me dio el privilegio de conocer personas que siempre serán importantes en mi vida.

Martha Gysela Sánchez Agudelo

Agradecimientos

*A la planta docente de la escuela por su gran compromiso en nuestra formación profesional,
pues siempre dieron lo mejor en sus clases para formarnos íntegramente.*

*A todos los técnicos laboratoristas de la escuela que hicieron parte de nuestro aprendizaje
personal a lo largo de la etapa universitaria.*

*A nuestro director de tesis Msc Walter Pardavé Livia por la guía que brindó durante este
proceso.*

*A los técnicos Ambrosio Carrillo y Javier Gaitán por su paciencia y entrega personal en la
realización de este proyecto compartiendo su experiencia personal que fue de gran ayuda en la
etapa experimental de la investigación.*

Contenido

| | Pág. |
|---|-------------|
| Introducción | 13 |
| 1. Objetivos | 14 |
| 1.1 Objetivo General | 14 |
| 1.2 Objetivos Específicos..... | 14 |
| 2. Fundamentación Teórica..... | 15 |
| 2.1 Caracterización del mineral | 16 |
| 2.1.1 Caracterización mineralógica..... | 16 |
| 2.1.2 Caracterización microscópica | 16 |
| 2.1.3 Microscopía electrónica de barrido (SEM)..... | 17 |
| 2.1.4 Difracción de rayos X (DRX)..... | 17 |
| 2.1.5 Fluorescencia de rayos X (FRX)..... | 17 |
| 2.2 Liberación de minerales | 18 |
| 2.3 Concentración gravimétrica | 19 |
| 2.4 Hidrometalurgia | 20 |
| 2.4.1 Cianuración de oro..... | 20 |
| 2.4.2 Proceso de Merrill-Crowe..... | 21 |
| 2.5 Tratamiento de relave | 21 |
| 2.6 Diseño CAD..... | 22 |
| 3. Metodología | 22 |
| 3.1 Revisión Bibliográfica y Estudio de Antecedentes..... | 22 |

| | |
|--|----|
| 3.2 Muestreo y Caracterización de Minerales..... | 23 |
| 3.3 Liberación de Minerales | 23 |
| 3.4 Pruebas de Concentración en Mesa Wilfley | 24 |
| 3.5 Pruebas de Cianuración por Agitación | 24 |
| 3.6 Balance de Masa | 25 |
| 3.7 Tratamiento del Relave y Efluente | 26 |
| 3.8 Diseño de Planta Mediante Software CAD | 26 |
| 4. Resultados y Discusión..... | 27 |
| 4.1 Muestreo y Caracterización del Mineral..... | 27 |
| 4.2 Liberación del Mineral..... | 30 |
| 4.3 Concentración en Mesa Vibratoria | 33 |
| 4.4 Cianuración por Agitación..... | 33 |
| 4.5 Balance de Masa | 35 |
| 4.6 Tratamiento de Relave | 39 |
| 4.7 Descripción de Planta 3D..... | 39 |
| 5. Conclusiones | 45 |
| 6. Recomendaciones | 46 |
| Referencias Bibliográficas | 48 |
| Apéndice | 52 |

Lista de Figuras

| | Pág. |
|---|-------------|
| Figura 1. Análisis SEM de películas delgadas obtenidas en estereomicroscopio del parque tecnológico UIS Guatiguará..... | 28 |
| Figura 2. Espectro obtenido mediante la observación SEM-EDS del mineral proveniente del Cauca..... | 29 |
| Figura 3. Análisis granulométrico..... | 31 |
| Figura 4. Análisis granulométrico remolienda..... | 32 |
| Figura 5. Balance de trituración para el beneficio de 100 TPD de mineral procedente del Cauca..... | 35 |
| Figura 6. Balance de molienda primaria para el beneficio de 100 TPD de mineral procedente del Cauca..... | 36 |
| Figura 7. Balance de concentración gravimétrica para el beneficio de 100 TPD de mineral proveniente del Cauca..... | 36 |
| Figura 8. Balance de molienda secundaria para el beneficio de 100 TPD de minera procedente del Cauca. | 37 |
| Figura 9. Balance de cianuración en planta de 100 TPD de mineral procedente del Cauca. | 37 |
| Figura 10. Balance del proceso de Merrill-Crowe para planta de 100 TPD de mineral procedente del Cauca. | 38 |
| Figura 11. Balance de fundición. | 38 |
| Figura 12. Diseño 3D del circuito de trituración. | 40 |

| | |
|---|----|
| Figura 13. Diseño 3D circuito de molienda primaria. | 41 |
| Figura 14. Diseño 3D circuito de concentración gravimétrica. | 42 |
| Figura 15. Diseño 3D circuito de molienda secundaria. | 42 |
| Figura 16. Diseño 3D circuito de cianuración. | 43 |
| Figura 17. Diseño 3D circuito de Merrill-Crowe y fundición. | 44 |
| Figura 18. Diseño 3D circuito de tratamiento..... | 45 |

Lista de Tablas

| | Pág. |
|--|-------------|
| Tabla 1. Cantidad de reactivos añadidos para prueba de cianuración por agitación. | 25 |
| Tabla 2. Composición del mineral procedente de la zona minera del Cauca. | 27 |
| Tabla 3. Serie de tamices ASTM..... | 30 |
| Tabla 4. Registro de análisis granulométrico..... | 30 |
| Tabla 5. Registro del análisis granulométrico remolienda..... | 31 |
| Tabla 6. Resultados de pruebas en mesa de sacudidas. | 33 |
| Tabla 7. Resultados de espectrofotometría de absorción atómica. | 34 |
| Tabla 8. Límites mínimos permitidos en Colombia..... | 35 |

Lista de Apéndices

| | Pág. |
|--|-------------|
| Apéndice A. Liberación del mineral..... | 52 |
| Apéndice B. Concentración gravimétrica en mesa de sacudidas..... | 55 |
| Apéndice C. Cianuración..... | 57 |
| Apéndice D. Factibilidad económica del proyecto..... | 61 |

Resumen

Título: Diseño de planta de 100 TPD para el beneficio de minerales auríferos provenientes de la zona minera del Cauca *

Autores: Martha Gysela Sánchez Agudelo y César Augusto Pardo Jaimes **

Palabras Clave: Cianuración, Diseño, Planta

Descripción:

En el presente trabajo se realizó el diseño de una planta de 100 TPD para el beneficio de minerales auríferos provenientes de la zona minera del Cauca, con esquemas y diagramas de flujo que definen las etapas del proceso operativo de la planta, tales como trituración, molienda, concentración gravimétrica, cianuración, precipitación y tratamiento de residuos. Adicionalmente, se realizó la caracterización física y química del mineral mediante ensayo al fuego, difracción de rayos X (DRX), fluorescencia de rayos X (FRX) y análisis granulométrico para determinar la composición elemental, el tenor, ocurrencia y asociación del oro en el mineral. Posteriormente, se llevó a cabo la concentración gravimétrica del mineral en la cual se realizaron tres etapas de concentración *Rougher*, *Cleaner* y *Re-cleaner* empleando una mesa Wilfley. La caracterización del mineral evidenció que el oro se encuentra asociado a telurios metálicos y oro libre en tamaños muy finos menores a 10 μm , se evaluó el porcentaje de recuperación y la ley de oro en el concentrado final donde se obtuvo 24g/ton de Au y 69g/ton con un porcentaje de liberación de recuperación de 83%. Teniendo en cuenta los resultados obtenidos y considerando las características del mineral, se realizó el balance de masa y el diseño de la planta 3D para el beneficio de minerales auríferos usando el software AutoCAD Plant 3D en donde se presenta cada una de la unidades operativas que la conforman.

* Proyecto de grado

** Facultad de Ingenierías Físicoquímicas. Escuela de Ingeniería Metalúrgica y Ciencia de Materiales. Director: Walter Pardavé Livia Msc en ingeniería metalúrgica

Abstract

Title: Design of a 100 TPD plant for the benefit of gold-bearing ore from the mining area of Cauca*

Author: Martha Gysela Sánchez Agudelo and César Augusto Pardo Jaimes **

Key Words: Cyanidation, Design, Plant

Description:

In this work, a 100 TPD plant was designed for the beneficiation of gold ores from the Cauca mining area, with flow diagrams and diagrams that define the stages of the plant's operating process, such as crushing, grinding, gravimetric concentration, cyanidation, precipitation and waste treatment. Additionally, the physical and chemical characterization of the ore was carried out by fire assay, X-ray diffraction (XRD), X-ray fluorescence (XRF) and granulometric analysis to determine the elemental composition, tenor, occurrence and association of gold in the ore. Subsequently, gravimetric concentration of the ore was carried out in which three stages of Rougher, Cleaner and Re-cleaner concentration were performed using a Wilfley table. The characterization of the mineral showed that the gold is associated to metallic tellurides and free gold in very fine sizes smaller than 10 μm , the recovery percentage and the gold grade in the final concentrate were evaluated, where 24g/ton of Au and 69g/ton were obtained with a recovery liberation percentage of 83%. Taking into account the results obtained and considering the characteristics of the ore, the mass balance and the design of the 3D plant for the gold ore beneficiation were carried out using AutoCAD Plant 3D software, where each of the operating units that make up the plant are presented.

* Degree Wor

** Facultad de Ingenierías Físicoquímicas. Escuela de Ingeniería Metalúrgica y Ciencia de Materiales. Director: Walter Pardavé Livia Msc en ingeniería metalúrgica

Introducción

En el año 2020 Colombia alcanzó una producción de 47.6 toneladas de oro, lo que refleja un panorama favorable en la reactivación económica del país. Sin embargo, según la Oficina de las Naciones Unidas contra la Droga y el Delito (UNODC por sus siglas en inglés) y el Ministerio de Minas y Energía, los procesos de extracción de este recurso no tienen una regulación técnica legal ya que el 69% del oro obtenido, sin tener en cuenta las minas subterráneas, es de origen ilícito (Cardona, 2021).

El departamento del Cauca posee 277 títulos mineros vigentes y trabaja en la legalización de 158 solicitudes, según la última actualización del Catastro Minero Colombiano (CMC), de los cuales 37 se dedican a la explotación de oro y metales preciosos, lo cual representa un 98.57% de las regalías en el departamento (Agencia Nacional de Minería, 2017).

Esta falta de regulación en la explotación minera propicia el uso irresponsable de métodos convencionales como el azogue, la cianuración y el dragado que, si bien son efectivas, sin la tecnología y aplicación metalúrgica profesional, traen graves consecuencias medioambientales y socioculturales. Además, impiden el aprovechamiento óptimo del recurso lo que implica pérdidas económicas.

En busca de aportar positivamente a esta problemática que se presenta, no solo en el Cauca, sino también en gran parte del territorio nacional, el objetivo de este proyecto es el diseño de una planta con capacidad de 100 TPD para el beneficio de mineral aurífero procedente de la zona minera de este departamento, teniendo en cuenta la calidad y optimización de los procesos que allí

se realizarán en los respectivos circuitos de trituración, molienda, concentración gravimétrica, cianuración, cementación con polvo de zinc (proceso Merrill-Crowe) y tratamiento de los relaves.

1. Objetivos

1.1 Objetivo General

Dimensionar los equipos y diseñar una planta de 100 TPD para el procesamiento de minerales auríferos provenientes del Departamento del Cauca, mediante técnicas gravimétricas e hidrometalúrgicas.

1.2 Objetivos Específicos

Realizar la caracterización física, química, mineralógica y microscópica de los minerales auríferos provenientes de la zona minera del Cauca.

Establecer el esquema general de obtención de oro incluyendo variables operativas adecuadas a partir del mineral aurífero provenientes de la zona minera del Cauca.

Diseñar la planta piloto 3D del procesamiento de minerales auríferos, provenientes de la zona minera del Cauca mediante técnicas gravimétricas e Hidrometalúrgicas.

2. Fundamentación Teórica

Según ha avanzado la industrialización en el entorno global, en donde son partícipes el avance tecnológico, mayores regulaciones y mercados fluctuantes, la minería como industria enfrenta retos complejos que hacen imperativo el manejo adecuado de una compañía con el fin de ser competitiva. Esto comprende la optimización y equilibrio, tanto con un margen de ganancia económico beneficioso, como el compromiso ambiental y laboral de carácter humano. Por ende, es adecuado realizar un detallado diseño de todas sus operaciones, lo cual incluye la planificación espacial de las instalaciones, la distribución física y el correcto planteamiento de los procesos que realizará la empresa en su labor. De este modo, se logra la disminución de costos, la optimización de espacios, el incremento de productividad, el aumento de ganancias, la reducción de riesgos de accidentes laborales y la disminución del impacto ambiental (López, 2019). Por ende, la minería ha evolucionado y hoy apunta al futuro tecnológico como una industria 4.0.

La minería, una actividad antigua y de fuerte perfil tradicional, ha vivido en cien años los mayores cambios de su historia, sobre todo en materia de eficiencia y seguridad. Esta transformación se ha culminado en los últimos años, cuando las tecnologías vinculadas a la Industria 4.0 han comenzado a implantarse en el sector. La Automatización, la Inteligencia Artificial o el uso de drones son solo algunos ejemplos en el avance hacia una nueva Minería 4.0 que aspira a una explotación sostenible, segura y productiva (Cámara, s.f., p. 01).

Considerando los aspectos mencionados anteriormente es de gran importancia plantear alternativas que contribuyan a la recuperación de oro con bajo impacto ambiental y alta eficiencia de recuperación.

2.1 Caracterización del mineral

2.1.1 Caracterización mineralógica

La caracterización mineralógica permite obtener información de las propiedades fisicoquímicas y morfológicas. Esta se basa en técnicas como microscopía óptica, microscopía electrónica de barrido (SEM), difracción de rayos x (DRX) y fluorescencia de rayos x (FRX). (Ingeominas, 2010)

2.1.2 Caracterización microscópica

Este tipo de caracterización se encarga de la descripción de las menas mediante observación microscópica y análisis de láminas delgadas provenientes de rocas, lo cual permite tener información sobre su composición mineralógica, es decir, identificar sulfuros, óxidos, silicatos y demás minerales asociados (Ingeominas, 2010).

2.1.3 Microscopía electrónica de barrido (SEM)

La microscopía electrónica de barrido es una técnica de observación y caracterización morfológica de los minerales. Esta técnica, el microscopio produce electrones secundarios y retro dispersados, los cuales son detectados para la formación de una imagen que aportan información de la textura y topografía de la muestra (UPTC, 2018).

2.1.4 Difracción de rayos X (DRX)

Esta técnica analiza la estructura cristalina de un material y está basada en el fenómeno de difracción de rayos X, que expone la ley de Bragg. Los rayos X con una determinada longitud de onda interactúan con los átomos presentes en la red cristalina y estos son difractados, produciendo un patrón de difracción único para cada material y permitiendo la identificación de las fases cristalinas que constituyen el material (UPTC, 2018).

2.1.5 Fluorescencia de rayos X (FRX)

La fluorescencia de rayos X se basa en la detección de la emisión secundaria de radiación X, que es generada al excitar una muestra, sólida o líquida, con una fuente de rayos X para generar un espectro de fluorescencia el cual permite el análisis químico elemental cualitativo y cuantitativo (Gomis Yagües, 2008).

2.2 Liberación de minerales

La liberación de minerales tiene como objetivo la exposición del mineral de interés mediante la reducción de tamaño, empleando procesos trituración y molienda (Bustamante, Gaviria, & Oscar, 2008). Estos procesos son la etapa inicial del beneficio ya que preparan el mineral para la extracción del metal valioso por medio de la homogeneización de la distribución del tamaño de la partícula y la clasificación del mineral en tamaños confiables para la realización de pruebas posteriores. La primera etapa emplea la trituradora de mandíbulas, la cual produce la reducción de tamaño debido al movimiento oscilatorio y a la presión que ejerce sobre los minerales, provocando la colisión entre las partículas y la pared del equipo (Ingeominas, 2010). Las operaciones de molienda se pueden realizar por vía húmeda o seca y permiten la liberación de partículas (sulfuros, oro, silicatos) empleando cuerpos moledores que se deslizan conjuntamente por la superficie interna del molino bajo la acción de fuerzas centrífugas y fuerzas de rotación lo que proporciona el impacto sobre el mineral, produciendo la fragmentación. La liberación de minerales se desarrolla de forma continua, por tal motivo, se deben optimizar los procesos mediante la ejecución de pruebas de molienda y análisis granulométrico (Ingeominas, 2010).

El análisis granulométrico permite determinar el tamaño de partícula mediante el arreglo de tamices y el uso de una maquina Ro-Tap que induce el sacudimiento del mineral con el fin de determinar el D_{80} , tamaño definido por la malla en donde el 80% del mineral es pasante. Cabe resaltar que estas operaciones y ensayos se realizan con el fin de reducir costos y obtener tamaños adecuados para el procesamiento.

2.3 Concentración gravimétrica

Este método de concentración es esencialmente usado para separar partículas minerales de diferentes densidades mediante el efecto de la fuerza gravitacional, teniendo en cuenta que cada mineral tiene su propio peso específico y responden de forma diferente ante las fuerzas inerciales y de gravedad (Ingeominas, 2010). Este proceso emplea una mesa de concentración la cual trabaja con pulpas minerales y los separa en tres corrientes: concentrado, medios y colas; siendo el concentrado el de mayor interés ya que contiene las partículas de mayor peso específico y por ende el metal valioso. La diferencia de densidad entre los minerales que van a ser separados debe ser mayor o igual a 2.5 y se calcula mediante la siguiente formula (SENA, 1992):

$$CC = \frac{(\rho_p - \rho_f)}{(\rho_l - \rho_f)} \quad (1)$$

donde,

ρ_p = densidad de partícula pesada.

ρ_f = densidad del agua.

ρ_l = densidad de partícula liviana.

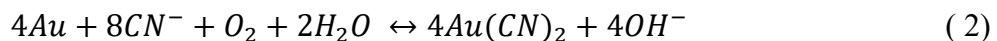
La eficiencia de separación depende de las características del mineral y de las condiciones de operación de la mesa, entre las cuales se encuentran el caudal de agua, la frecuencia del movimiento, la amplitud de recorrido y el grado de inclinación (Ingeominas, 2010). La concentración gravimétrica es económica y sencilla de aplicar ya que permite controlar variables de operación para mejorar la eficiencia del proceso (Valdvieso, Amaya, Rangel, & Reyes, 1999).

2.4 Hidrometalurgia

La hidrometalurgia tiene como base la recuperación, en medio acuoso, del metal o metales de interés contenidos en un determinado mineral. Consta de tres etapas fundamentales, las cuales son: la lixiviación, purificación y precipitación (Domic, 2001).

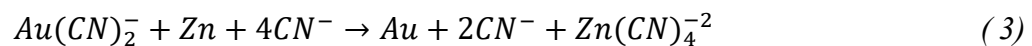
2.4.1 Cianuración de oro

El proceso de cianuración de oro es una técnica de lixiviación que acompleja al oro y a otros metales que se encuentran disueltos en una solución acuosa mediante la oxidación del cianuro y la disolución del oro en Au^{+1} , promoviendo la formación de un complejo cianurado, $Au(CN)_2$, proceso que se da mediante la reacción mostrada en la ecuación (2). Para que se lleve a cabo el proceso de disolución se debe considerar un pH básico (10.5 – 11.5), un potencial de óxido-reducción entre -400 a +250 mV y un agente oxidante como el oxígeno (Escobar, 2002). Cabe resaltar que la reacción neta de disolución de oro considera diferentes reacciones de oxidación y reducción que unidas dan como resultado la ecuación de Elsner (2). Sin embargo, esta reacción no describe por completo las reacciones catódicas asociadas a la disolución de sulfuros metálicos (Ingeominas, 2010).



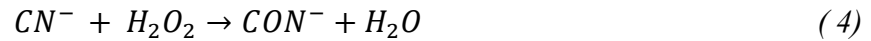
2.4.2 Proceso de Merrill-Crowe

El proceso de Merrill Crowe con polvos de zinc permite recuperar el oro disuelto en las soluciones cianuradas que presentan altas cantidades de plata en comparación con la cantidad de oro (Misnaza, 2006). El procedimiento consiste en filtrar la solución para remover las partículas que se encuentran suspendidas y someter la lechada al vacío y, de esta forma, se disminuye la presencia del oxígeno el cual consume el zinc e inhibe la recuperación de oro (Ingeominas, 2010). Una vez realizado el pretratamiento de la solución se procede adicionar polvo de zinc a la solución cianurada. El mecanismo de reacción de este proceso comprende diferentes reacciones, sin embargo, el modelo que representa la precipitación de oro en zinc se describe en la siguiente reacción química:



2.5 Tratamiento de relave

Los relaves son residuos mineros que están compuestos en su mayoría por sustancias que son nocivas para los seres vivos, siendo el cianuro uno de los compuestos de mayor impacto en la minería del oro (Gaviria & Meza, 2006). Los compuestos de cianuro se pueden clasificar en: cianuro libre, compuestos simples de cianuro, compuestos complejos de cianuro, entre otros. Los tratamientos para la degradación del cianuro consisten en la degradación por medio de la oxidación, siendo peróxido de hidrógeno el reactivo más utilizado (Gaviria & Meza, 2006). La reacción (4) describe el proceso de degradación de CN⁻ se muestra a continuación:



2.6 Diseño CAD

El término CAD (Computer Aided Design o Diseño Asistido por Computador) define a una herramienta tecnológica de software computacional que hace posible crear, modificar, analizar y modelar en dos o tres dimensiones, con sus respectivos planos, diferentes piezas y elementos sencillos o complejos (Bonilla, 2003).

3. Metodología

Para cumplir con los objetivos propuestos en este trabajo se realizó la revisión bibliográfica de los temas referentes al proyecto tales como caracterización, concentración, pruebas de cianuración y diseño de planta, adicionalmente se llevaron a cabo las actividades y procesos que se mencionan a continuación:

3.1 Revisión Bibliográfica y Estudio de Antecedentes

Se realizó la revisión bibliográfica en bases de datos confiables de acceso libre como SciELO y de costo por visualización disponibles por la universidad como Springer y Science Direct. Además de investigaciones anteriores, libros, diseños de planta piloto y estudios anteriores

de caracterización mineralógica a minerales auríferos en distintas zonas mineras de Colombia. También se realiza cotización de los equipos en plataformas digitales de ventas como Alibaba y empresas privadas.

3.2 Muestreo y Caracterización de Minerales

El mineral proveniente de la zona minera del Cauca fue sometido a caracterización química, física y mineralógica con el fin de determinar las especies asociadas al mineral, sus características, la ocurrencia, distribución y tamaño del oro. Se llevó a cabo el ensayo al fuego para determinar el contenido de oro presente en el mineral, ensayo de difracción de rayos X (DRX) y fluorescencia de rayos X (FRX) para realizar el análisis químico elemental de los compuestos presentes en el mineral. La caracterización física se realizó mediante la determinación de la densidad aparente, ensayos granulométricos y pruebas de liberación de mineral.

3.3 Liberación de Minerales

Luego de la caracterización se llevó a cabo la trituración y molienda con el fin de reducir el tamaño y liberar el mineral. En primera instancia, se utilizó en conjunto una trituradora de mandíbulas y un molino de bolas cargado aproximadamente con 25 bolas de acero para reducir el tamaño del mineral. La medición de la distribución de tamaño de partícula se realizó mediante el análisis granulométrico, empleando la máquina Ro-Tap la cual proporcionó el movimiento de las partículas a través de las mallas debido al sacudimiento producido durante 16 minutos. El ensayo se efectuó con una serie de tamices ASTM malla N° 8-20-35-50-70-100-140-200 y se realizó una

segunda vez como remolienda con el fin de encontrar el 80% pasante para malla 70, requerida en la alimentación de mesa de sacudidas.

3.4 Pruebas de Concentración en Mesa Wilfley

Este proceso se realizó para separar las especies asociadas al mineral aprovechando la diferencia de densidades, la cual debe ser mayor a 2.5, y el movimiento relativo en el medio acuoso debido a las vibraciones que produce la mesa. El tamaño del mineral ensayado fue de 212 μm (pasante malla 70), la alimentación de mineral y agua se mantuvo en un régimen constante. El mineral fue separado en tres corrientes: concentrado, medios y colas. Se realizaron tres etapas de concentración *Rougher*, *Cleaner* y *Re-cleaner* respectivamente, donde el concentrado se pasó nuevamente en la mesa con el fin de obtener un producto con más contenido de oro libre. Finalmente, el contenido de cada corriente fue filtrado, secado, pesado y separado. El concentrado fue dispuesto para ensayo al fuego, los mixtos y colas fueron dispuestos para el proceso de cianuración por agitación. Cabe resaltar que las condiciones de operación fueron modificadas con el fin de repetir la prueba para obtener las mejores condiciones operacionales.

3.5 Pruebas de Cianuración por Agitación

En primer lugar, se realizó la remolienda de las colas y mixtos mediante un molino de anillos con el objetivo de obtener un tamaño óptimo de liberación de las partículas de oro (-106 μm) (Servicio Geológico Colombiano, 2018). Se prepararon dos muestras para la cianuración, mineral cabeza y colas más mixtos, siendo la última producto de la concentración en mesa; posteriormente,

se agregó agua hasta obtener un porcentaje de sólidos de 41.667%. Para acondicionar la pulpa se realizó la medida del pH, determinación de sales férricas y ferrosas para lo cual se agitó ambas pulpas durante 30 minutos, se tomó una alícuota de 50mL cada una y se añadió 1 mg de ferricianuro y ferrocianuro, al agregar los reactivos el líquido no mostró coloración lo que indicó ausencia de estas sales en el mineral. Luego de comprobar que no hay presencia de sales férricas o ferrosas, se adicionó el compuesto alcalinizante (cal) con el fin de ajustar el pH a un valor entre 10.5-11.5. Una vez realizado el acondicionamiento de la pulpa se realizaron los montajes de agitación en la campana de extracción de gases, se agregó cianuro según la concentración definida de 1 g/L (Ingeominas, 2010). La medición del pH se realizó al principio de la prueba y cada dos horas, una vez iniciada. La agitación tuvo un tiempo de 8 horas. A continuación, en la Tabla 1 se presentan las cantidades de cal y cianuro adicionadas durante el desarrollo del experimento.

Tabla 1.

Cantidad de reactivos añadidos para prueba de cianuración por agitación.

| Muestra | Sólidos (g) | Agua | Cal (g) | NaCN⁻ (g) |
|----------------|--------------------|-------------|----------------|-----------------------------|
| Mineral cabeza | 500 | 700 | 5 | 0.9 |
| Colas y mixtos | 100 | 140 | 1.3 | 0.4 |

3.6 Balance de Masa

Se realizó el balance de masa de cada una de las etapas del proceso de beneficio de minerales y el proceso hidrometalúrgico para la recuperación de oro, teniendo en cuenta los datos obtenidos en las pruebas realizadas anteriormente (Silvestr, 2014).

3.7 Tratamiento del Relave y Efluente

Se realizó el tratamiento del relave y efluente en menor medida (cantidad de agua que no retorna al proceso) con el fin de neutralizar el cianuro mediante la adición de peróxido de hidrógeno. Se agregó cal para ajustar el pH entre 10.5 y 11 y se agitó durante 2 horas. Durante el transcurso de la prueba se llevó a cabo la medición constante del pH de la solución y, una vez terminado el tratamiento, la solución fue filtrada y secada.

3.8 Diseño de Planta Mediante Software CAD

Teniendo en cuenta la capacidad de la planta piloto se realizó la cotización y el dimensionamiento de cada uno de los equipos necesarios. El diseño de la planta consta de las siguientes unidades: trituración y cribado, molienda, concentración gravimétrica en mesa de sacudidas, cianuración, precipitación mediante el proceso de Merrill Crowe y, adicionalmente el tratamiento de residuos. Se desarrolló un modelo 3D de la planta usando el software AutoCAD Plant 3D siguiendo el curso planteado en los circuitos 2D del balance de masa.

4. Resultados y Discusión

4.1 Muestreo y Caracterización del Mineral

Con el fin de determinar el contenido de oro del mineral se llevó a cabo el ensayo al fuego. Este procedimiento se llevó a cabo en el laboratorio de Pirometalurgia de la UIS y se obtuvo un tenor de oro de 24 g/ton y 69 g/ton Ag, lo cual es favorable económicamente debido a su alta ley de oro. El mineral tiene una densidad de 2.83 g/cm³.

El análisis químico elemental (FRX) realizado en el parque tecnológico de Guatiguará, determinó que el mineral predominante es el cuarzo ya que se halló en cada una de las muestras constituyendo un 38.9% del mineral aurífero analizado, seguido por las Arcillas las cuales se encuentran en un 16.5%, finalmente Pirita en un 10.4% y Sericita en un porcentaje del 7.9%. La composición del mineral procedente de la zona minera del Cauca es mostrada en la Tabla 2. El análisis de microscopía electrónica de barrido (SEM) por películas delgadas, evidenció que el mineral presenta oro libre en tamaños muy finos menores a 10 μm y se encuentra asociado a minerales como Pirita, Cuarzo, Telurita, Silvanita, entre otros minerales. Teniendo en cuenta los resultados mencionados anteriormente se considera viable realizar procesos de cianuración para la obtención del metal precioso ya que se obtienen altos porcentajes de recuperación.

Tabla 2.

Composición del mineral procedente de la zona minera del Cauca.

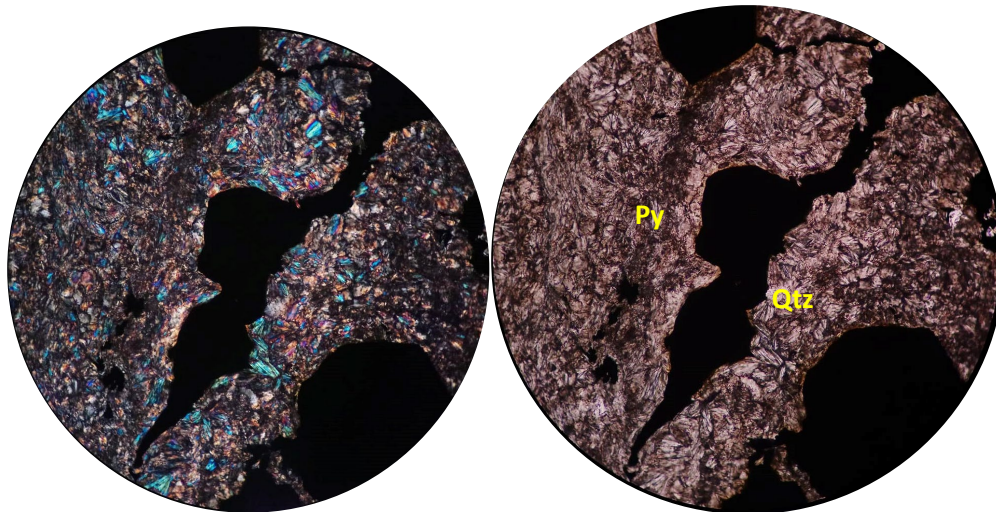
| <i>Mineral</i> | <i>Fórmula</i> | <i>Porcentaje (%)</i> |
|----------------|--|-----------------------|
| Cuarzo | SiO ₂ | 38.9 |
| Sericita | KAl ₂ (AlSi ₃ O ₁₀)(OH) ₂ | 7.9 |

| | | |
|---------------|--|------|
| Pirita | FeS_2 | 10.4 |
| Arcillas | $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ | 16.5 |
| Feldespato | $(\text{K}, \text{Na}, \text{Ca}, \text{Ba}, \text{NH}_4)(\text{Si}, \text{Al})_4\text{O}_8$ | 10.0 |
| Bornita | Cu_5FeS_4 | 5.7 |
| Calcopirita | CuFeS_2 | 5.1 |
| Covelita | CuS | 2.3 |
| Tierras raras | <i>La – Ce – Pr – Nd – Otras</i> | 3.2 |

En la Figura 1 se observa el análisis SEM realizado por sección de películas delgadas en la cual se evidencia una fracción de la muestra en la que predomina el cuarzo y la pirita. Se estima que el oro libre está asociado al cuarzo y el oro de tamaños finos menores a 10 micras se encuentra inmerso en la pirita.

Figura 1.

Análisis SEM de películas delgadas obtenidas en estereomicroscopio del parque tecnológico UIS Guatiguará.

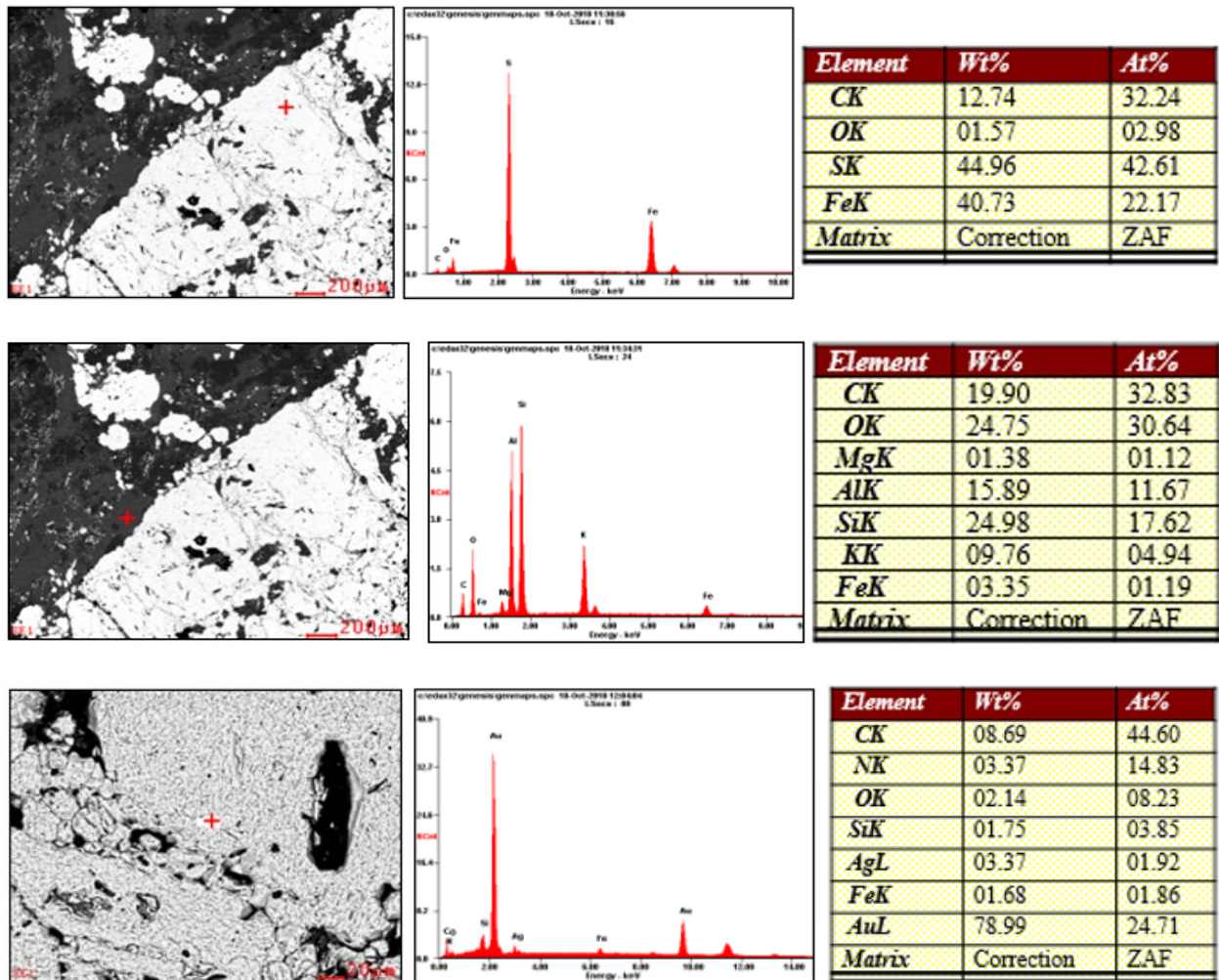


El espectro EDS mostrado en la Figura 2 hace referencia al punto indicado en la micrografía en donde se observa un grano de pirita con su respectiva composición química. La siguiente micrografía indica la presencia de aluminosilicatos en el mineral, se aprecian elementos

como Si, Al, Ca, Mg, entre otros, los cuales indican la presencia de cuarzo, feldespatos, arcillas y pirita, correspondientes a la ganga. Finalmente, se observa la composición química del grano mostrado en la micrografía en donde se evidencia la presencia de oro en un 78.99%.

Figura 2.

Espectro obtenido mediante la observación SEM-EDS del mineral proveniente del Cauca.



4.2 Liberación del Mineral

La reducción primaria fue realizada empleando una trituradora de mandíbulas Restch BB200. El proceso de liberación de minerales se llevó a cabo en vía seca usando un molino de bolas cargado con 25 bolas de acero, lo que permitió reducir el mineral hasta pasante Malla 60. El análisis de distribución de tamaño de partícula se realizó en un tiempo de 16 minutos a una muestra de 132.4 g, obtenida después de cuartear la muestra inicial de 2118.4 g cuatro veces y, de esta manera, obtener una porción representativa del mineral de estudio apta para el Ro-tap con su respectiva serie de tamices mostrada en el Apéndice A, Figura 22. La serie de tamices se presenta en la Tabla 3.

Tabla 3.

Serie de tamices ASTM

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

El registro de análisis por tamices se presenta en la Tabla 4 y Tabla 5, donde se evidencia la cantidad de material retenido en cada malla, así como la cantidad de material pasante con su respectivo porcentaje.

Tabla 4.

Registro de análisis granulométrico.

| N° de malla | Gramos retenidos | %Retenido | %Retenido acumulado | %Pasante |
|-------------|------------------|-----------|---------------------|----------|
| 8 | 41.8 | 31.57 | 31.57 | 68.43 |

| | | | | |
|-------|------|-------|-------|-------|
| 20 | 14.9 | 11.25 | 42.82 | 57.18 |
| 35 | 9.2 | 6.95 | 49.77 | 50.23 |
| 50 | 14 | 10.57 | 60.35 | 39.65 |
| 70 | 43.4 | 32.78 | 93.13 | 6.87 |
| 100 | 5.9 | 4.46 | 97.60 | 2.42 |
| 140 | 2.8 | 2.12 | 99.70 | 0.30 |
| 200 | 0.1 | 2.11 | 99.77 | 0.23 |
| Fondo | 0,3 | 0,23 | 100 | - |

En la Figura 3 se observa la distribución granulométrica para la molienda inicial del mineral cabeza, en la cual se evidencia un retenido del mineral aproximado de 32% en malla 8 (2360 μm), lo que indica una falta de tiempo en la molienda y no es óptima para la concentración en mesa. La molienda se efectuó durante 40 minutos.

Figura 3.

Análisis granulométrico.

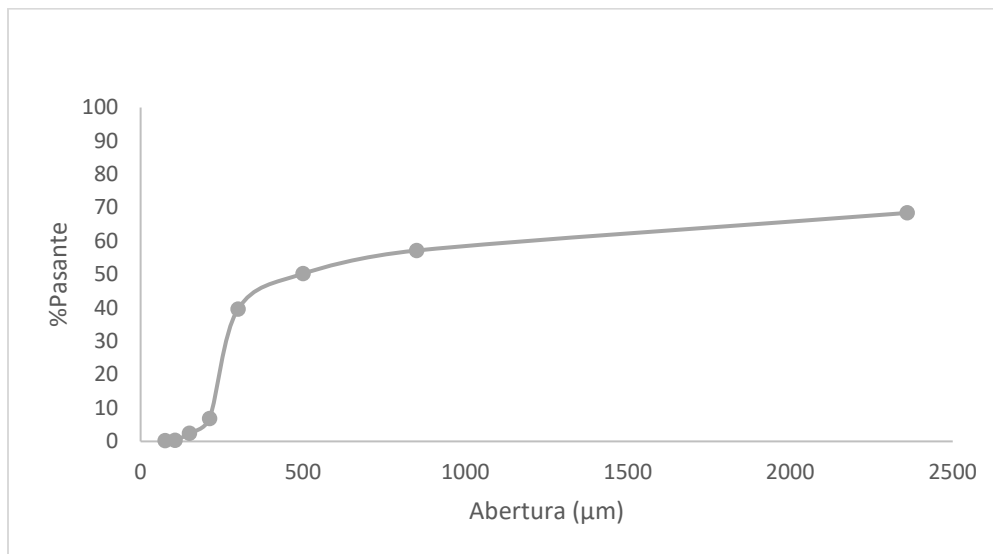


Tabla 5.

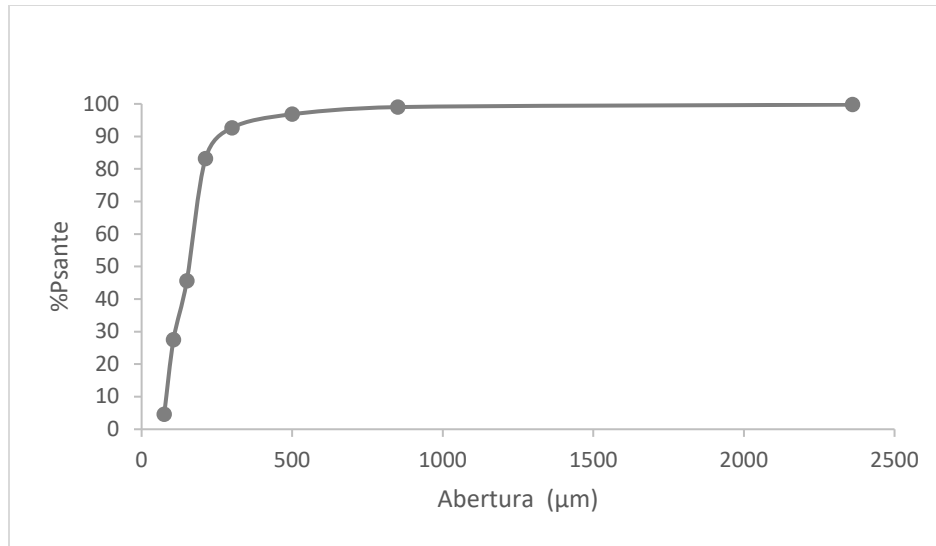
Registro del análisis granulométrico remolienda.

| Nº de malla | Gramos retenidos | %Retenido | %Retenido acumulado | %Pasante |
|-------------|------------------|-----------|---------------------|----------|
| 8 | 0.3 | 0.23 | 0.23 | 99.77 |
| 20 | 1 | 0.76 | 0.98 | 99.02 |
| 35 | 2.9 | 2.19 | 3.17 | 96.83 |
| 50 | 5.5 | 4.15 | 7.33 | 92.67 |
| 70 | 12.6 | 9.52 | 16.84 | 83.16 |
| 100 | 49.7 | 37.54 | 54.38 | 45.62 |
| 140 | 23.9 | 18.05 | 72.43 | 27.57 |
| 200 | 30.4 | 22.96 | 95.39 | 4.61 |
| Fondo | 6.1 | 4.60 | 100 | - |

La distribución granulométrica del material pasante se muestra en la Figura 4, se aprecia que el 80% del mineral (P80) es pasante malla 70 condición para una buena concentración en mesa (Yannopoulos, 1991). Ya que, se evita sedimentación por tamaño de partícula muy grande o un excesivo paso de mineral a colas y mixtos, por granulometría muy fina, lo cual se refleja en una ineficiente concentración. También, se aprecia una cantidad considerable de finos debido a la remolienda. El tiempo de remolienda es de una hora más lo cual da un total de 100 minutos de molienda.

Figura 4.

Análisis granulométrico remolienda.



4.3 Concentración en Mesa Vibratoria

En la Tabla 6 se muestran los resultados de cada etapa *Rougher*, *Cleaner* y *Re-Cleaner*

Tabla 6.

Resultados de pruebas en mesa de sacudidas.

| Etapa | Alimento (g) | Concentrado (g) | Colas y mixtos (g) | Flujo de agua (mL/s) |
|--------------|-------------------------|----------------------------|-------------------------------|---------------------------------|
| Rougher | 540 | 29.4 | 510.6 | 78 |
| Cleaner | 29.4 | 22.17 | 7.23 | 103 |
| Re-Cleaner | 22.17 | 15.42 | 6.75 | 100 |

4.4 Cianuración por Agitación

La cianuración se realizó a dos muestras; la primera muestra fue tomada del mineral cabeza y la segunda muestra corresponde a la suma de las colas y los mixtos obtenidos de las etapas

Rougher, Cleaner y Re-Cleaner del proceso de concentración gravimétrica. Ambas muestras cumplen tener pasante de malla No. 140 (106 micrones).

En la Tabla 7 se muestran los resultados de la cianuración y contenidos de cianuro total en sólidos y líquido de lavado para cada muestra de mineral sometido al proceso, mineral cabeza (A) y colas más mixtos (B). Los resultados obtenidos para A se tiene una mayor disolución de oro, 21 mg/L, respecto a la muestra B, esto se atribuye a que el mineral no ha sido concentrado en mesa de sacudidas, por tanto, posee una mayor cantidad de oro presente. Además, de que la muestra A tiene un peso 5 veces mayor que la muestra B. El contenido de cianuro total es muy elevado para ambos casos, esto hace necesario un tratamiento de residuos sólidos y desechos líquidos en la medida que no se pueda recircular el agua. Los límites permitidos de CN^- total en agua y sólidos se muestran en la Tabla 8.

Una vez realizado el proceso de cianuración descrito anteriormente, se procedió a realizar una revisión bibliográfica la cual tuvo como objetivo principal determinar los parámetros necesarios para llevar a cabo la recuperación del mineral de interés mediante el proceso de Merrill-Crowe. Teniendo en cuenta los resultados presentados en la Tabla 7, se concluye mediante estequiometría empleando la ecuación (3) que se deben emplear 0.325 g por cada gramo de oro disuelto.

Tabla 7.

Resultados de espectrofotometría de absorción atómica.

| Muestra | Sólidos CN⁻ (mg/Kg) | Lavado CN⁻ (mg/L) | Lechada Au (mg/L) |
|----------------|---|---|------------------------------|
| (A) | 82.5 | 65.3 | 0.80 |
| (B) | 179.0 | 45.2 | 0.59 |

Tabla 8.

Limites mínimos permitidos en Colombia.

| Iones | Matriz | Límite |
|-----------------------|--------|--------------|
| CN ⁻ Total | Aguas | 1.00 (mg/L) |
| CN ⁻ Total | Suelos | 1.00 (mg/Kg) |

Nota. Datos tomados de: (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2015)

4.5 Balance de Masa

Figura 5.

Balance de trituración para el beneficio de 100 TPD de mineral procedente del Cauca.

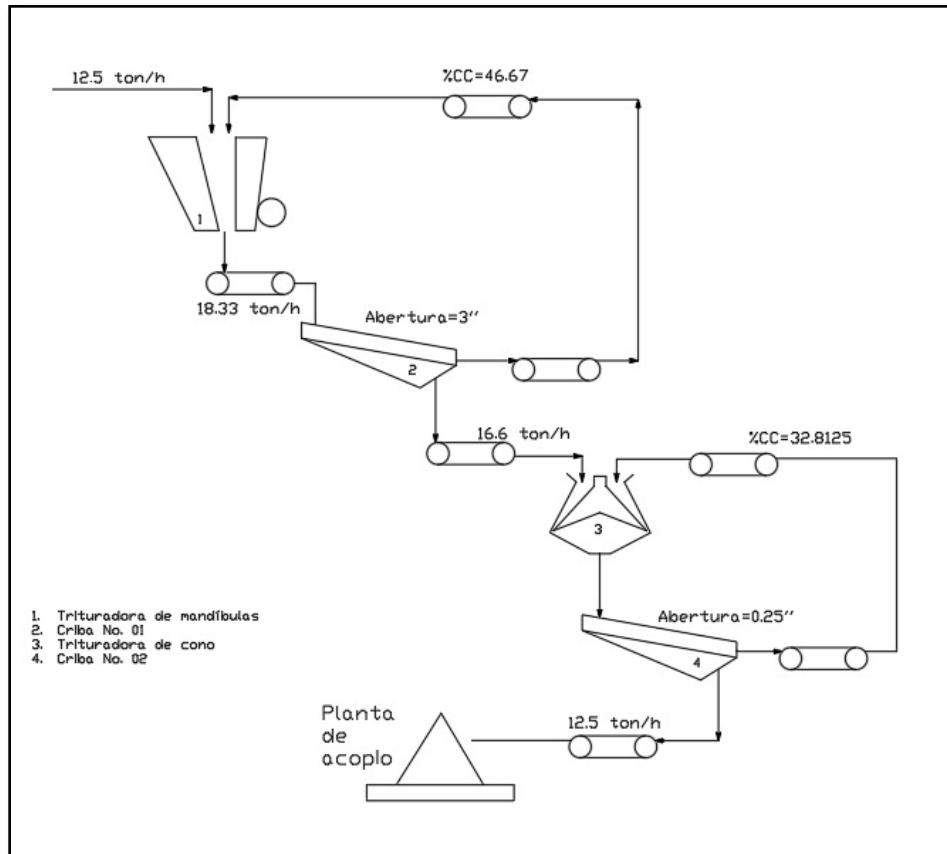


Figura 6.

Balance de molienda primaria para el beneficio de 100 TPD de mineral procedente del Cauca.

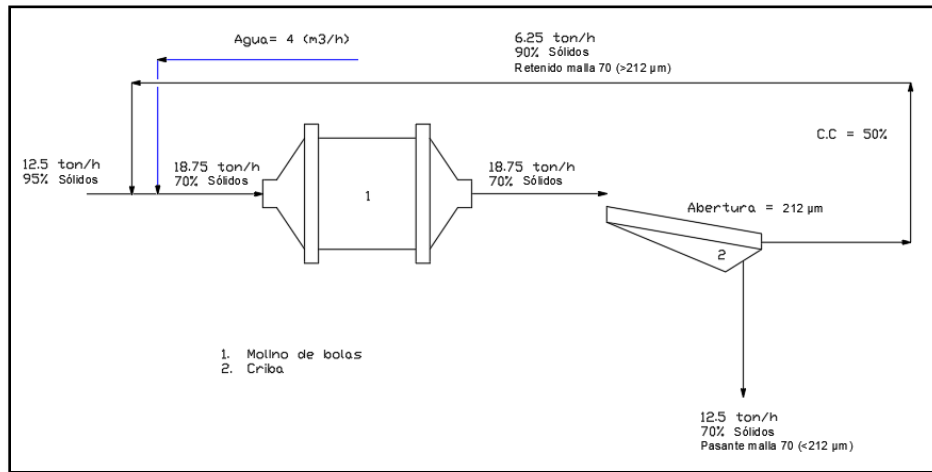


Figura 7.

Balance de concentración gravimétrica para el beneficio de 100 TPD de mineral proveniente del Cauca.

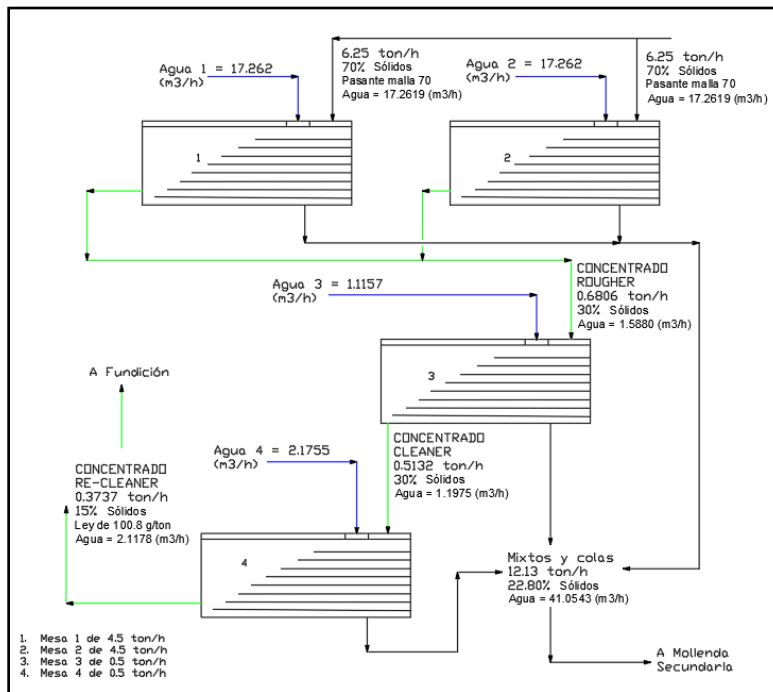


Figura 8.

Balance de molienda secundaria para el beneficio de 100 TPD de mineral procedente del Cauca.

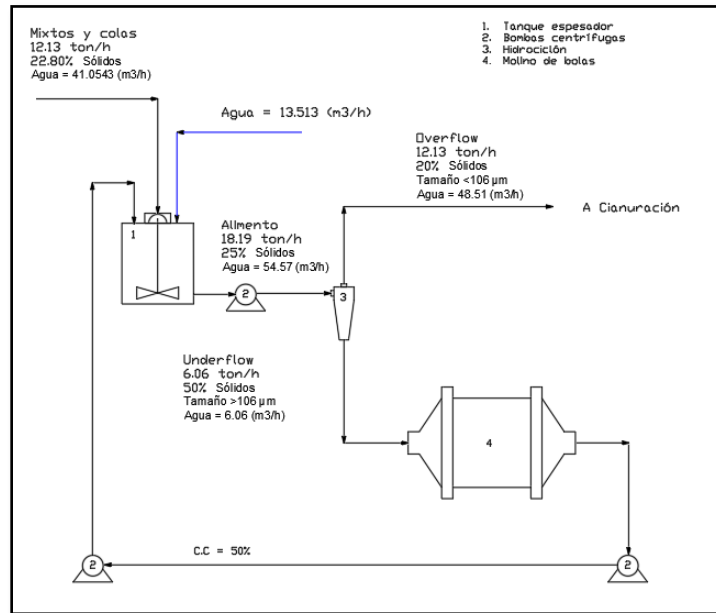


Figura 9.

Balance de cianuración en planta de 100 TPD de mineral procedente del Cauca.

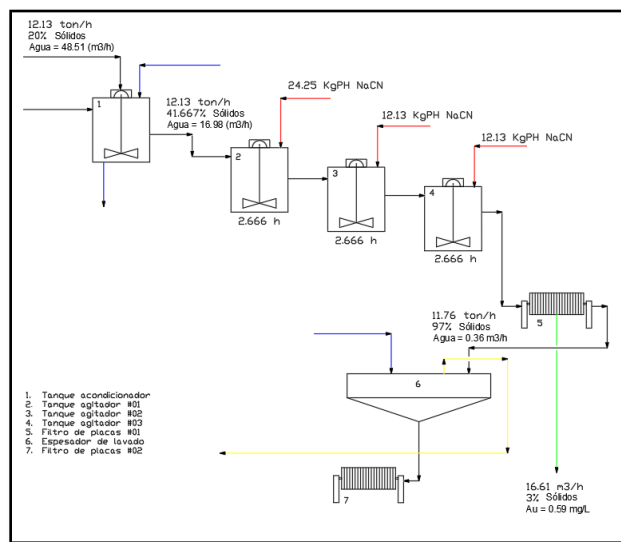


Figura 10.

Balance del proceso de Merrill-Crowe para planta de 100 TPD de mineral procedente del Cauca.

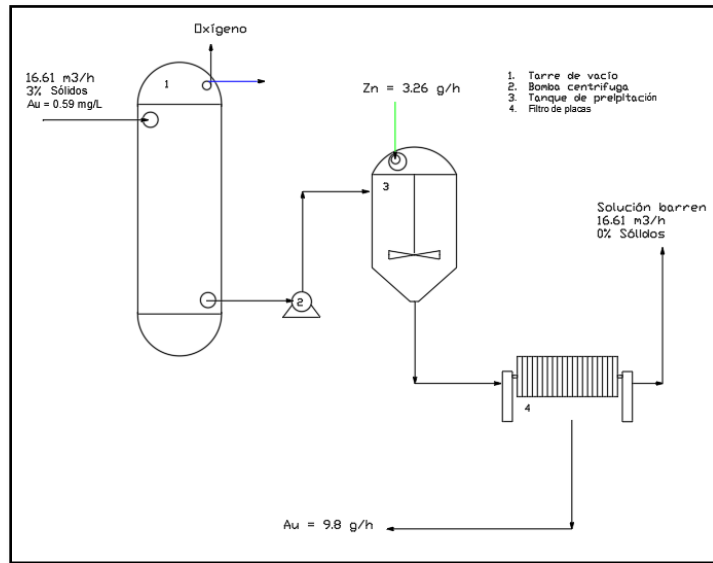
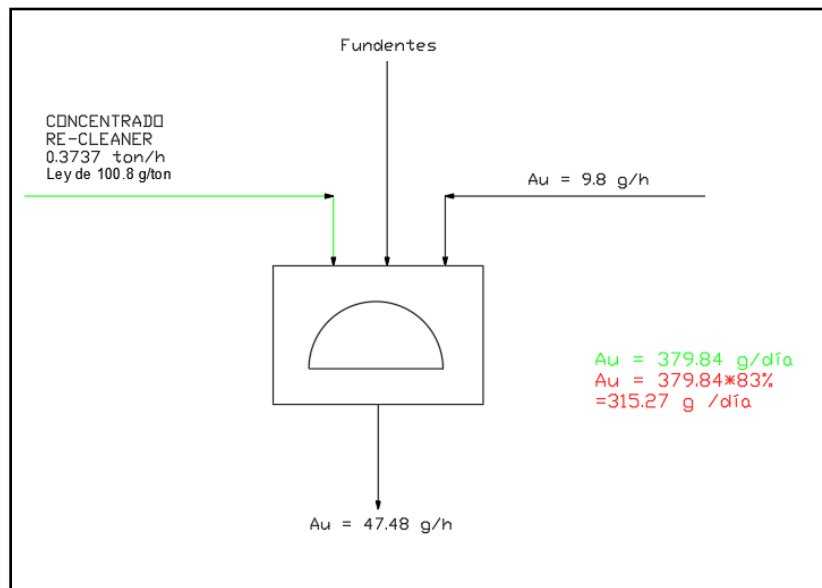


Figura 11.

Balance de fundición.



4.6 Tratamiento de Relave

Considerando el diseño de planta planteado anteriormente, se espera que el agua empleada en cada uno de los procesos pueda ser reutilizada con el fin de mitigar los daños ambientales y contribuir al desarrollo de la actividad minera en la zona del Cauca de forma sostenible. Sin embargo, al no ser posible reutilizar el 100% del agua de la planta se plantea realizar un tratamiento con peróxido de hidrogeno ya que permite oxidar los cianuros simples. Para este procedimiento, se propone usar un tanque de almacenamiento el cual debe ser alimentado con el reactivo teniendo en cuenta el valor del pH, el cual debe estar un rango entre 9.5 y 11 con el fin de evitar la hidrolisis del cianuro. Adicionalmente, el sistema de tratamiento de relave permanecerá monitoreada con el objetivo de evitar eventualidades que se puedan presentar en cuanto al almacenamiento de los relaves, para ellos se instalarán depósitos junto con puestos de control que permitan realizar el seguimiento. El tratamiento se realizará bajo el método Kastone empleando una solución de peróxido de hidrogeno al 50%. Los relaves deben ser previamente lavados con agua antes de realizar el tratamiento. Teniendo en cuenta estudios desarrollados anteriormente se estima que la cantidad de peróxido utilizada es de 3500ml H_2O_2 / kg CN^- y un tiempo de 4 horas. Es de resaltar que la cinética de la reacción se puede acelerar aumentando la temperatura del sistema (Gaviria & Meza, 2006).

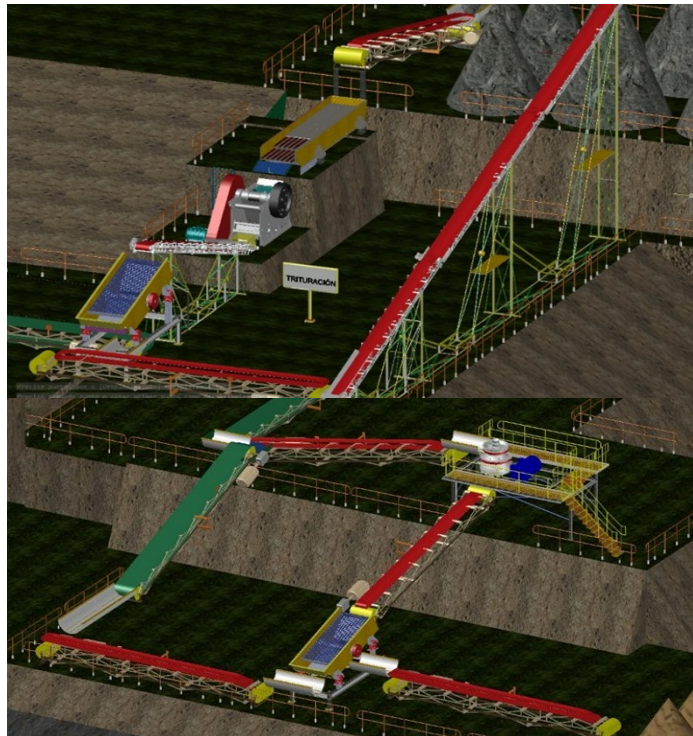
4.7 Descripción de Planta 3D

El diseño de planta 3D fue realizado usando el software AutoCAD Plant 3D, programa especial para el diseño de plantas industriales. El diseño consta de 7 circuitos de procesamiento

los cuales son trituración, molienda Primaria, concentración en mesa, molienda secundaria, cianuración, Merrill-Crowe y fundición, y el tratamiento de relaves. El diseño se dispone espacialmente de tal manera que se logre hacer la recirculación de mineral y soluciones acuosas contaminadas, sin que esta organización afecte el desarrollo los proceso. El mineral extraído de la mina se carga por medio de faja transportadora inclinada a un alimentador vibratorio, el cual se encarga de ingresar lentamente las rocas a la trituradora de mandíbulas. El producto pasa por la primer zaranda con abertura de 3'' el Overflow retorna a la trituradora de mandíbulas y el Underflow continua a la trituradora de cono, la cual es alimentada por otra faja transportadora inclinada donde el producto de esta trituración pasa por la segunda zaranda con abertura de 0.25'' dónde el Overflow retorna la a trituradora de cono y el Underflow sigue su curso a la planta de acopio. En la Figura 12 se muestra el diseño 3D del circuito de trituración.

Figura 12.

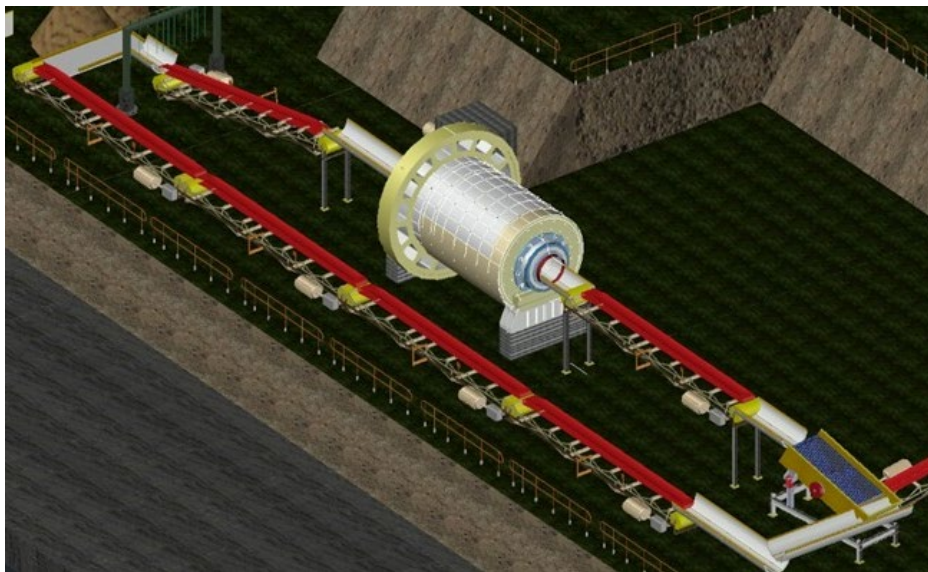
Diseño 3D del circuito de trituración.



La molienda primaria es el segundo circuito de la planta piloto y este recibe el mineral de la planta de acopio el cual ingresa al molino mediante faja transportadora y su producto es clasificado con una zaranda con abertura de $212\mu\text{m}$ (malla 70). El Overflow retorna al molino y el Underflow sigue al circuito de concentración gravimétrica en mesa de sacudidas. El diseño 3D para la molienda primaria se presenta en la Figura 13.

Figura 13.

Diseño 3D circuito de molienda primaria.

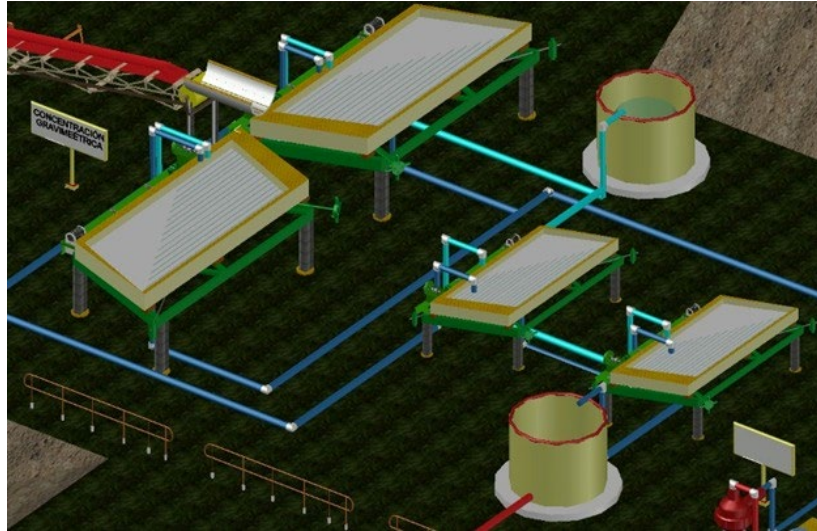


Para la concentración gravimétrica se tiene una alimentación directa desde la zaranda hacia dos mesas principales de mayor capacidad de procesamiento de mineral por hora para la etapa de *Rougher*. En esta etapa, el concentrado se une como una única corriente para alimentar a la tercer mesa, correspondiente a la etapa de *Cleaner* y, finalmente, el concentrado de la tercer mesa alimenta la cuarta y esta cuarta mesa cumple la etapa de *Re-Cleaner* para obtener un producto de

concentrado de oro. Las colas y mixtos de cada mesa se unen como una única pulpa y se envían a molienda secundaria. En la Figura 14 se aprecia diseño 3D.

Figura 14.

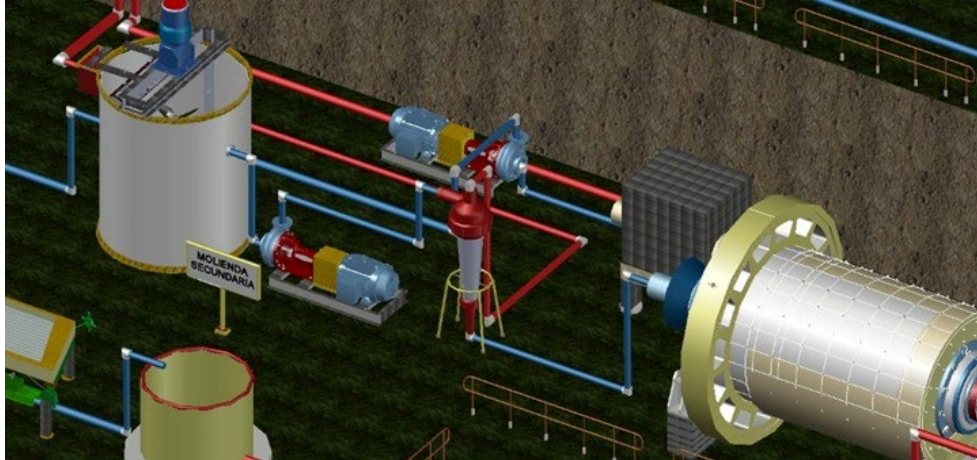
Diseño 3D circuito de concentración gravimétrica.



La pulpa ingresa a un tanque homogeneizador y este, a su vez, alimenta el hidrociclón donde el producto Overflow, pasante malla 140, alimenta al circuito de cianuración, mientras que el no pasante alimenta al molino para recircular a la clasificación en el ciclón. En la Figura 15 se aprecia la disposición de los equipos 3D en la molienda secundaria.

Figura 15.

Diseño 3D circuito de molienda secundaria.



La etapa hidrometalúrgica inicia con el alimento del Overflow procedente de la molienda secundaria, en la cual primero se acondiciona la pulpa y luego se procede a la lixiviación en tanque agitador, lo cual luego del tiempo estimado de agitación, la pulpa es filtrada y la lechada continua el camino hacia la cementación, mientras que los sólidos se alimentan por faja inclinada al espesador para hacer un lavado. El agua de lavado se recircula por tubería al primer tanque de cianuración como una solución Barren. La disposición del diseño 3D se observa en la Figura 16.

Figura 16.

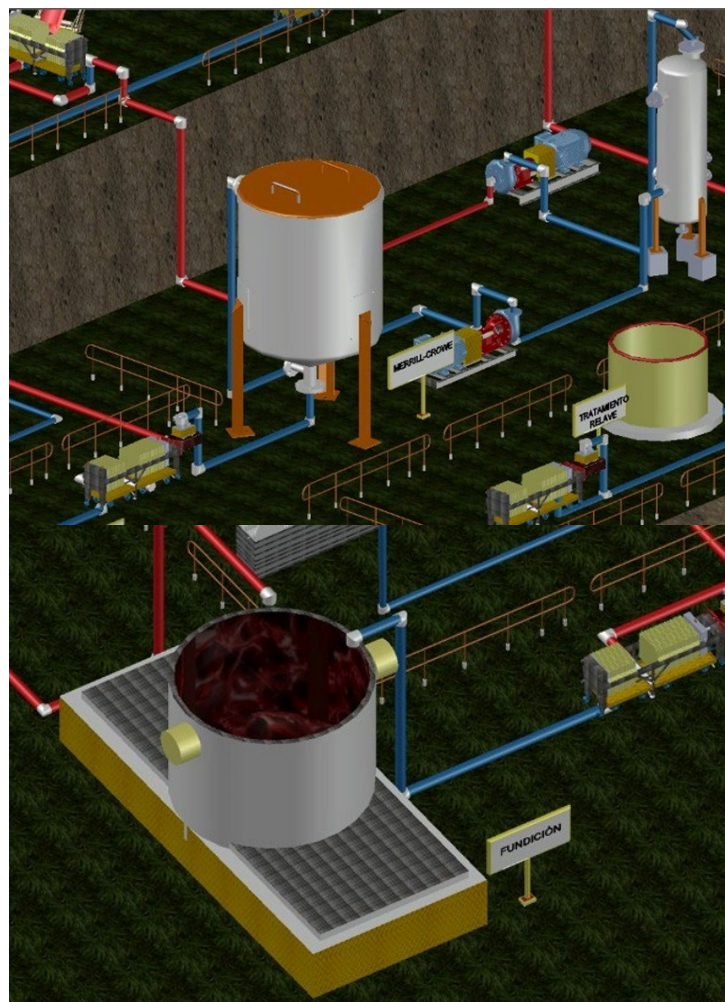
Diseño 3D circuito de cianuración.



La recuperación del metal de interés se lleva a cabo mediante el proceso de Merrill-Crowe, en el cual el alimento de solución preñada va hacia la torre desaireadora y, posteriormente a un tanque agitador cerrado para evitar la aireación de la solución y que esto inhiba la cementación. El producto sólido de la cementación se lleva al horno de crisol donde se funde el doré. El diseño 3D se observa en la Figura 17.

Figura 17.

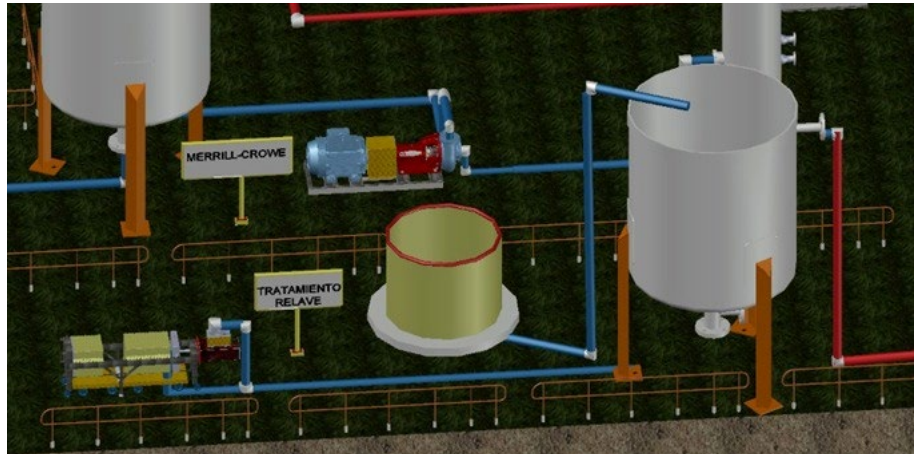
Diseño 3D circuito de Merrill-Crowe y fundición.



El tratamiento del relave se lleva a cabo mediante la adición de peróxido de hidrógeno para la destrucción por oxidación del cianuro libre. En la Figura 18 se aprecia la disposición de los equipos 3D.

Figura 18.

Diseño 3D circuito de tratamiento.



5. Conclusiones

La caracterización del mineral procedente del Cauca por medio del análisis mineralógico, ensayo al fuego y microscopía electrónica de barrido SEM-EDS determinó que está constituido en un 38.9% por cuarzo, 10.4% de pirita, 5.1% de calcopirita y 16.5% de arcillas. Se identificó la presencia de oro asociado a telurios metálicos en tamaños muy finos menores a 10 μm . Los telurios están incrustados en aluminosilicatos potásicos. El ensayo al fuego indicó que el mineral tiene una ley de 24 g/ton de Au y 69 g/ton de Ag.

El proceso adecuado para el beneficio del mineral se realizará mediante la liberación de partículas, concentración gravimétrica en mesa de sacudidas, cianuración y proceso de Merrill-Crowe con polvo de zinc logrando un porcentaje de recuperación del 83%. El proyecto es viable económicamente.

La planta piloto propuesta estima una producción de 100 toneladas por día e incluye la recirculación y recuperación de agua, además, el tratamiento de relaves empleando peróxido de hidrógeno como agente oxidante en el momento que se registren altas concentraciones de cianuro libre, de esta forma se mitigarían los posibles daños ambientales y se evidenciaría el enfoque de economía circular del proyecto.

6. Recomendaciones

Se realizaron pruebas de cianuración con un tiempo de 8 horas, sin embargo, se recomienda realizar pruebas a intervalos de tiempo más prolongados entre 16 y 24 horas para obtener mejores recuperaciones de mineral de interés.

El mineral presenta un contenido considerable de tierras raras (3.2%) que son muy costosas a nivel mundial. Se recomienda hacer estudios para posible explotación.

En la industria la precipitación con polvo de zinc es muy variable, por lo cual, se recomienda hacer distintas pruebas con el fin de determinar el consumo óptimo de polvo de zinc ya que en escala industrial suele ser entre 5 y 30 veces más que la cantidad estequiométrica (Ingeominas, 2010).

Hacer estudio de ingeniería del detalle con el fin de establecer criterios técnicos para el funcionamiento de la planta. Además, esto sirve para esclarecer costos económicos de los que se dio solo una aproximación en criterios mostrados en la Tabla 16, Apéndice D.

Referencias Bibliográficas

- Agencia Nacional de Minería. (1 de Junio de 2017). *Caracterización de la actividad minera departamental - Departamento del Cauca*. Obtenido de Agencia Nacional de Minería: https://www.anm.gov.co/sites/default/files/DocumentosAnm/bullets_cauca_01-06-2017.pdf
- Alibaba Group. (s.f.). *Productos personalizados*. Obtenido de https://spanish.alibaba.com/?src=sem_ggl&from=sem_ggl&cmpgn=8652583637&adgrp=88567887802&fditm=&tgt=aud-806308081856:kwd-14739453&locintrst=&locphyscl=1003666&mtchtyp=e&ntwrk=g&device=c&dvcmdl=&creative=605851850292&plcmnt=&plcmntcat=&p1=&p2=&acid=&posit
- Alipour, Yousef. (04 de 12 de 2011). *Grabcad Community*. Obtenido de <https://grabcad.com/library/cone-crusher>
- Bambole, A. (6 de Abril de 2020). *Conveyor belt with sorting mechanism*. Obtenido de <https://grabcad.com/library/conveyor-belt-with-sorting-mechanism-1>
- Bee. (5 de Octubre de 2022). *Water treatment tank*. Obtenido de <https://grabcad.com/library/water-treatment-tank-1>
- Bonilla, A. (01 de 2003). *Herramientas de diseño e ingeniería*. Obtenido de Bizkaia: https://www.bizkaia.eus/Home2/Archivos/DPTO8/Temas/Pdf/ca_GTcapitulo1.pdf?hash=689f30af5c2a6ad3dd5e585584d39a6b
- Cardona, A. J. (02 de Agosto de 2021). *Colombia: el 52 % de la explotación de oro de aluvión se da en áreas naturales protegidas*. Obtenido de

<https://es.mongabay.com/2021/08/colombia-explotacion-de-oro-de-aluvion-areas-naturales->

[protegidas/#:~:text=La%20producci%C3%B3n%20de%20oro%20en,los%202063%20d%C3%B3lares%20por%20onza.](https://es.mongabay.com/2021/08/colombia-explotacion-de-oro-de-aluvion-areas-naturales-#:~:text=La%20producci%C3%B3n%20de%20oro%20en,los%202063%20d%C3%B3lares%20por%20onza.)

Cotizacion real oro. (s.f.). *Precio oro Colombia*. Obtenido de <https://www.cotizacionrealoro.com/precio-oro-colombia>

Dmitriy. (10 de 04 de 2022). *Belt Conveyor with self-supported module frame, Конвейер ленточный с самонесущей рамой*. Obtenido de <https://grabcad.com/library/belt-conveyor-with-self-supported-module-frame-2>

Domic, E. (2001). *Hidrometalurgia: Fundamentos, procesos y aplicaciones*.

ERA Desing. (2 de Enero de 2017). *Thickener*. Obtenido de <https://grabcad.com/library/thickener-2>

Escobar, J. I. (2002). *Estudio comparativo de sistemas de lixiviación de oro en un agregado mineral de difícil cianuración*. Valle del Cauca : Universidad del valle.

Gaviria, A., & Meza, L. (07 de Mayo de 2006). Análisis de alternativas para la degradación del cianuro en efluentes líquidos y sólidos del municipio de segovia, antioquia y en la planta de beneficio de la empresa mineros nacionales, municipio de marmato, caldas. *Dyna rev.fac.nac.minas* 73 (149). Obtenido de Scielo: http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0012-73532006000200003#:~:text=Cianato%20y%20Amoniac,formato%2C%20y%2Fo%20carbonato

Gomis Yagües, V. (24 de 10 de 2008). *Espectroscopía de rayos X y electrónica*. Obtenido de Repositorio Institucional de la Universidad de Alicante: <http://hdl.handle.net/10045/8250>

Ingeominas. (2010). *Técnicas mineralógicas, químicas y metalúrgicas para la caracterización de menas auríferas*. Bogotá: Imprenta Nacional de Colombia.

Ingeominas. (2010). *Técnicas Mineralógicas, químicas y metalúrgicas para la caracterización de menas auríferas*. Bogotá.

Junior, N. (15 de Septiembre de 2021). *Vibrating screen 2*. Obtenido de <https://grabcad.com/library/vibrating-screen-2-1>

Khan, S. (05 de Octubre de 2022). *Vacuum Drayer*. Obtenido de <https://grabcad.com/library/vacuum-draye-1>

López, B. S. (30 de 08 de 2019). *¿Qué es el diseño y distribución en planta?* Obtenido de Ingeniería Industrial online: <https://www.ingenieriaindustrialonline.com/diseño-y-distribución-en-planta/que-es-el-diseño-distribución-en-planta/>

Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. (17 de 03 de 2015). Emserchia. Bogotá, Colombia. Obtenido de <http://www.emserchia.gov.co/PDF/Resolucion631.pdf>

Ministerio de Minas y Energía. (2010). *Técnica mineralógicas, químicas y metalúrgicas para la caracterización de menas auríferas*. Bogotá: Imprenta Nacional de Colombia.

Misnaza, F. A. (2006). *Precipitación de oro en solución mediante el proceso Merrill Crowe*. Santiago de Cali: Universidad del Valle.

nhv12. (22 de Agosto de 2021). *6x5x14 Inline 75 HP*. Obtenido de <https://grabcad.com/library/6x5x14-inline-75-hp-1>

Obaida, A. (31 de 03 de 2019). *Tank 1.2cdm with agitator and jacket*. Obtenido de <https://grabcad.com/library/tank-1-2cdm-with-agitator-and-jacket-1>

SENA. (1992). *Programa modular: procesamiento de minerales auroargentíferos*. . Convenio Universidad Nacional de Colombia-Cimex-Mineralco-Sena.

- Servicio Geológico Colombiano. (2018). Guía metodológica para el mejoramiento productivo del beneficio de oro sin el uso de mercurio. Bogotá, Colombia. Obtenido de https://www.minenergia.gov.co/documents/7140/guia-mejoramiento-productivo-beneficio-oro-sin-mercurio-suarez-buenosaires-tam_tQzIsA5.pdf
- Silvestr, S. (5 de Junio de 2014). *Vibration feeder GZD1100x4900*. Obtenido de <https://grabcad.com/library/jaw-crusher-900x1200-1>
- Timperio, L. (4 de Noviembre de 2011). *Grabcad Community*. Obtenido de <https://grabcad.com/library/plate-filter-press>
- UPTC. (2018). *Caracterización, beneficio y usos potenciales de minerales estratégicos del departamento de Boyacá*. Tunja: Editorial UPTC.
- Valdivieso, A., Amaya, A., Rangel, S., & Reyes, J. (10 de 1999). *Concentracion gravimetrica centrifuga de oro y plata. suimplementacion en el circuito de molienda en minera el pilon.concentracion gravimetrica centrifuga de oro y plata. suimplementacion en el circuito de molienda en minera el pilon*. Obtenido de ResearchGate: https://www.researchgate.net/publication/326493725_CONCENTRACION_GRAVIMETRICA_CENTRIFUGA_DE_ORO_Y_PLATA_SU_IMPLEMENTACION_EN_EL_CIRCUITO_DE_MOLIENDA_DE_MINERA_EL_PILON
- Ventocilla, J. (s.f.). *JVS Ingenieros SAC*. Obtenido de <http://www.jvsingenieros.com/>
- Yannopoulos, J. C. (1991). *The Extractive Metallurgy of Gold*. Springer Nueva York, NY.

Apéndice

Apéndice A. Liberación del mineral.

Figura 19.

Mineral procedente de la zona mineral del Cauca.



Figura 20.

Molienda de mineral cabeza.



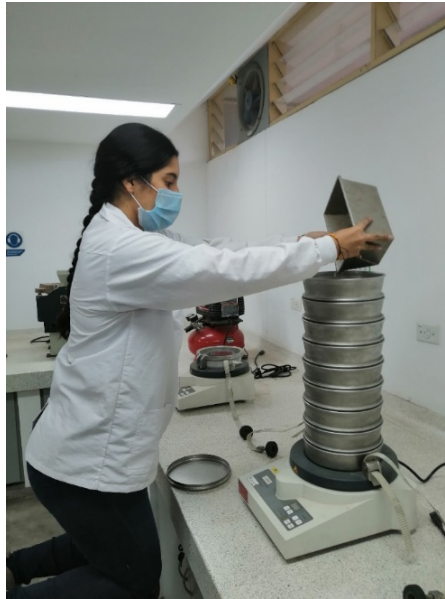
Figura 21.

Montaje experimental para análisis granulométrico.



Figura 22.

Proceso de granulometría de mineral cabeza.



Apéndice B. Concentración gravimétrica en mesa de sacudidas.

Figura 23.

Mesa de sacudidas Wilfley.



Figura 24.

Etapa de concentración Rougher.

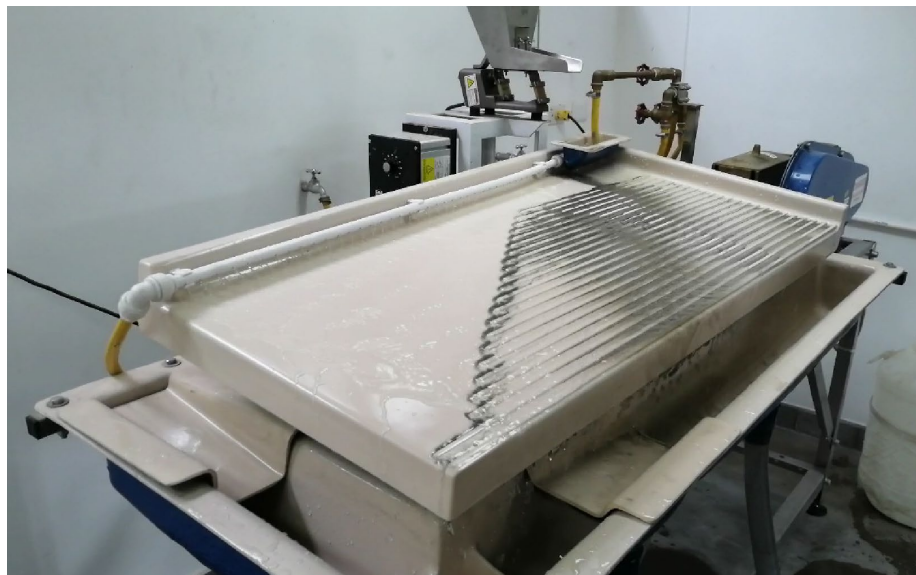
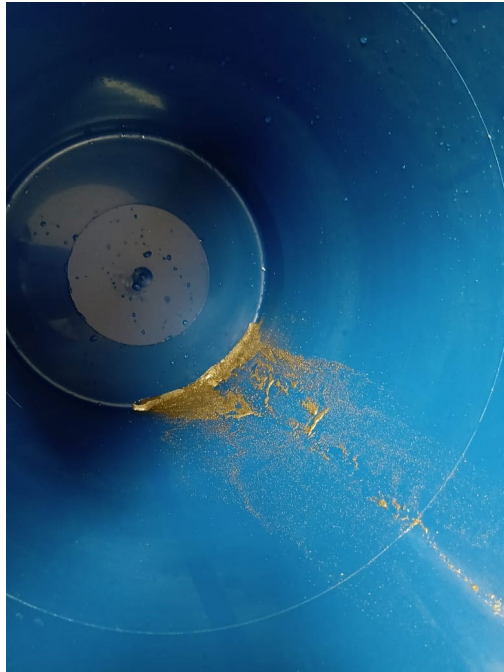


Figura 25.

Concentrado de etapa Re-Cleaner.



Apéndice C. Cianuración.

Figura 26.

Muestras de mineral pasante malla 100 para cianuración por agitación a 8 horas.

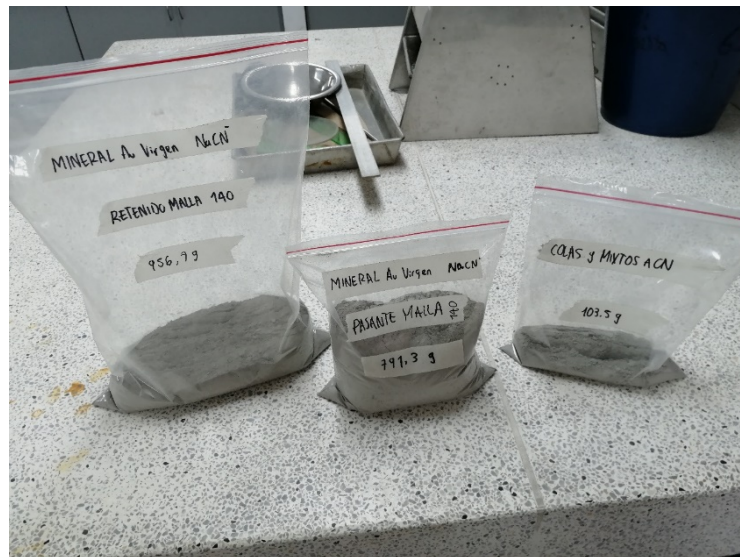


Figura 27.

Muestra de mineral cabeza, 500 gramos.

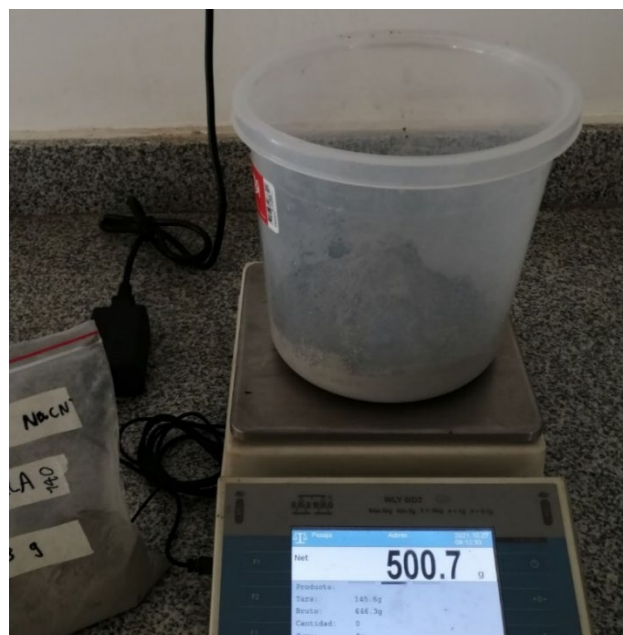


Figura 28.

Muestra de colas y mixtos de las 3 etapas de concentración, 100 gramos.



Figura 29.

Montaje experimental de agitación para determinación de presencia de sales férricas y/o ferrosas.



Figura 30.

Reactivos usados para determinación de sales presentes.



Figura 31.

Cal y NaCN usados para lixiviación por agitación.



Figura 32.

Montaje experimental de cianuración por agitación en campana de extracción.



Apéndice D. Factibilidad económica del proyecto.

Con el fin de conocer la viabilidad económica del proyecto se hace un balance de costos de los equipos principales, auxiliare, insumos, gastos de adaptación del terreno, entre otros. En las tablas se incluyen los parámetros de los equipos principales planteados para el diseño de la planta de cianuración en la zona minera del Cauca.

En la Tabla 9 se mencionan las unidades utilizadas para realizar la reducción de tamaño del mineral.

Tabla 9.

Parámetros técnicos de los equipos primarios de trituración y molienda.

| Can t | Equipo | Modelo | Tamaño Máx. de Entrada (mm) | Tamaño de Salida (mm) | Capacida d (t/h) | Potencia de Motor (kW) | Medid a L x W x H (mm) | Precio (US) |
|-------------------|---|----------------------|--|--------------------------------------|---------------------|---------------------------------|---------------------------------|----------------|
| 1 | Trituradora de Mandíbula | ZGP 400X600 | 350 | 40 - 100 | 14 - 36 | 30 | 1716 x 1736 x 1653 | 3000 |
| 1 | Alimentado r Vibratorio de Mandíbula | ZSW- 960x380 0 | 500 | - | 120 - 210 | 11 | 3850 x 1950 x 1630 | 3000 |
| 1 | Trituradora de Cono | PYB600 | 75 | 12 - 15 | 20 - 40 | 30 | 2234 x 1370 x 1675 | 3500 |
| 2 | Molino de Bolas | MQGg 1536 | Diámetro del Cilindro 1500 | Longitud cilindro 3600 | 3-11 | 110 | 8595 x 3185 x 2280 | 10000 |
| Tota l | | | | | | | | 29500 |

Nota. Datos tomados de (Alibaba Group, s.f.)

En la Tabla 10 se presenta las especificaciones y precio de las mesas requeridas para la concentración gravimétrica.

Tabla 10.

Parámetros técnicos de las mesas para concentración gravimétrica.

| Cant. | Equipo | Modelo | Tamaño Máx. de Entrada (mm) | Frecuenci a (rpm) | Capacida d (t/h) | Potencia de Motor (kW) | Medid a L x W x H (mm) | Precio (US) |
|--------------|----------------------------------|---------------|--|------------------------------|-----------------------------|---|---|------------------------|
| 2 | Mesa de Sacudidas grandes | 4LYG | 2 | 270 - 360 | 5 – 6.5 | 1.5 | 6330 x 2450 x 2660 | 9900 |
| 2 | Mesa de Sacudidas pequeñas | LY3000 | 2 | 210 - 360 | 0.6 – 1.5 | 1.1 | 4130 x 1680 x 860 | 2000 |
| Total | | | | | | | | 23800 |

Nota. Datos tomados de (Alibaba Group, s.f.)

En la Tabla 11 se presentan las especificaciones de los equipos auxiliares que son requeridos para el almacenamiento y transporte del mineral.

Tabla 11.*Equipos auxiliares de la planta de cianuración para el transporte y almacenamiento.*

| Cant. | Equipo | Velocidad de Cinta (m/s) | Capacidad (m³/h) | Ancho (mm) | Inclinación (°) | Precio (US) |
|--------------|--|---------------------------------|--|---|---|--------------------|
| 15 | Cinta Transportadora de Alta Inclinación | 0.3 – 1.6 | 25 - 138 | 500 | Ajustable | 2000 |
| 4 | Bomba de Lodos | | Cabeza Máx. 118m, Promedio 60m | Flujo máx. (m³/h) 3798 | Rango de Dimensiones 500 – 350 (mm) | 1000 |
| - | Tubería al espesador | | Fabricante Proveedor local | | | 1000 - |
| - | Tubería al aireador | | Proveedor local | | | 10000 |
| Total | | | | | | 44000 |

Nota. Datos tomados de (Alibaba Group, s.f.)

A continuación, se describen los parámetros técnicos de la zaranda vibratoria la cual es usada para clasificar el mineral proveniente de los procesos de trituración y molienda.

Tabla 12.*Parámetros técnicos de los equipos empleados para la clasificación del mineral.*

| Cant. | Equipo | Modelo | Tamaño Máx. Alimentación (mm) | Tamaño de Malla (mm) | Capacidad (t/h) | Potencia de Motor (kW) | Frecuencia Vibración | Precio (US) |
|--------------|----------------------------------|--------|-------------------------------|----------------------|-----------------|------------------------|----------------------|-------------|
| 3 | Zaranda Vibratoria de Eje Simple | ZD1530 | 100 | 40 - 100 | 90-270 | 5.5 | 850 | 2000 |
| Total | | | | | | | | 6000 |

Nota. Datos tomados de (Alibaba Group, s.f.)

En la Tabla 13 se presentan los parámetros técnicos del hidrociclón como capacidad, diámetro de Vortex, diámetro de Apex, entre otros factores.

Tabla 13.*Parámetros técnicos del hidrociclón.*

| Cant. | Equipo | Modelo | Tamaño de División (µm) | Diámetro de Vortex (mm) | Capacidad (m ³ /h) | Diámetro de Apex (mm) | Presión de Entrada (MPa) | Precio (US) |
|-------|-------------|----------|-------------------------|-------------------------|-------------------------------|-----------------------|--------------------------|-------------|
| 1 | Hidrociclón | XC I 450 | 100 | 100 - 150 | 90 - 192 | 30 - 70 | 006 – 0.15 | 10000 |

Nota. Datos tomados de (Alibaba Group, s.f.)

Los equipos principales, equipos auxiliares e infraestructura necesaria para el circuito de Cianuración -Merril Crowe se menciona en la Tabla 14.

Tabla 14.*Equipos principales del circuito de Cianuración – Merrill Crowe.*

| Cant. | Equipo | Modelo | Volumen Efectivo (m³) | Velocidad Impulsor (r/min) | Modelo de Motor | Potencia (KW) | Diámetro (mm) | Precio (US) |
|--------------|---|------------------|---|---|--|------------------------------|---------------------------------|--------------------|
| 2 | Tanque agitador/ acondicionador | BJ – 3000 X3000 | 14.8 | 210 | Y225S - 8 | 18.5 | 700 | 5000 |
| 1 | Espesador de Depuración | 2NZS8 | Profundidad (m) 6.08 | Zona de Sedimentación (m²) 100.7 | Revolución (r/min) 0.28 | Potencia (KW) 4 | Diámetro (mm) 8000 | 1900 |
| 4 | Filtro Prensa de Diafragma con Alta Presión | KZG20 0/ 15000-U | Área Filtro (m²) 200 | Dimensión diafragma (mm) 1500X1500 X90 | Presión Filtro (MPa) 0.5 – 1.6 | Capacidad (t/h) 24 | Espesor Placa (mm) 45 | 9900 |
| 3 | Tanques de Cianuración | SJ 4.0X6.0 | Volumen Efectivo (m³) 70 | Diámetro del Impulsor (mm) 1750 | Velocidad (r/min) 33 | Potencia (KW) 11 | Peso (Kg) 9200 | 5000 |
| 1 | Horno Fundición | LJL112 140 | Profundidad (mm) 300 | Presión Aire (Pa) 3920-7845 | Consumo Aire (m³/h) 115-164 | Carga (Kg) 230 | | 2000 |
| 1 | Equipo de precipitación | | | | | | | 56800 |
| Total | | | | | | | | 125300 |

Nota. Datos tomados de (Alibaba Group, s.f.)

Para poder realizar el montaje de la planta se requiere la infraestructura que se describe en la Tabla 15.

Tabla 15.*Infraestructura principal para el montaje de la planta.*

| Infraestructura Requerida | Ejecutor | Material | Proceso | Área | Precio (US) |
|----------------------------------|-----------------|-----------------|----------------|-------------------|--------------------|
| Base tanques de cianuración | Local | Mortero | Fraguado | 10 m ² | 1680 |
| Base de Horno Fundición | Local | Mortero | Fraguado | 10 m ² | 1000 |
| Total | | | | | 2680 |

Nota. Datos tomados de (Alibaba Group, s.f.)

El diseño de la planta de cianuración de 100 TPD se requieren las inversiones que se mencionan a continuación.

- **Inversiones Fijas**

Hace referencia a los equipos e infraestructura que se adquiere en la etapa inicial del proyecto y se utilizan durante el desarrollo de este. Este tipo de inversión está sujeta a la devaluación de la maquinaria, infraestructura, vehículos de transporte, entre otros. Los análisis realizados previos a la ejecución del proyecto y durante el desarrollo de este como estudios de factibilidad, investigaciones, diseños, pruebas de laboratorio, entre otros, también constituyen las inversiones fijas del proyecto. En la Tabla 16 se mencionan las inversiones fijas de la planta. La energía se estima como el 8% del costo total de equipos principales y auxiliares, terrenos el 15%, organización % e imprevistos

Tabla 16.*Inversiones fijas de la planta.*

| Inversión | Precio (US) |
|---------------------------------------|--------------------|
| Equipos principales | 188600 |
| Equipos auxiliares | 50000 |
| Infraestructura (Obras civiles) | 2680 |
| Energía (8% equipos) | 19088 |
| Terrenos (15% equipos) | 35790 |
| Organización (5% equipos) | 11930 |
| Imprevistos (10% de costo de equipos) | 23860 |
| Total | 331948 |

Nota. Datos tomados de (Ventocilla, s.f.)

- **Capital de Trabajo**

En la Tabla 17 se presenta el capital de trabajo que debe tener la empresa para atender las necesidades operativas en un periodo de un año en base al valor total de la planta.

Tabla 17.*Capital de trabajo necesario primer año.*

| Inversión | Precio (US) |
|--|--------------------|
| Suministros (7% de equipos) | 16702 |
| Insumos (8% de equipos) | 19088 |
| Personal (10% equipos) | 23860 |
| Gastos administrativos (5% de equipos) | 11930 |
| Imprevistos (14% de equipos) | 33404 |
| Total | 1004984 |

Nota. Datos tomados de (Ventocilla, s.f.)

- **Ingresos**

Teniendo en cuenta los productos que se generarán en la Planta de Cianuración, se prevé los ingresos que se mencionan en la Tabla 18.

Tabla 18.

Ingresos anuales de la Planta de Cianuración.

| Producto | Precio oro 18k (US) | Gramos producidos al día | Ganancias al año |
|-----------------|----------------------------|-------------------------------------|-------------------------|
| Oro (18k) | 39.64 | 315.27 | 4499029 |

Nota. Dato de precio de oro tomado de (Cotizacion real oro, s.f.)