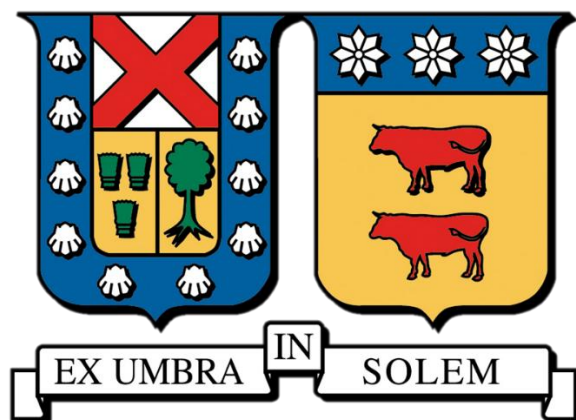


UNIVERSIDAD TÉCNICA FEDERICO SANTA MARÍA
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA METALÚRGICA Y DE
MATERIALES



**UNIDAD PORTÁTIL DE MUESTREO Y CARACTERIZACIÓN DE
MINERALES PARA EMPRENDIMIENTOS DE PEQUEÑA MINERÍA**

Pedro Ignacio Romero Gutierrez

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO PROFESIONAL DE INGENIERO CIVIL DE
MINAS

Profesor Guía:

Víctor Encina M.

Enero, 2025

*“Cree en ti mismo y en lo que eres. Sé consciente de que hay algo
dentro de ti que es más grande que cualquier obstáculo”*

Christian D. Larson

Agradecimientos

En primer lugar, quiero expresar mi más profundo agradecimiento a mi familia, quienes han sido mi pilar fundamental a lo largo de este desafiante proceso universitario. A mi madre, por su incondicional amor, dedicación y por siempre velar por mi bienestar, tanto emocional como físico. A mi hermana, por ser mi compañera, confidente y apoyo constante.

A mi pareja, María Ignacia, quien ha estado a mi lado en todo momento, brindándome su apoyo constante, acompañándome en los momentos más difíciles y recordándome siempre que no estoy solo. Su amor y aliento han sido esenciales para que hoy pueda llegar hasta aquí.

A los académicos de la universidad, especialmente al Profesor Marcelo, quien con paciencia y dedicación me orientó en el laboratorio, resolviendo mis dudas y enseñándome más allá de lo estrictamente académico. Y al Profesor Víctor, quien no solo me entregó la oportunidad de desarrollar este trabajo de titulación, sino que también estuvo siempre dispuesto a guiarme, responder mis preguntas y compartir sus conocimientos, tanto técnicos como personales.

Quiero agradecer también a todas las personas que hicieron de mi experiencia universitaria algo inolvidable. A mis compañeros de clases, quienes compartieron este viaje conmigo, y a los integrantes de la selección de vóley, quienes me enseñaron la importancia del trabajo en equipo, la disciplina y la perseverancia, valores que han sido fundamentales para alcanzar mis metas.

Finalmente, agradezco a todas aquellas personas que, de una u otra forma, me brindaron su ayuda, apoyo o palabras de aliento en cualquier momento de mi vida universitaria. Cada uno de ustedes ha dejado una huella en mi vida y en este importante logro.

Resumen

La pequeña minería enfrenta diferentes limitaciones tecnológicas y económicas para la caracterización y recuperación de metales preciosos, como lo es el oro, lo que restringe su capacidad para operar de manera eficiente y rentable. Este trabajo presenta el diseño, fabricación y validación de un procedimiento de química analítica para el oro, adaptado a las condiciones de la pequeña minería, proponiendo una alternativa accesible a los métodos tradicionales utilizados en los laboratorios certificados.

El procedimiento incluye la preparación mecánica del mineral mediante la molienda en un molino de barras, obteniendo una granulometría inferior a 300 μm , ideal para facilitar el contacto entre los reactivos químicos y el material. Posteriormente, se implementaron tratamientos químicos basados en la cloración, ajustes controlados de pH y potencial electroquímico, seguido de etapas para la recuperación del oro metálico. Los procesos incluyeron la utilización de reactivos, como ácido nítrico, agua regia y sulfito de sodio para el manejo de impurezas y residuos adicionales formados durante el análisis.

En el desarrollo experimental, se realizaron comparaciones entre los valores obtenidos y las concentraciones teóricas, analizando los errores absolutos y relativos en cada muestra. Asimismo, se evaluaron las desviaciones en las muestras que contenían precipitados adicionales, incluyendo compuestos metálicos como óxidos de hierro y cobre, los cuales complicaron el análisis en ciertas etapas. Adicionalmente, se consideró un análisis económico comparativo, demostrando que el procedimiento puede realizarse con un costo significativamente menor al de los laboratorios, haciendo uso de insumos químicos accesibles.

El trabajo establece un enfoque práctico y económico para el análisis de oro, con potencial de implementarlo en el contexto de la pequeña minería, evaluando tanto los desafíos técnicos como las oportunidades para su validación y mejora.

PALABRAS CLAVES: Oro, pequeña minería, agua regia, cloración, análisis químico, molino de barras, recuperación de metales, costos de análisis.

Abstract

Small-scale mining faces significant technological and economic limitations in the characterization and recovery of precious metals, such as gold. These challenges restrict its efficiency and profitability. This study presents the design, implementation, and validation of an analytical chemistry procedure for gold, tailored to the conditions of small-scale mining. It proposes an accessible alternative to traditional methods commonly used in certified laboratories.

The procedure involves mechanical preparation of the ore using a rod mill, achieving a particle size smaller than 300 μm , which facilitates optimal contact between chemical reagents and the material. Subsequently, chemical treatments based on chlorination, controlled adjustments of pH and electrochemical potential, and stages for recovering metallic gold were implemented. The process included the use of reagents such as nitric acid, aqua regia, and sodium sulfite for managing impurities and additional residues generated during the analysis.

During the experimental phase, comparisons were made between the obtained values and theoretical concentrations, analyzing absolute and relative errors for each sample. Furthermore, deviations in samples containing additional precipitates, including metallic compounds like iron and copper oxides, were assessed. Additionally, a comparative economic analysis demonstrated that this procedure can be conducted at a significantly lower cost than certified laboratory methods, using accessible chemical inputs.

This work establishes a practical and cost-effective approach to gold analysis with potential implementation in the context of small-scale mining. It evaluates both the technical challenges and the opportunities for its validation and improvement.

KEYWORDS: Gold, small-scale mining, aqua regia, chlorination, chemical analysis, rod mill, metal recovery, cost analysis.

Nomenclatura

- Au : Oro, elemento químico con numero atómico 79.
- Cl^- : Ion cloruro.
- Na_2SO_3 : Sulfito de sodio.
- HCl : Ácido clorhídrico.
- H_2O_2 : Peróxido de hidrógeno.
- Fe_3O_4 : Magnetita, óxido de hierro con propiedades magnéticas.
- pH : Potencial de hidrógeno, medida de acidez o alcalinidad de una solución.
- mV : Milivoltios, unidad para medir el potencial eléctrico.
- UF : Unidad de fomento, índice monetario chileno ajustado a la inflación.
- CLP : Peso chileno, moneda oficial de Chile.

Glosario

- **Ácido nítrico (HNO_3):** Reactivo químico utilizado para disolver metales y eliminar impurezas.
- **Agua regia:** Mezcla de ácido nítrico y ácido clorhídrico en proporción 1:3, capaz de disolver oro y platino.
- **Calcinación:** Proceso de calentamiento a alta temperatura para eliminar compuestos volátiles y obtener residuos metálicos.
- **Chancado:** Etapa de reducción mecánica del tamaño del mineral para facilitar procesos posteriores.
- **Granulometría:** Distribución de tamaños de partículas en un material molido.
- **Pequeña minería:** Sector minero que opera con volúmenes reducidos de extracción y procesamiento, generalmente con tecnologías más básicas
- **Potencial redox:** Medida del potencial de oxidación-reducción en una solución, expresada en milivoltios.
- **Precipitado:** Sólido que se forma y separa de una solución química.
- **Titulación argentométrica:** Método de análisis químico que utiliza nitrato de plata para medir la concentración de cloruros en una solución.
- **ICP-OES:** Técnica analítica avanzada utilizada para detectar elementos en una muestra.
- **ICP-MS:** Método sensible para medir elementos en concentraciones bajas.
- **XRD:** Difracción de rayos X, una técnica para determinar estructuras cristalinas.
- **XRF:** Fluorescencia de rayos X, utilizada para análisis elemental.
- **SEM:** Microscopía electrónica de barrido, un método para estudiar la morfología de materiales.

Índice

1.	Introducción	1
1.1	Objetivos.....	2
1.1.1	Objetivo general	2
1.1.2	Objetivos específicos.....	2
1.2	Alcances	2
2.	Marco Teórico	3
2.1	Métodos actuales utilizados en la industria minera	4
2.2	Cloración de oro	6
3.	Metodología	10
3.1	Preparación mecánica del mineral.....	10
3.2	Proceso de cloración del mineral aurífero	11
3.2.1	Materiales y reactivos.....	11
3.2.2	Preparación de la pulpa.....	12
3.2.3	Generación de gas cloro	13
3.2.4	Proceso de cloración.....	14
3.2.5	Recolección de la solución de Cloruro de Oro	14
3.2.6	Determinación y eliminación del cloro disuelto.....	15
3.2.7	Ajuste del potencial y pH de la solución	17
3.2.8	Filtración de la solución y recolección del precipitado de oro	18
3.2.9	Calcinación para obtener el oro metálico	18
4.	Desarrollo	19
4.1	Preparación mecánica del mineral.....	19
4.1.1	Proceso de Chancado.....	19

4.1.2	Proceso de Molienda	20
4.2	Proceso de Cloración	24
4.2.1	Preparación de la Pulpa	26
4.2.2	Generación de Gas Cloro.....	27
4.2.3	Sistema para la generación y uso del gas cloro	28
4.2.4	Cálculo y eliminación del Cloro disuelto	30
4.2.5	Ajuste de pH y potencial Redox	34
4.2.6	Filtración y calcinación	35
4.3	Análisis de costos asociados al procedimiento.....	38
4.3.1	Costos equipos principales	38
4.3.2	Costos implementos.....	39
4.3.3	Costos reactivos.....	40
4.3.4	Costo por muestra.....	41
5.	Resultados y análisis	43
5.1	Análisis inicial del mineral	43
5.2	Concentración teórica	43
5.3	Diseño experimental	43
5.4	Resultados experimentales	43
5.5	Error absoluto	44
5.6	Error relativo	45
5.7	Recuperación de oro	45
5.8	Análisis de muestras con valores mayores al esperado	46
5.9	Tratamientos adicionales para separar los precipitados	46
5.10	Presencia de hierro en el mineral tratado.....	47
5.11	Análisis económico	48

6.	Conclusiones	50
6.1	Recomendaciones	51
7.	Referencias	53
8.	Anexos.....	54
8.1	Datos para los cálculos de la cantidad de sulfito	54
8.2	Plano 1, recipiente de la pulpa.....	55
8.3	Plano 2, sujetador de manguera.....	56
8.4	Plano 3, conector de manguera.....	57
8.5	Características del chancador manual.....	58
8.6	Características del molino de barras.....	59

Lista de Figuras

Figura 1: Proceso de cloración.	8
Figura 2: Chancador Manual, con sus 2 partes.....	20
Figura 3: Molino de barras.	21
Figura 4: Barras de acero del molino de barras.	21
Figura 5: VDF del molino de barras.....	21
Figura 6: Grafico Curva Granulométrica.....	23
Figura 7: Recipiente de la pulpa.	25
Figura 8: Soporte de manguera.....	25
Figura 9: Conector entre mangueras.....	25
Figura 10: Pulpa.	26
Figura 11: Puesta en escena del proceso de gas cloro.	28
Figura 12: Proceso cloración del mineral.	29
Figura 13: Proceso de separación de la pulpa.....	30
Figura 14: proceso de titulación.	31
Figura 15: Solución con el indicador (se torna color amarillo).....	32
Figura 16: Punto de reacción de la titulación.	33
Figura 17: Proceso de eliminación de cloro.	34
Figura 18: Proceso de incremento de pH y Potencial.....	35
Figura 19: Ultimo proceso del análisis.	36
Figura 20: Papel filtro, con producto final.	36
Figura 21: Filtros en crisoles, antes de la calcinación.	37
Figura 22: Horno de calcinación.	37
Figura 23: Oro metálico obtenido.....	45
Figura 24: Solución con agua regia y precipitado.	47
Figura 25: Proceso de construcción chancador.	58
Figura 26: Proceso construcción 1 molino de barras.....	59
Figura 27: Proceso construcción 2 molino de barras.....	60
Figura 28: Proceso construcción 3 molino de barras.....	60
Figura 29: Proceso construcción 4 molino de barras.....	61

Lista de Tablas

Tabla 1: Análisis granulométrico	22
Tabla 2: Costos de fabricación de equipos principales.....	38
Tabla 3: Implementos utilizados en el análisis químico y sus costos.....	39
Tabla 4: Reactivos químicos utilizados.	40
Tabla 5: Costo de reactivos por muestra.	41
Tabla 6: Resultados experimentales, pesos finales y sus errores asociados.	44
Tabla 7: Datos de cantidad de sulfito de sodio.	54
Tabla 9: Medidas del chancador manual.	58
Tabla 8: Medidas de molino de barras.....	59

1. Introducción

La minería es la actividad económica más importante para el desarrollo de Chile, aportando al PIB un aproximado del 11.9 %, desempeñando un papel en el crecimiento económico y en la generación de empleo. Dentro de este sector, la pequeña minería ocupa un lugar especial, no solo por su contribución económica local, sino también por su impacto social en comunidades alejadas de los grandes centros urbanos. Sin embargo, la pequeña minería enfrenta grandes desafíos relacionados con la falta de acceso a tecnologías avanzadas para la caracterización de minerales y la optimización de procesos extractivos (Domeyko, 2022).

Actualmente, la pequeña minería opera en gran medida bajo condiciones que dificultan la evaluación precisa del contenido mineralógico de las menas extraídas. La falta de herramientas de análisis eficientes y accesibles provoca que los pequeños mineros trabajen “a ciegas”, lo que afecta directamente a la calidad y el precio de los minerales comercializados. Esta limitación no solo disminuye la rentabilidad de sus operaciones, sino que perpetua la dependencia de intermediarios, quienes frecuentemente imponen condiciones desventajosas para la venta de sus productos.

El desarrollo de herramientas y procedimientos para la caracterización de minerales en la pequeña minería no solo permite mejorar la precisión en la evaluación del contenido de metales preciosos, como el oro, sino que también habilita procesos más eficientes y sostenibles para su recuperación. La implementación de metodologías simple, pero efectivas, adaptadas a las necesidades y capacidades de los pequeños mineros, representa una oportunidad para democratizar el acceso a tecnologías y fortalecer este sector.

1.1 Objetivos

1.1.1 Objetivo general

Diseñar una unidad de análisis de muestras y caracterización de minerales en laboratorio para emprendimientos de pequeña minería.

1.1.2 Objetivos específicos

- Definir y validar procedimiento estándar de:
 - Toma de especímenes de la muestra geológica.
 - Preparación mecánica de especímenes de la muestra.
 - Análisis de leyes por química analítica de especímenes de la muestra.
- Diseñar y construir los equipos y herramientas para muestreo y análisis de leyes en terreno.

1.2 Alcances

Este trabajo se enfoca en el diseño, implementación y validación de un procedimiento de análisis de química analítica para la recuperación de oro, adaptado a las condiciones técnicas y económicas de la pequeña minería. El estudio considera tanto aspectos experimentales, como el uso de reactivos accesibles y equipos básicos, como lo es el molino de barras, así como un análisis económico comparativo con métodos tradicionales. Si bien el enfoque principal es la recuperación de oro, los resultados también abren la posibilidad de aplicar el método en otros contextos similares, permitiendo su adaptación a minerales de diversa composición y características.

2. Marco Teórico

En la actual industria minera chilena, se distinguen tres categorías de actores: la pequeña, mediana y gran minería, clasificadas según su nivel de producción, de acuerdo con ENAMI. La gran minería es aquella que produce 5 000 t o más diariamente, la mediana son los que venden o procesan hasta 10 000 t mensuales, mientras que la pequeña minería abarca a productores que alcanzan una producción mensual de hasta 10 000 t. Por otra parte, desde el punto de vista del servicio medio ambiental, la pequeña minería se define como aquella que produce hasta 5 000 t mensuales, ya que aquí no requiere de un estudio de impacto ambiental para operar. (Gerencia de Investigación y Desarrollo, 2014)

La pequeña minería representa un porcentaje bajo de la producción minera del país, sin embargo, desde una perspectiva social, el número de pequeñas mineras que existen en Chile asciende a miles, destacando su importancia económica y social. Este sector ha sido y sigue siendo esencial para las distintas regiones del país, ya que genera un gran aporte tanto a la economía local, como al ámbito social, contribuyendo significativamente para el desarrollo del ecosistema minero nacional. (Comisión Chilena del Cobre, 2023)

La pequeña minería es una actividad de larga historia y tradición en nuestro país, no obstante, los pequeños mineros enfrentan dificultades significativas, entre las cuales se encuentra la exploración y caracterización del mineral que comercializan.

La falta de exploración implica que trabajan “a ciegas,” sin conocer con precisión la ubicación de los yacimientos. Además, al no caracterizar el mineral, terminan vendiendo “piedras” cuyo contenido, calidad y valor real se desconocen. Esta situación afecta el precio de venta, y se agrava cuando el lugar de comercialización se encuentra lejos del yacimiento, ya que, en muchos casos, las ganancias apenas alcanzan para cubrir el costo del transporte.

A esta situación se suma la limitada capacidad de los pequeños mineros para acceder a métodos de análisis avanzados que permitirían una caracterización del mineral con mayor precisión. La falta de acceso a tecnología de análisis preciso, como espectrometría de masas o difracción de rayos X, restringe su conocimiento sobre la composición exacta y las concentraciones de metales valiosos en sus muestras. Estas técnicas, habituales en operaciones mineras a gran escala, están fuera del alcance de la pequeña minería debido a su alto costo y a los requerimientos técnicos especializados, lo que agrava la dependencia de intermediarios y reduce las posibilidades de obtener un precio justo por sus productos. Así, la ausencia de herramientas para evaluar con precisión el mineral no solo limita el valor de venta, sino que también perpetúa una cadena de valor ineficiente y desfavorable para los pequeños mineros.

La caracterización precisa de los minerales extraídos es necesario para poder determinar la cantidad y calidad de los metales presentes, lo cual impacta directamente en su valor en el mercado. En las operaciones mineras de gran escala, esta evaluación se realiza mediante técnicas analíticas avanzadas que proporcionan información detallada sobre la composición mineralógica y química del material. Según Skoog, Holler y Crouch (2017), estas técnicas destacan por su precisión y sensibilidad, pero requieren equipos especializados y personal capacitado, lo que limita su disponibilidad para los pequeños mineros. A continuación, se describen algunos de los métodos utilizados actualmente en la industria y las diferentes razones por las que estos no son accesibles para la pequeña minería.

2.1 Métodos actuales utilizados en la industria minera

- **Espectrometría de absorción atómica (AAS)**

Este método es ampliamente utilizado para determinar la concentración de metales en soluciones. Según Harris (2015), este método mide la cantidad de luz absorbida por los átomos, la cual es proporcional a la concentración de los elementos presentes en la muestra. Aunque es una técnica precisa, el equipo necesario es costoso y requiere de

gases y reactivos especiales, además de personal capacitado, lo que limita su accesibilidad para los pequeños mineros.

- **Espectrometría de emisión óptica con plasma acoplado inductivamente (ICP-OES)**

Permite analizar múltiples elementos en una muestra a la vez y es altamente preciso. Según Skoog, Holler y Crouch (2017), en este método, la muestra se introduce en un plasma de alta temperatura, donde los elementos emiten luz a longitudes de onda específicas, que son detectadas y cuantificadas. Este método es útil en la minería para detectar metales, pero el costo elevado de los equipos y los requerimientos de infraestructura, como el suministro constante de gas argón, limitan su uso en la pequeña minería.

- **Espectrometría de masas con plasma acoplado inductivamente (ICP-MS)**

Este método es considerado uno de los más sensibles y precisos, ya que permite detectar elementos en concentraciones extremadamente bajas, en el rango de partes por billón (ppb, por sus siglas en inglés). Skoog, Holler y Crouch (2017) destacan su utilidad en la caracterización de metales preciosos, aunque su alto costo y requerimientos técnicos hacen que sea inaccesible para la pequeña minería.

- **Difracción de rayos X (XRD)**

Es utilizada para determinar la composición mineralógica de una muestra mediante patrones de difracción, identificando las fases cristalinas presentes. Esto permite entender la mineralogía y los elementos en diferentes fases, lo cual influye en los procesos de extracción y recuperación. Sin embargo, el equipo utilizado en este método es caro, requiere de un mantenimiento especializado y su operación e interpretación demanda personal capacitado. (Cullity y Stock, 2001)

- **Fluorescencia de rayos X (XRF)**

Es una técnica utilizada para el análisis elemental, especialmente útil para detectar elementos pesados en el mineral. Aunque Harris (2015) menciona que los equipos

portátiles hacen la técnica más accesible, los modelos de alta precisión siguen siendo costosos, lo que obliga a los pequeños mineros a depender de métodos menos precisos.

- **Microscopía electrónica de barrido (SEM)**

Permite observar la morfología del mineral a nivel microscópico y realizar análisis elementales en puntos específicos. Reed (2005) señala que esta técnica es invaluable para estudiar inclusiones metálicas y asociaciones de metales preciosos, aunque su alto costo y requerimientos técnicos la hacen inalcanzable para la pequeña minería.

La falta de acceso a estas técnicas avanzadas limita significativamente la capacidad de los pequeños mineros para evaluar con precisión el valor de sus minerales. Al no contar con la tecnología adecuada, dependen de métodos tradicionales, que son menos precisos y fiables, o de intermediarios que imponen precios desfavorables. Esta situación perpetua una cadena de valor injusta, en la cual no pueden acceder a precios justos por sus productos, afectando su rentabilidad y su capacidad para invertir en mejoras para sus procesos de producción.

La cloración del oro es un método de extracción que permite disolver el oro de las menas mediante la aplicación de gas cloro, transformándolo en un cloruro soluble en agua. Este proceso fue desarrollado como alternativa a otros métodos tradicionales, especialmente para tratar minerales refractarios que no responden bien a técnicas convencionales como la cianuración. A continuación, se describe el procedimiento y las etapas del proceso de cloración, desde la generación del gas hasta la recuperación del oro metálico.

2.2 Cloración de oro

- **Objetivo:**

- El propósito del proceso es transformar el oro presente en el mineral en **cloruro de oro ($AuCl_3$)** soluble en agua, sometiendo el mineral aurífero a la acción de gas cloro. Por ende, esto facilita la separación del oro de otros componentes presentes en la mena (material que contiene el mineral de interés).

- **Preparación de la Mena y el sistema de cloración**

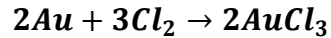
- **Preparación de la mena:** Se debe humedecer la mena generando una pulpa (con agua destilada) alcanzando un 60 % en peso aproximadamente, esto para facilitar el contacto uniforme del gas cloro con el mineral. Ayudando que el gas reaccione eficientemente con el oro, consiguiendo que se forme cloruro de oro.
- Luego la pulpa se coloca en unas vasijas de barro, de 62 centímetros de altura y 40 de diámetro, cuyo fondo forma un embudo que se llena de arena, para que así sirva de filtro para retener las partículas sólidas y permitir que la solución fluya hacia el fondo. Bajo cada una de estas vasijas se coloca un cubo de metal de 14 litros de capacidad para recoger la disolución.
- El gas se produce en castañas de barro, en las cuales se coloca una mezcla de peróxido de manganeso y ácido clorhídrico, y que se calientan en un baño de arena. De las castañas salen tubos de plomo que conducen el gas a vasijas en las que se lava, y desde las cuales sale a los aparatos donde está la mena, introduciéndose en ellos por un agujero colocado en la parte inferior del embudo.

- **Producción del gas cloro (Cl₂)**

- El gas cloro es producido mediante una reacción química en castañas de barro, donde estas son resistentes al calor. En estas castañas, se coloca una mezcla de peróxido de manganeso (MnO₂) y ácido clorhídrico (HCl), que se calienta en un baño de arena para controlar la temperatura y evitar cambios bruscos.
- Reacción química:
$$MnO_2 + 4HCl \rightarrow MnCl_2 + 2H_2O + Cl_2$$
- Este gas cloro se canaliza mediante tubos de plomo, ya que el plomo es resistente a la corrosión del cloro. Donde el gas es transportado a través de un sistema de lavado de gases para así eliminar impurezas, asegurando que el gas sea en su forma más pura.

- **Reacción del cloro con el oro en la pulpa**

- El gas cloro entra en contacto con el oro presente en la pulpa y reacciona para formar cloruro de oro ($AuCl_3$), el cual es soluble en agua:



- Esta solubilización es requerida para el proceso, ya que permite que el cloruro de oro pase a la fase líquida. Se deja que obre gas sobre ella por a lo menos de 5 a 6 horas. Para luego dejar en reposo por un día aproximadamente, así después filtrarlo a través de la arena en el fondo de la vasija.

- **Recolección de la solución de cloruro de oro.**

- La solución se recoge en un cubo de metal ubicado debajo de cada vasija de barro. Lavando esta pulpa con agua templada unas cuatro veces. Donde el lavado de una carga empieza siempre con el agua obtenida en el último lavado. El cloruro de oro formado se disuelve y cae a la vasija inferior. La solución obtenida es la que contiene el oro en forma soluble, separada de las impurezas solidas de la pulpa.

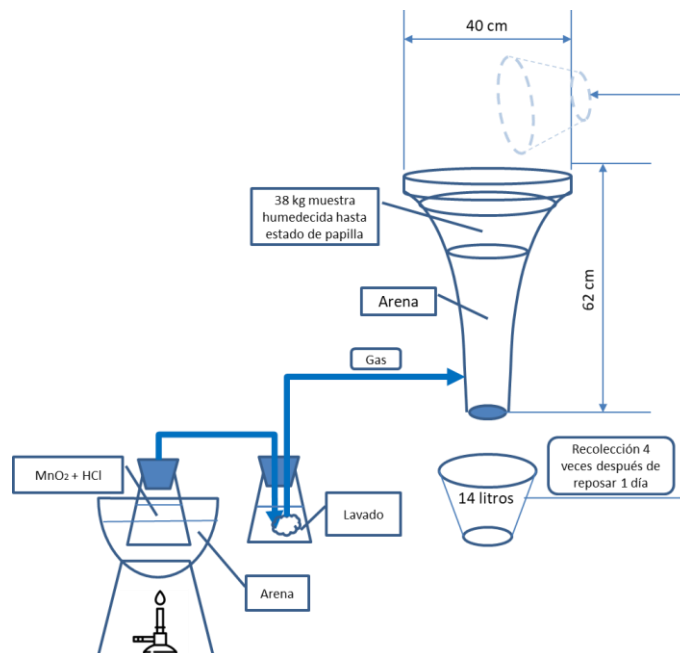
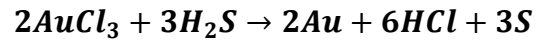


Figura 1: Proceso de cloración.

- **Recuperación del Oro metálico**

- El cloruro de oro disuelto en la solución se expone al gas hidrógeno sulfurado, que actúa como un agente reductor y precipita el oro.



- Durante esta reacción, el oro se reduce a su forma metálica y precipita como un polvo negro, que es rico en oro. El azufre elemental (S) también se genera como subproducto.
- Luego el polvo negro se recolecta en filtros de papel. Donde posteriormente es secado y calcinado. Durante este proceso, cualquier impureza inorgánica del filtro se quema, y el oro se obtiene en su forma metálica pura.

3. Metodología

La metodología empleada en este estudio tiene como objetivo replicar y evaluar el proceso de cloración del oro para comprender sus etapas y analizar los factores que afectan la eficacia de la extracción y recuperación del oro. A continuación, se describe en detalle el proceso experimental, desde la preparación de la muestra hasta la recuperación final del oro metálico.

3.1 Preparación mecánica del mineral

Antes de someter el mineral aurífero al proceso de cloración, fue necesario realizar una serie de pasos de preparación mecánica para así reducir el tamaño del mineral y facilitar la reacción química posterior. Estos pasos iniciales incluyeron la trituración y molienda del material, utilizando equipos diseñados y contruidos específicamente para este estudio, ya que no existían previamente. Según Taggart (1925), la reducción adecuada del tamaño del mineral es un paso crítico en la preparación mecánica, por el hecho de que optimiza el contacto entre las partículas y los reactivos químicos.

- **Chancado manual:**

Para esta primera etapa de reducción, se mandó a construir un chancador manual. Donde una persona pudo interpretar los diseños planteados, adaptándolos a las necesidades del proyecto. Este equipo permitió una disminución inicial de la granulometría del mineral al aplicar presión mecánica, fragmentándolo en partículas más pequeñas que pudieran ser manejadas con mayor facilidad en las etapas siguientes.

- **Molienda en molino de barras:**

Tras el chancado, el mineral fue sometido a una molienda en un molino de barras, también diseñado y fabricado exclusivamente para este estudio. Este molino de barras permitió una reducción adicional de las partículas, alcanzando una granulometría específica que facilitara la eficacia del proceso de cloración.

La molienda se controló para lograr que el material alcanzara un tamaño bajo un límite predefinido, asegurando una superficie suficiente para optimizar el contacto con el gas cloro en el siguiente proceso.

3.2 Proceso de cloración del mineral aurífero

Tras la preparación mecánica del mineral y la reducción de su tamaño mediante el chancado y molienda, el material fue sometido al proceso de cloración para disolver el oro contenido en la mena. El objetivo de esta etapa fue transformar el oro metálico en cloruro de oro ($AuCl_3$), un compuesto soluble en agua, facilitando así su posterior recuperación. Según Marsden y House (2006), la cloración es un método altamente eficiente para disolver el oro metálico y convertirlo en compuestos clorados estables bajo condiciones controladas.

3.2.1 Materiales y reactivos

- Reactivos:
 - Ácido clorhídrico (HCl), concentrado 37%.
 - Peróxido de manganeso (H_2S) en polvo.
 - Peróxido de hidrogeno (H_2O_2).
 - Cromato de potasio (K_2CrO_4).
 - Nitrato de plata ($AgNO_3$).
 - Bicarbonato de sodio ($NaHCO_3$).
 - Hidróxido de sodio ($NaOH$).
 - Sulfito de sodio ($Na_2S_2O_5$).
- Materiales y equipos:
 - Manta calefactora.
 - Matraz de balón de 500 ml.
 - Tapón de goma.

- Manguera neumática.
- Lavador de gases de 1 L.
- Cono plástico.
- Piezas impresas en impresora 3D.
- Matraz Erlenmeyer de 1000 ml.
- Embudo Buchner.
- Papel filtro.
- Papel filtro sin cenizas.
- Bomba de vacío.
- Vaso precipitado 1000 ml.
- Vaso precipitado 250 ml.
- Agitador magnético.
- Barra agitadora magnética.
- Medidor de pH digital de mesa.
- Medidor portátil de mV.
- Crisol.
- Pinzas metálicas.
- Balanza digital.
- Matraz aforado con tapa 25 ml y 50 ml.
- Bureta 25 ml.
- Pinza doble bureta, tipo Fisher.
- Equipo de protección personal para el laboratorio y para el horno de fundición.

3.2.2 Preparación de la pulpa

- Tras la preparación mecánica del mineral mediante el chancado y la molienda, el mineral se procesó para formar una pulpa al 60% en peso. Este porcentaje de sólidos en la pulpa permite una suspensión adecuada del mineral aurífero, facilitando el contacto durante la etapa de cloración.

- La pulpa se preparó añadiendo agua destilada al mineral molido hasta alcanzar la proporción deseada de 60% en peso. Esta concentración asegura una mezcla suficientemente fluida para permitir la transferencia de gas, optimizando la eficiencia de la cloración.

3.2.3 Generación de gas cloro

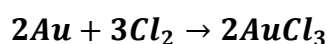
- La generación de gas de cloro se realiza utilizando un matraz de balón de 500 ml que se coloca sobre una manta calefactora para proporcionar un calentamiento constante y controlado.
- En el matraz se agrega una cantidad específica de peróxido de manganeso (MnO_2) y ácido clorhídrico (HCl). Donde la reacción entre estos dos reactivos genera el gas cloro de acuerdo con la siguiente reacción química:



- El gas producido en el matraz fluye a través de una manguera conectada al cuello del balón. Esta manguera transporta el gas hacia un sistema de lavado de gases, que purifica el cloro eliminando impurezas y evitando que residuos no deseados lleguen a la siguiente etapa del proceso.
- Desde el lavado de gases, el gas burbujea a un recipiente impreso en 3D donde se encuentra la mena aurífera. Este recipiente ha sido diseñado para contener la pulpa y permitir un contacto óptimo del gas con el mineral, promoviendo la reacción de cloración.

3.2.4 Proceso de cloración

- El gas cloro purificado se introduce en la parte inferior del recipiente mediante una manguera en forma circular en el fondo, la cual contiene hoyos que permiten el paso del gas, que este ascienda y entre en contacto uniforme con el mineral.
- A medida que el cloro reacciona con el oro presente en la pulpa, se forma cloruro de oro ($AuCl_3$), el cual es soluble en agua:



- Esta reacción permite que el oro pase a la fase líquida, facilitando su posterior recuperación.
- La introducción de gas cloro se mantiene durante un periodo de 5 a 6 horas, permitiendo que la reacción se desarrolle completamente y garantizando la conversión del oro en cloruro de oro.
- Una vez transcurrido el tiempo de reacción, se deja la pulpa en reposo durante 24 horas para asegurar que la disolución del cloruro de oro sea completa y facilitar la separación de la fase líquida en la siguiente etapa.

3.2.5 Recolección de la solución de Cloruro de Oro

- Tras el tiempo de reposo, la pulpa que contiene el cloruro de oro ($AuCl_3$) en solución se somete a un proceso de filtración para separar el mineral sólido de la solución líquida.
- La pulpa se filtra utilizando un filtro de papel colocado en un embudo, el cual se conecta a un matraz de Erlenmeyer equipado con una bomba de vacío. La aplicación

de vacío facilita una filtración rápida y eficiente, asegurando la recolección completa del cloruro de oro en la fase líquida.

- Durante la filtración, se lava el mineral sólido aproximadamente 4 veces con pequeñas cantidades de agua destilada, agua templada y con la misma solución que antes se había recolectado, así asegurando que todo el cloruro de oro soluble pase a la fase líquida. Este paso es relevante para maximizar la recuperación del oro.
- La solución de cloruro de oro obtenida se transfiere a las botellas de vidrio para su almacenamiento temporal, y se etiquetan adecuadamente.

3.2.6 Determinación y eliminación del cloro disuelto

- Tras la recolección de la solución de cloruro de oro, es necesario cuantificar y eliminar el cloro disuelto en la fase líquida, ya que su presencia podría afectar los pasos posteriores de precipitación del oro. Por lo que se realiza una **titulación argentométrica** siguiendo las recomendaciones descritas por Vogel (1989), para medir el contenido de cloro y se utiliza **Sulfito de sodio** (Na_2SO_3) para neutralizarlo.
- **Titulación Argentométrica.**
 - Se toma una alícuota de la solución de cloruro de oro y se realiza una titulación argentométrica para determinar la cantidad de cloro disuelto. Este método consiste en la adición de una solución estándar de **nitrate de plata** ($AgNO_3$), que reacciona con el cloro disuelto formando **cloruro de plata** ($AgCl$), un precipitado blanco.
 - El punto final de la titulación se detecta por la aparición de un precipitado permanente y cambio de color, indicando que todo el cloro libre en la muestra ha reaccionado.

- **Procedimiento:**

- Se añade un indicador adecuado a la muestra. En este caso, se utilizará **cromato de potasio** (K_2CrO_4).
- Se titula la muestra con una solución estándar de nitrato de plata. Donde la reacción que ocurre es la siguiente:



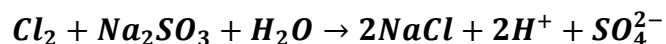
- Se añade la solución de $AgCl_3$ gota a gota a la muestra hasta que se observe un cambio de color debido a la formación de precipitado de cloruro de plata. En el punto final de la titulación se alcanza cuando se forma un precipitado rojo de cromato de plata, lo que indica que todo el cloruro ha reaccionado.

- **Cálculo de la concentración:**

- La cantidad de $AgNO_3$ utilizada para alcanzar el punto final se utiliza para calcular la concentración de cloro en la muestra, utilizando la estequiometría de la reacción.

- **Eliminación de cloro disuelto:**

- Una vez determinada la cantidad de cloro disuelto, se calcula la cantidad de sulfito de sodio (Na_2SO_3) necesaria para neutralizar el cloro disuelto restante en la solución. El sulfito de sodio actúa como un agente reductor que convierte el cloro en iones inofensivos, eliminando su efecto oxidante y asegurando que no interfiera en las etapas posteriores.
- La adición de disulfito de sodio se realiza lentamente con agitación constante para asegurar que la reacción sea completa y evitar que se libere el gas cloro.
- La reacción entre el sulfito de sodio y el cloro es la siguiente:



- Después de la adición de sulfito de sodio, la solución se deja en reposo brevemente y se verifica que el cloro disuelto ha sido eliminado antes de proceder a las etapas de precipitación del oro.

3.2.7 Ajuste del potencial y pH de la solución

Antes de proceder a filtrar y calcinar para recuperar el oro, fue necesario ajustar el potencial electroquímico y el pH de la solución, con el objetivo de alcanzar condiciones óptimas de estabilidad para la precipitación del oro metálico, tal como indica el diagrama de Pourbaix del oro.

- **Ajuste de pH con NaOH:**
 - Se ajustó cuidadosamente el pH mediante la adición controlada de **hidróxido de sodio ($NaOH$)**, alcanzando un pH adecuado para la precipitación del oro. Este ajuste fue realizado lentamente para evitar la formación de precipitados indeseados.
 - La adición de NaOH se hizo gota a gota, con agitación constante, garantizando una distribución homogénea en la solución, manteniendo el pH dentro de un rango donde el oro es estable y susceptible de precipitar en su forma metálica.
- **Aumento del potencial electroquímico:**
 - Luego de ajustar el pH, se incrementó el potencial electroquímico de la solución utilizando un agente oxidante (peróxido de hidrógeno) para situar el sistema en una zona óptima de estabilidad según el diagrama de pourbaix.
 - Este aumento en el potencial facilita la reducción del cloruro de oro a su forma metálica, promoviendo así su precipitación de manera eficiente.
- Una vez alcanzado el pH y potencial electroquímico deseados, la solución se dejó en reposo para permitir que la precipitación del oro ocurriera de forma gradual y completa. El tiempo de reacción fue monitoreado para asegurar que la condiciones se mantuvieran constantes hasta lograr la máxima precipitación del oro metálico.

3.2.8 Filtración de la solución y recolección del precipitado de oro

- **Filtración con filtro sin ceniza:**

- Después del tiempo de reacción, la solución se filtró a través de un **filtro sin cenizas** en un embudo de vidrio conectado a un matraz de Erlenmeyer con bomba de vacío, esta filtración asegura la recolección de las partículas de oro precipitado, minimizando las pérdidas.

3.2.9 Calcinación para obtener el oro metálico

- **Secado y calcinación en horno:**

- Antes de proceder con la calcinación, se realiza una primera pesada del crisol vacío, utilizando una balanza analítica de precisión. Esta medición inicial sirve como referencia para determinar la cantidad exacta de oro recuperado al final del proceso.
- Luego el filtro sin ceniza con el oro precipitado se colocó en un **crisol** y se transfiere a un horno de alta temperatura, donde se somete a una calcinación a aproximadamente 850°C. Esta alta temperatura es adecuada para eliminar cualquier material orgánico del filtro sin ceniza y para reducir el oro a su estado metálico.

- **Pesada final para la cuantificación del oro:**

- Después de la calcinación, el crisol se retira del horno y se deja enfriar a temperatura ambiente. Una vez frío, el crisol se pesa nuevamente para obtener la masa total del crisol con el oro metálico.
- la cantidad de oro recuperado se determina calculando la diferencia entre la masa final (crisol + oro) y la masa inicial del crisol vacío.
- Esta cuantificación permite conocer la cantidad exacta de oro metálico obtenido al final del proceso de recuperación.

4. Desarrollo

4.1 Preparación mecánica del mineral

Esta etapa es esencial en el proceso de recuperación del oro, ya que asegura una reducción del tamaño del material facilitando las reacciones químicas posteriores. En este trabajo, fue necesario diseñar y construir equipos específicos para la trituración y molienda del mineral, adaptados a las necesidades de este estudio. Estas etapas no solo permitieron obtener una granulometría adecuada, sino que también optimizaron el contacto entre el mineral y el gas cloro.

Los equipos utilizados para la preparación mecánica fueron desarrollados siguiendo especificaciones técnicas detalladas para cumplir con los requerimientos del proceso. Las medidas y características técnicas de ambos equipos se encuentran documentados en los **anexos 8.5 y 8.6** del trabajo.

4.1.1 Proceso de Chancado

El primer paso en la preparación mecánica del mineral fue el chancado manual. Este equipo permitió reducir el tamaño de material hasta alcanzar una granulometría inferior a 1.5 pulgada, adecuada para las etapas posteriores del proceso.

Este proceso consistió en colocar el mineral en la parte inferior del chancador y aplicar entre 30-50 golpes manuales, dependiendo de la dureza y tamaño inicial del material. En cada operación, se procesaban aproximadamente entre 1 y 2 kilos de mineral, los cuales se recolectaban cuidadosamente para luego ser enviados a la etapa de molienda.

En la **Figura 2**, se muestra el chancador manual utilizado en esta etapa.



Figura 2: Chancador Manual, con sus 2 partes.

4.1.2 Proceso de Molienda

El siguiente paso en la preparación mecánica fue la molienda en el molino de barras, diseñada para reducir aún más el tamaño del mineral y garantizar una granulometría adecuada para el análisis químico posterior. En la **Figura 3**, **Figura 4** y **Figura 5**, se muestra el molino, las barras de acero utilizadas como elementos de molienda y el VDF.



Figura 3: Molino de barras.



Figura 4: Barras de acero del molino de barras.



Figura 5: VDF del molino de barras.

El mineral recolectado en el proceso de chancado (aproximadamente 4 a 5 kg) se introdujo en el molino. El proceso de molienda se llevó a cabo durante 3 horas, comenzado con una velocidad de 35.5 Hz. Por cada hora que pasaba, la velocidad del molino se incrementaba gradualmente hasta alcanzar los 50 Hz al final del proceso.

Para garantizar una molienda homogénea, se inspeccionó y movió el material dentro del molino cada 30 min aproximadamente.

Una vez finalizado el tiempo de molienda, se recolectó el material procesado y se preparó para la siguiente etapa de análisis químico. El tamaño de las partículas obtenidas después de la molienda, así como su distribución granulométrica, se encuentra detallado en la **Tabla 1**.

Tabla 1: Análisis granulométrico

Malla	µm	Peso g	% Ret	% R. Acum.	% Pasa
25	710	0.9	0.2	0.2	99.8
35	500	8.3	1.8	2.0	98.0
50	300	88.3	18.8	20.8	79.2
70	212	80.8	17.2	38.0	62.0
100	150	67.4	14.4	52.4	47.6
140	106	54.0	11.5	63.9	36.1
200	75	42.2	9.0	72.9	27.1
<200	<75	126.9	27.1	100	

El análisis granulométrico se realizó para determinar la distribución del tamaño de las partículas tras la molienda, lo cual es requerido para evaluar la eficiencia del proceso. En **Tabla 1** se observa la distribución del tamaño de las partículas en función del porcentaje acumulado retenido en cada malla de tamiz. Los datos obtenidos permitieron elaborar un gráfico granulométrico presentado en la **Figura 6**, donde se representa la distribución acumulativa en una escala logarítmica.

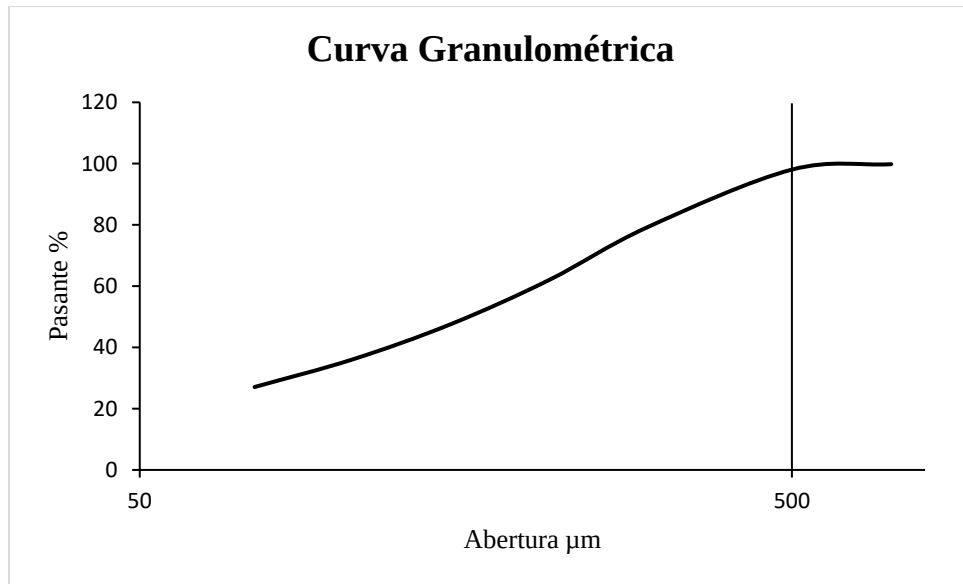


Figura 6: Grafico Curva Granulométrica.

El P80, definido como el tamaño de partícula para el cual el 80% del material pasa a través del tamiz, se calculó utilizando el método de **Rosin-Rammler**. Este modelo matemático permite describir la distribución granulométrica mediante la ecuación:

$$R(d) = e^{-\left(\frac{d}{d_0}\right)^n}$$

Ecuación 1: Ecuación Rosin-Rammler

Donde:

- $R(d)$ es el porcentaje retenido acumulado.
- d_0 es el tamaño característico (parámetro de escala).
- n es el parámetro de uniformidad.

A partir del ajuste de los datos experimentales, se obtuvieron los valores óptimos para d_0 y n , los cuales se usaron para determinar el P80 del material molido. En este caso, el valor de P80 obtenido fue de 278 μm .

La determinación del P80 es necesaria, porque este parámetro influye directamente en la eficiencia de las siguientes etapas del proceso, como el análisis químico y la recuperación del metal de interés. Un tamaño de partícula adecuado asegura una

mayor superficie de exposición, favoreciendo las reacciones químicas necesarias para la disolución y recuperación del oro.

Tras finalizar la etapa de molienda y el análisis granulométrico, el material molido fue dividido en siete fracciones iguales, cada una con un peso aproximado de **1 660 g**. Este paso fue realizado con el objetivo de realizar siete pruebas independientes durante el proceso de cloración, evaluando diferentes parámetros y asegurando la representatividad de los resultados.

Cada fracción fue envasada en bolsas individuales, etiquetadas y almacenadas en condiciones adecuadas hasta su uso en las pruebas experimentales. Este procedimiento permitió trabajar con porciones homogéneas de material, minimizando las variaciones en las pruebas debido a diferencias en la composición o distribución del tamaño de partícula.

4.2 Proceso de Cloración

Previo al inicio del proceso de cloración, se diseñaron e imprimieron tres piezas en 3D con el propósito de optimizar la introducción del gas cloro en la pulpa de mineral y así garantizar una distribución homogénea del gas en la solución. Estas piezas permitieron asegurar la eficiencia del proceso. A continuación, se describen las características y funciones de cada componente:

- **Recipiente de la pulpa:** Un recipiente impreso en 3D, diseñado específicamente para contener la pulpa. Esta configuración no solo facilitaba la distribución uniforme de la pulpa durante el proceso, sino que también permitía una extracción más eficiente y sencilla una vez finalizada la operación (**Ver Figura 7 y Anexo 8.2 para el plano**).

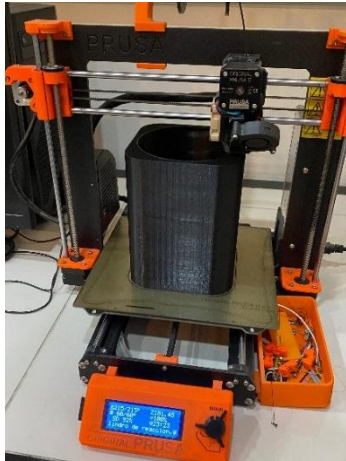


Figura 7: Recipiente de la pulpa.

- **Soporte de la manguera:** una pieza adicional diseñada para sujetar firmemente la manguera al recipiente principal, asegurando estabilidad durante la operación y evitando posibles fugas de gas (**Ver Figura 8 y Anexos 8.3 para el plano**).

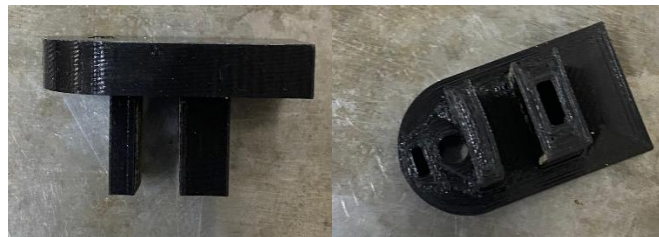


Figura 8: Soporte de manguera.

- **Conector entre mangueras:** Un adaptador que conectaba la manguera principal (transportaba el gas cloro) con la manguera secundaria en forma de círculo colocada en el fondo del recipiente. Este conector garantizaba una transición eficiente del flujo de gas hacia la distribución circular (**Ver Figura 9 y Anexos 8.4 para el plano**).



Figura 9: Conector entre mangueras.

Estas piezas fueron fabricadas utilizando impresión 3D y posteriormente recubiertas con una capa de ABS líquido, lo que les otorgo una mayor resistencia a la corrosión y al ambiente ácido generado durante el proceso de cloración. Este tratamiento adicional asegura su integridad estructural y funcionalidad a lo largo del experimento.

4.2.1 Preparación de la Pulpa

Como primer paso del proceso de cloración, se preparó la pulpa a partir del material molido y agua destilada, alcanzando una concentración sólida de **60 %**. Para ello, se utilizaron **1 660 g** de mineral, correspondientes a una de las fracciones previamente separadas. Considerando que la densidad promedio del mineral era de **1.8 g/cm³**, la cantidad de agua destilada necesaria para alcanzar esta proporción fue de **581 ml**.

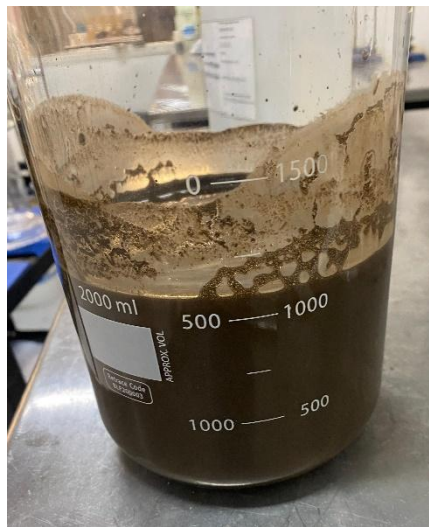


Figura 10: Pulpa.

La mezcla se realizó en un vaso precipitado de un litro de capacidad. Para asegurar una homogenización completa, la mezcla fue agitada utilizando un agitador de pala, garantizando que el mineral y el agua se distribuyeran de manera uniforme (**Ver Figura 10**).

4.2.2 Generación de Gas Cloro

En esta etapa se calculó la cantidad de gas cloro (Cl_2) necesaria para reaccionar con el contenido estimado de oro en la muestra. Basándose en datos promedio de concentraciones de oro en los minerales chilenos, donde se encuentra típicamente **3 g de oro por tonelada de material**, se realizó una regla de tres para estimar que en 1 660 g de mineral molido debería haber aproximadamente **0.005 g de oro**.

Cálculo de gas cloro necesario

Utilizando relaciones estequiométricas, se determinó que para reaccionar con 0.005 g de oro se requerían **0.0009 g de cloro (Cl_2)**. Para generar esta cantidad de gas cloro, se consideró la reacción entre peróxido de manganeso (MnO_2) y ácido clorhídrico (HCl), y a partir de la estequiometría se calcularon las cantidades necesarias de cada reactivo:

- Ácido clorhídrico (HCl): 0.0018 g
- Peróxido de manganeso (MnO_2): 0.0011 g

Ajuste de cantidades para generar gas cloro

Con el objetivo de asegurar una generación constante de gas cloro durante un periodo prolongado (5-6 horas), las cantidades iniciales calculadas se incrementaron por 20. Dando como resultado:

- Ácido clorhídrico (HCl): 0.038 g
- Peróxido de manganeso (MnO_2): 0.022 g

Para convertir el ácido clorhídrico a volumen, se tomó en cuenta su densidad (1.19 d/ml), lo cual dio 0.032 ml. También se sabe que su concentración comercial es de 37%, por lo que se calculó su valor al 100%, dando como **resultado 0.086 ml de HCl puro**.

Por otro lado, el peróxido de manganeso utilizado tenía una pureza del 80%, donde para obtener MnO_2 al 100%, se requería una masa ajustada de **0.03 g**.

Escalamiento para prolongar la generación de cloro

Considerando que las cantidades calculadas inicialmente no serían suficientes para mantener la generación de gas cloro durante 5-6 horas, se decidió incrementar significativamente la cantidad de reactivos. El volumen de **ácido clorhídrico** fue aumentado a **200 ml**, lo que implicó ajustar la cantidad de MnO_2 necesaria a **69.77 g**. Con estas cantidades ajustadas, el sistema de reacción se preparó en un matraz de balón de 500 ml, asegurando una generación controlada y continua de gas cloro durante el tiempo requerido para el proceso de cloración. La puesta en escena del proceso de generación de gas cloro se puede ver en la **Figura 11**.



Figura 11: Puesta en escena del proceso de gas cloro.

4.2.3 Sistema para la generación y uso del gas cloro

El proceso de generación y aplicación del gas cloro se diseñó para garantizar su flujo controlado hacia el recipiente que contenía la pulpa. La **Figura 12** presenta un diagrama de flujo que ilustra estas etapas y componentes de este sistema.

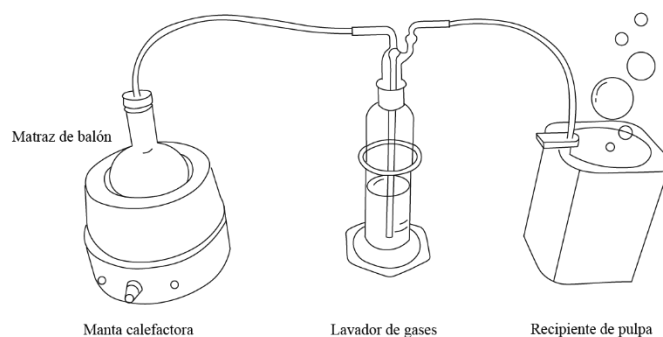


Figura 12: Proceso cloración del mineral.

Descripción de gas cloro:

a. Generación de gas cloro:

- El gas cloro fue generado en un matraz balón de 500 ml de capacidad, donde se mezclaron los reactivos previamente calculados (HCl y MnO_2).
- Este matraz se colocó sobre una manta calefactora para mantener una temperatura constante, favoreciendo la reacción y asegurando una generación continua de gas cloro durante el tiempo requerido.

b. Limpieza de gas cloro:

- El gas cloro generado se dirigió a través de una manguera conectada al matraz. Esta manguera conducía el gas hacia un limpiador de gases de un litro, diseñado para eliminar posibles impurezas antes de su introducción en el recipiente de la pulpa.

c. Introducción de gas cloro en la pulpa:

- Después de pasar por el limpiador, el gas cloro se canalizó hacia el recipiente que contenía la pulpa.

- Dentro del recipiente, el gas se distribuyó uniformemente mediante un sistema de burbujeo, que consistía en una manguera circular perforada colocada en el fondo. Este diseño garantizó la interacción adecuada entre el gas y la pulpa.

Condiciones del proceso

- **Tiempo de burbujeo:** El gas cloro fue introducido en la pulpa durante un período de 5-6 horas.
- **Descanso del sistema:** Una vez finalizado el burbujeo, el sistema se dejó reposar durante **24 horas**, permitiendo que las reacciones químicas entre el cloro y el oro se completaran.

4.2.4 Cálculo y eliminación del Cloro disuelto

Después del reposo de 24 horas, se procedió a filtrar la pulpa, como se describe en la metodología. Donde el filtrado fue recolectado y almacenado en dos botellas de vidrio de 2 L, asegurando que estuvieran debidamente cerradas. **(Ver Figura 13)**

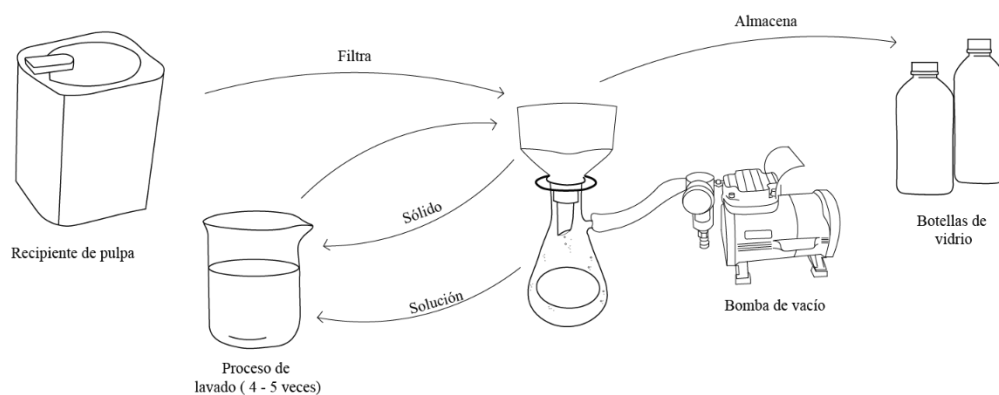


Figura 13: Proceso de separación de la pulpa.

Para determinar y eliminar el cloro disuelto presente en la solución, se realizó una **titulación argentométrica**, siguiendo el procedimiento estándar explicado en la

metodología. Esta técnica permite medir la concentración de cloro residual mediante su reacción con nitrato de plata ($AgNO_3$). A continuación, se describen los detalles del procedimiento y en la **Figura 14** se puede apreciar el proceso:

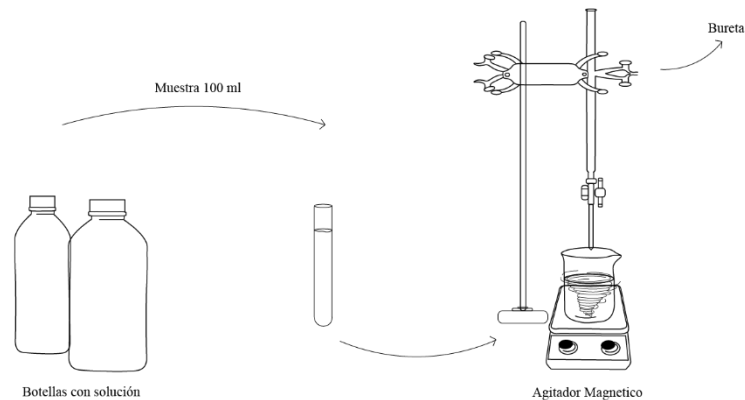


Figura 14: Proceso de titulación.

a. Preparación de la muestra:

- Se tomaron alícuotas de 100 ml de la solución líquida para la titulación.

b. Reactivos utilizados:

- Nitrato de plata ($AgNO_3$):
 - Concentración 0.5 M.
 - Se utilizaron 2.1277 g en 25 ml de agua destilada.
 - Volumen aproximado utilizado 2-8 ml, dependiendo de la concentración de cloro.
- Indicador cromato de potasio (K_2CrO_4):
 - Concentración 0.1 M.
 - Se utilizaron 0.9710 g en 50 ml de agua destilada.
 - Volumen utilizado 3-7 gotas por muestra.

Antes de proceder con la titulación argentométrica, se ajustó el pH de la solución a un valor cercano a 7, para garantizar condiciones óptimas durante la titulación. Este ajuste se realizó utilizando dos métodos alternativos según lo necesitara la muestra:

- Hidróxido de sodio (NaOH) de concentración 2 M, donde este se agregaba con un gotario.
- Bicarbonato de sodio (NaHCO_3), este agregando de apoco con una cuchara hasta llegar al pH deseado.

Durante este ajuste, se monitoreo cuidadosamente el pH utilizando un peachímetro. En caso de observarse alguna precipitación (posible formación de compuestos insolubles), la solución se filtra para eliminar los sólidos antes de realizar la titulación.

c. Procedimiento de titulación:

- Se agrego el indicador cromato de potasio (K_2CrO_4) a la alícuota de la muestra, obteniendo una solución de color amarillo, como se muestra en la **Figura 15**.

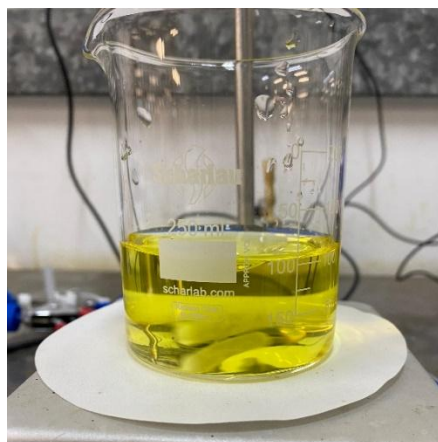


Figura 15: Solución con el indicador (se torna color amarillo).

- Se título con la solución de nitrato de plata (AgNO_3) gota a gota, bajo agitación constante, hasta que la solución cambio a un tono rojizo anaranjado, indicando el punto final de reacción, véase **Figura 16**.



Figura 16: Punto de reacción de la titulación.

d. Determinación y eliminación del cloro residual

La medición del cloro disuelto en la solución se realizó mediante titulación argentométrica utilizando los reactivos y procedimiento descritos previamente. Una vez determinada la concentración de cloro, se procedió a su eliminación utilizando sulfito de sodio (Na_2SO_3) como agente reductor.

- **Cálculo de la masa de Na_2SO_3 necesaria:**

- Con base en el volumen de solución de nitrato de plata ($AgNO_3$) consumido durante la titulación, se calculó la concentración de cloro disuelto (Cl^-) en la muestra.
- Utilizando la relación estequiométrica entre el cloro disuelto y el sulfito de sodio, se determinó la masa exacta de Na_2SO_3 requerida para neutralizar el cloro en cada muestra.

- **Presentación de datos en la tabla:**

- Los valores de los parámetros calculado se presentan en la **Tabla 7** ubicada en anexos, incluyendo:
 - Volumen de $AgNO_3$ utilizado.

- Volumen de la muestra titulada.
- Volumen total de la solución.
- Concentración de cloro disuelto.
- Masa de Na_2SO_3 a utilizar para cada muestra g.

Eliminación del cloro

- Una vez determinada la cantidad de Na_2SO_3 , este fue añadido a la solución líquida y mezclado mediante agitación constante hasta que el cloro residual fuese completamente neutralizado, dejando la solución libre de este reactivo y listo para las etapas posteriores del análisis químico y recuperación de oro (Ver Figura 17).

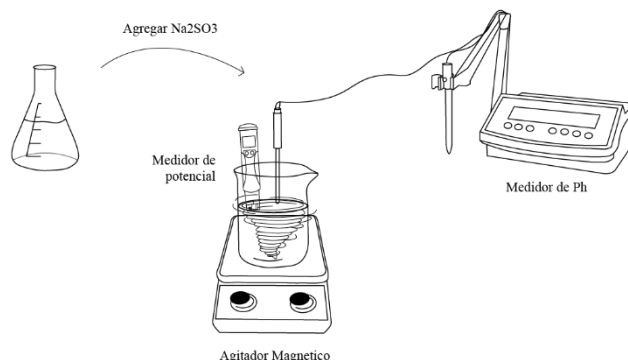


Figura 17: Proceso de eliminación de cloro.

4.2.5 Ajuste de pH y potencial Redox

Incremento del pH

Una vez eliminado el cloro residual de la solución, se procedió a ajustar el pH a un rango de **7 a 10**, necesario para las reacciones posteriores. Este ajuste se realizó utilizando **hidróxido de sodio** ($NaOH$) de concentración 2 M o **Bicarbonato de sodio** ($NaHCO_3$), dependiendo de las condiciones de la muestra. Donde este era monitoreado constantemente por un peachímetro (Ver Figura 18).

Incremento del potencial redox

Después de ajustar el pH, se incrementó el potencial redox de la solución a un rango de **200 mV a 500 mV**. Para lograrlo, se utilizó **peróxido de hidrógeno (H_2O_2)** como agente oxidante, el cual se agregó gota a gota para evitar un aumento abrupto del potencial. Donde este también era monitoreado por un medidor de potencial (**Ver Figura 18**).

Tiempo de reacción

Una vez alcanzados los parámetros óptimos de pH y potencial redox, la solución se dejó reaccionar durante un periodo mínimo de **2 horas**. En algunos casos, se extendió el reposo hasta **24 horas** para maximizar la reacción y garantizar una mayor efectividad en la formación de los compuestos deseados.

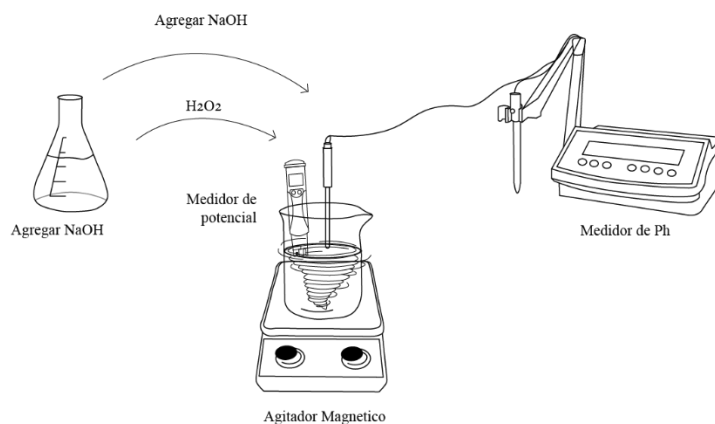


Figura 18: Proceso de incremento de pH y Potencial.

4.2.6 Filtración y calcinación

Al finalizar el tiempo de reacción, se procedió a la separación de los sólidos formados y su posterior calcinación para recuperar el oro presente. (**Ver Figura 19**)

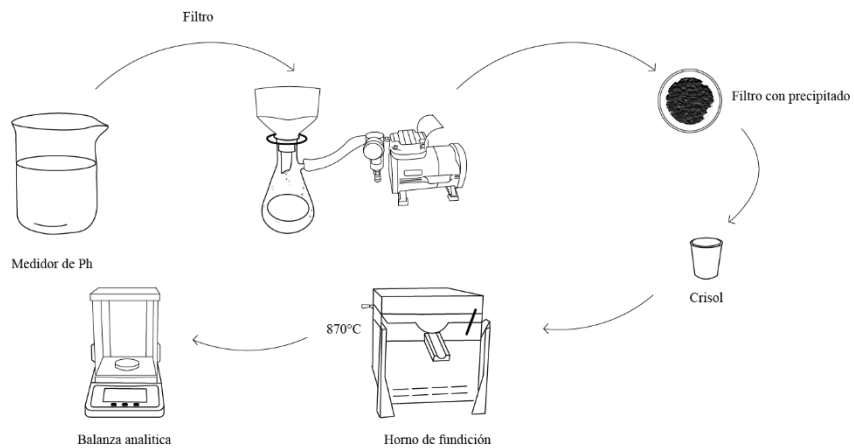


Figura 19: Último proceso del análisis.

a. Filtración:

- La solución fue filtrada utilizando un papel filtro sin cenizas para retener los sólidos generados durante el proceso. Este paso permitió recolectar los productos finales que contenían el oro esperado. **(Ver Figura 20)**



Figura 20: Papel filtro, con producto final.

b. **Preparación para la calcinación:**

- Los filtros recolectados fueron colocados en un crisol de material refractario, como se observa en la **Figura 21**, asegurando que estuvieran distribuidos de manera uniforme dentro del recipiente.



Figura 21: Filtros en crisoles, antes de la calcinación.

c. **Calcinación:**

- El crisol, con los filtros fueron introducidos en un horno de fundición previamente calibrado a una temperatura de **870 °C**. (Ver Figura 22)



Figura 22: Horno de calcinación.

- La muestra fue calcinada durante un período de **2 horas**, asegurando la eliminación de los materiales orgánicos y la obtención del residuo metálico.

d. **Pesaje y comparación:**

- Tras el enfriamiento de los residuos, estos fueron pesados en una balanza analítica. El peso final del residuo metálico obtenido fue comparado con el peso inicial de crisol, permitiendo evaluar la eficiencia del procedimiento.

4.3 Análisis de costos asociados al procedimiento

4.3.1 Costos equipos principales

Para determinar la viabilidad económica del procedimiento propuesto, se calcularon los costos asociados a la fabricación de los equipos principales utilizados: el molino de barras y el chancador manual. Ambos equipos se fabricaron específicamente para cumplir con los requerimientos de la pequeña minería, priorizando la funcionalidad y el bajo costo. A continuación, se detallan los costos desglosados:

Tabla 2: Costos de fabricación de equipos principales.

Concepto	Detalle	Costo \$ CLP
Fabricación del molino de barras	Estructura sin componentes eléctricos	\$ 1 400 000
Fabricación del chancador manual	-	
Motor trifásico de 1 HP	Incluye reductor y VDF ABB	\$ 847 642
Instalación eléctrica del molino	Mano de obra e insumos	\$ 500 000
Total	Molino y chancador completos	\$ 2 747 642

Como se muestra en la **Tabla 2**, el costo conjunto de la fabricación del molino de barras (estructura) y el chancador manual fue de **\$1.4 M CLP**, lo que representa una inversión inicial accesible considerando las necesidades de los pequeños mineros. Al incluir el sistema eléctrico del molino, que consta de un motor trifásico, un reductor y un variador de frecuencia (VDF), más los costos de instalación, el costo total asciende a **\$2 747 642 CLP**.

Este análisis de costos proporciona una base para evaluar la implementación de estos equipos en el proceso general de análisis y recuperación de oro.

4.3.2 Costos implementos

Para la correcta ejecución del procedimiento de análisis de oro, es necesario contar con ciertos implementos básicos que permitan realizar cada etapa del proceso de forma eficiente y reproducible. Estos implementos han sido seleccionados en función de su disponibilidad y accesibilidad para pequeños emprendimientos mineros. A continuación, se detallan los costos asociados a estos equipos e instrumentos:

Tabla 3: Implementos utilizados en el análisis químico y sus costos

Implemento	Descripción	Costo \$ CLP
Agitador mecánico	Para mezclar grandes volúmenes (20 L)	\$ 299 809
Horno de calcinación	Temperatura máxima 1000 °C	\$ 850 000
Balanza analítica	Precisión 0.0001 g	\$ 1 165 576
Agitador magnético	Mezclador con control de velocidad	\$ 154 517
Tester pH y mV	Medición de pH y potencial redox	\$ 321 830
Bomba de vacío	Genera presión negativa	\$ 342 018
Manta calefactora	Calentador de matraces	\$ 59 690
Matraz de balón	Recipiente para mezclas 500 ml	\$ 5 100
Frasco lavador de gases	Para eliminar impurezas	\$ 59 476
Vaso Precipitado	Recipiente vidrio 2 L	\$ 7 651
Vaso Precipitado	Recipiente vidrio 250 ml	\$ 1 530
Tapón de goma solida	Para cerrar matraces o tubos	\$ 400
Matraz Erlenmeyer	Recipiente cónico 1 L	\$ 5 582
Embudo Buchner	Para filtración al vacío	\$ 14 794
Pinzas	Para manipular crisol e implementos	\$ 3 290
Crisol	Para calcinación de muestras	\$ 2 864
Matraz aforado	Para soluciones volumétricas 25 ml	\$ 2 769
Matraz aforado	Para soluciones volumétricas 50 ml	\$ 3 673
Bureta	Para titulaciones precisas 25 ml	\$ 36 665

Pinza doble bureta	Sujeción de buretas	\$	9 981
Barra agitadora magnética	Accesorio para agitadores	\$	7 100
Papel filtro sin cenizas	Para separación sin residuos	\$	25 000
Impresión 3D	Fabricación de piezas personalizadas	\$	10 000
Total	-	\$	3 389 315

El costo total estimado para adquirir los implementos necesarios es de **\$3 389 315 CLP**, considerando equipos básicos y accesorios reutilizables. Este análisis permite identificar las inversiones iniciales necesarias para implementar el procedimiento, destacando la posibilidad de adquirir algunos de estos implementos en versiones económicas o de segunda mano, dependiendo de la disponibilidad del mercado local.

Los implementos listados son requeridos para garantizar la precisión y reproducibilidad del análisis químico, contribuyendo directamente a la calidad de los resultados.

4.3.3 Costos reactivos

El procedimiento de análisis de oro requiere el uso de varios reactivos químicos esenciales. Estos reactivos han sido seleccionados por su disponibilidad y efectividad en las reacciones específicas del método. A continuación, se detalla la información de los reactivos, indicando la cantidad en la que se comercializan y su costo.

Tabla 4: Reactivos químicos utilizados.

Reactivo	Cantidad comercial	Costo \$ CLP
HCL (37%)	1 L	\$ 34 394
MnO ₂	1 kg	\$ 34 391
H ₂ O ₂	1 L	\$ 8 900
K ₂ CrO ₄	250 g	\$ 5 500
AgNO ₃	50 g	\$ 127 450

NaHCO ₃	1 kg	\$	8 330
NaOH	500 g	\$	12 971
Na ₂ SO ₃	1 kg	\$	10 790
TOTAL		\$	242 726

El costo total estimado para adquirir los reactivos necesarios es de **\$242 726 CLP**, considerando sus cantidades comerciales.

4.3.4 Costo por muestra

El costo de los reactivos necesarios para realizar el análisis de una muestra se calcula considerando las cantidades exactas utilizadas en el proceso y sus respectivos costos unitarios. Este cálculo permite estimar el costo directo asociado al análisis químico por muestra y evaluar su viabilidad económica para los emprendimientos de pequeña minería.

Tabla 5: Costo de reactivos por muestra.

Reactivo	Cantidad por muestra	Costo \$ CLP
HCL (37%)	200 ml	\$ 6 879
MnO ₂	69.77 g	\$ 2 399
H ₂ O ₂	100 ml	\$ 890
K ₂ CrO ₄	3 ml	\$ 1
AgNO ₃	2.1277 g	\$ 5 424
NaHCO ₃	10 g	\$ 83
NaOH	10 ml	\$ 21
Na ₂ S ₂ O ₅	5 g	\$ 54
Total		\$ 15 751

Como se muestra en la **Tabla 5**, el costo total por muestra asciende a **\$15 751 CLP**, considerando únicamente el consumo de reactivos químicos. Este costo es razonable

para un análisis individual, especialmente cuando se busca optimizar el método para pequeños emprendimientos mineros.

El costo por muestra puede variar dependiendo de las condiciones experimentales y los volúmenes exactos de reactivos empleados. Sin embargo, esta estimación sirve como base para evaluar la viabilidad económica del procedimiento propuesto.

5. Resultados y análisis

5.1 Análisis inicial del mineral

El mineral seco fue enviado al laboratorio **Andes Analytical Assay** para determinar su contenido de oro (*Au*). Los resultados indicaron un contenido de **1.14 g/t de *Au***. Este valor fue utilizado como referencia para calcular la concentración esperada de oro en la solución experimental.

5.2 Concentración teórica

A partir del análisis del laboratorio, se determinó que, en cada litro de solución preparada, habría una concentración teórica de **0.47 mg de *Au*/L**.

5.3 Diseño experimental

Para el experimento, se trabajó con un volumen inicial de 4 L de solución por muestra. Sin embargo, al final de cada etapa experimental, se filtró un volumen de 1 L de solución para el análisis.

5.4 Resultados experimentales

Los pesos finales obtenidos después de la calcinación de las muestras, juntos con sus errores absolutos y relativos calculados. Se presentan en la siguiente tabla:

Tabla 6: Resultados experimentales, pesos finales y sus errores asociados.

Muestra	Peso final g	Peso final mg	Error absoluto	Error relativo %
1	0.0013	1.30	0.83	175
2	0.0003	0.30	0.17	37
3	0.0025	2.50	2.03	429
4	0.0020	2.00	1.53	323
5	0.0002	0.20	0.27	58
6	0.0030	3.00	2.53	535
7	0.0003	0.30	0.17	37
8	0.0018	1.80	1.33	281
9	0.0015	1.50	1.03	217
10	0.0004	0.40	0.07	15
11	0.0027	2.70	2.23	471
12	0.0011	1.10	0.63	133
13	0.0019	1.90	1.43	302
14	0.0001	0.10	0.37	79

Análisis de resultados

5.5 Error absoluto

El error absoluto se calculó como la diferencia entre el peso final medido experimentalmente y el valor teórico esperado (0.47 mg/L). Los resultados muestran una variabilidad considerable, con error que oscilan entre 0.07 mg y 2.53 mg.

- El promedio del error absoluto es 1.04 mg, con una desviación estándar de 0.82 mg.
- Estos valores indican que, en general, las mediciones presentan una desviación significativa con respecto al valor teórico.

5.6 Error relativo

El error relativo porcentual muestra como los errores varían proporcionalmente al peso medido. Los valores de error relativo fluctúan entre un mínimo de **15 %** (muestra 10) y un máximo de **535 %** (muestra 6).

- El promedio del error relativo es 221 %, con una desviación estándar de 174 %.
- Este comportamiento refleja que el error relativo depende en gran medida de cuán cercano este el peso final medido al valor teórico esperado (0.47 mg/L), más que de la magnitud absoluta del peso medido.

5.7 Recuperación de oro

En el proceso experimental, se pudo confirmar la presencia de oro metálico en algunas muestras, particularmente en aquellas cuyos pesos finales se aproximaron al valor teórico esperado. Este oro recuperado fue observado como partículas metálicas tras la calcinación, lo cual confirma la efectividad parcial del método en la separación del oro del resto de los componentes (**Ver Figura 23**).

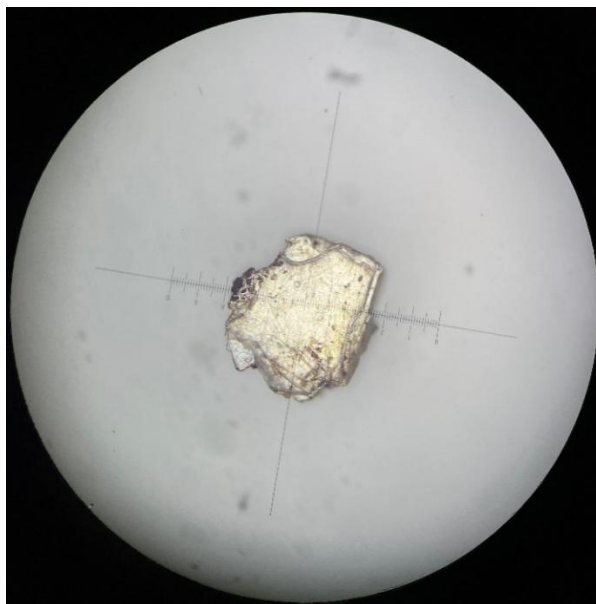


Figura 23: Oro metálico obtenido.

5.8 Análisis de muestras con valores mayores al esperado

En algunas muestras, los pesos finales medidos se alejaron significativamente del valor teórico, mostrando errores tanto absolutos como relativos altos. Esto se atribuye a la **formación de precipitados adicionales**, que no fueron completamente eliminados durante los procesos de calcinación y tratamiento con ácidos.

- Los posibles compuestos que pudieron haberse formado incluyen:
 - **Óxidos metálicos**, como los de hierro (Fe_2O_3), cobre (CuO), o manganeso (MnO_2).
 - **Compuestos insolubles**, como sulfatos metálicos o cloruros resistentes.
 - **Carbono residual**, proveniente de materia orgánica incompletamente calcinada.

5.9 Tratamientos adicionales para separar los precipitados

- **Ácido nítrico (HNO_3)**: En las muestras con pesos finales más altos y que se veía visualmente que tenían otros precipitados, se intentó disolver los precipitados utilizando ácido nítrico. En algunos casos, este procedimiento permitió separar parcialmente los residuos no deseados, dejando visibles el oro metálico.
- **Agua regia**: En las muestras más resistentes, se utilizó agua regia, logrando disolver incluso los compuestos metálicos refractarios. La solución adquirió un color **verdoso**, ver **Figura 24**, debido a la presencia de otros metales, pero también permitió disolver completamente el oro metálico, confirmando su presencia en estas muestras.

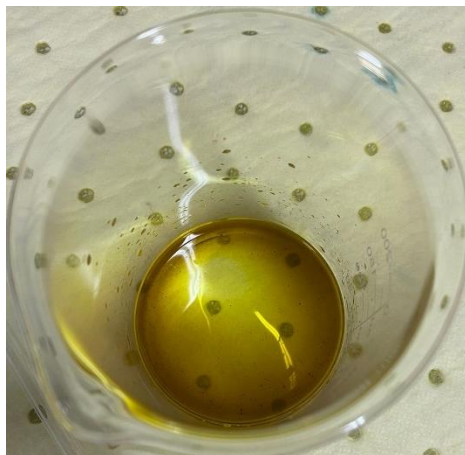


Figura 24: Solución con agua regia y precipitado.

- Cuando el oro se disuelve en agua regia, forma un complejo llamado **tetracloroaurato ($AuCl_4^-$)**. Este complejo tiene un color **amarillo-oro a naranja**, que es distintivo de la presencia de oro en solución.
- En este caso, la solución adquirió un color verdoso. Esto podría deberse a:
 - La presencia de otros metales (como cobre, hierro o níquel) junto al oro.
 - Una mezcla de complejos metálicos en solución, lo que puede alterar ligeramente el color característico.

5.10 Presencia de hierro en el mineral tratado

Es común que los minerales contengan trazas de **hierro** como impureza. Durante la calcinación, el hierro presente en el mineral puede oxidarse y formar compuestos magnéticos como:

- **Magnetita (Fe_3O_4)**: es un óxido de hierro que es fuertemente magnético y se forma a temperaturas elevadas en condiciones de oxidación parcial.
- **Hematita (Fe_2O_3)**: También un óxido de hierro, aunque menos magnético que la magnetita.

- **Metales reducidos:** Si durante la calcinación hubo condiciones reductoras (como la presencia de carbono o una atmosfera con poco oxígeno), el hierro metálico puro o mezclado con otros elementos podría haberse formado, y este es magnético

5.11 Análisis económico

- **Costo de análisis en laboratorio**

El costo de enviar una muestra para análisis a un laboratorio certificado, como **Andes Analytical Assay**, es de aproximadamente **3 UF por muestra**. Este valor incluye:

- Preparación de la muestra.
- Análisis químico especializado.

Con el valor actual de la UF, este costo equivale aproximadamente a **\$115 000 CLP** (variable según el mercado) por muestra.

- **Costo de análisis experimental**

En comparación, el costo de realizar una muestra en el experimento desarrollado durante esta investigación, sin contar los implementos (equipos como balanzas, hornos, filtros, etc.), pero incluyendo los insumos químicos, fue significativamente menor.

El costo promedio por muestra, considerando los reactivos y consumibles necesarios, se calculó en aproximadamente **\$15 751 CLP**. Este costo es basa en las cantidades utilizadas y los precios comerciales actuales de los reactivos.

Por ende, por realizar el análisis experimental representa aproximadamente un **90 % de ahorro** en comparación con el envío a un laboratorio. Esto demuestra el potencial económico de implementar este procedimiento a pequeña escala, especialmente para los proyectos de minería artesanal o de pequeña minería.

Aunque los costos son significativamente más bajos, el análisis experimental presenta algunas limitaciones:

- **Precisión:** La precisión del método puede ser menor en comparación con los laboratorios certificados, que cuentan con instrumentación avanzada.
- **Tiempo:** El procedimiento experimental requiere más tiempo y dedicación para realizar cada muestra.
- **Calibración:** Es necesario realizar calibraciones frecuentes para asegurar resultados consistentes.

6. Conclusiones

En este trabajo se puede concluir que el procedimiento experimental desarrollado representa una alternativa válida y accesible para el análisis y recuperación de oro en muestra minerales, especialmente en el contexto de la pequeña minería. Este estudio permitió confirmar la presencia de oro metálico en varias muestras, demostrando que el método tiene potencial para separar y cuantificar este metal de manera eficiente. Además, se lograron valores experimentales cercano a los teóricos esperados en carias de las muestras, lo que refuerza su aplicabilidad como herramienta analítica.

Como parte el procedimiento, el uso del molino de barras resulto necesario para reducir la granulometría del mineral, permitiendo una molienda más uniforme y facilitando el acceso de los reactivos químicos al material. Esta etapa fue necesaria para optimizar la eficiencia del proceso de recuperación y para garantizar resultados más consistentes en las etapas posteriores del análisis químico.

Asimismo, este procedimiento constituye un esfuerzo influyente hacia la validación de un método de química analítica adaptado a la pequeña minería, ofreciendo un enfoque practico y económico para el análisis de metales preciosos. Durante su desarrollo, se identificaron desafíos técnicos, como la formación de precipitados adicionales (óxidos metálicos y residuos orgánicos), que en algunos casos complicaron la eliminación de impurezas. Sin embargo, el uso de tratamientos químicos, como el ácido nítrico y el agua regia, permitió superar parcialmente estas limitaciones, facilitando la disolución de residuos y confirmando la presencia de oro en las soluciones.

Desde una perspectiva económica, se puede concluir que este procedimiento resulta significativamente más accesible que los análisis realizados en laboratorios certificados, ofreciendo un ahorro considerable en costos. Este aspecto lo posiciona como una opción viable para los pequeños mineros que buscan caracterizar sus minerales de forma autónoma. No obstante, la precisión del método está condicionada, como la preparación

adecuada del mineral, el control de las condiciones experimentales y la eliminación efectiva de impurezas.

Finalmente, se concluye que este trabajo no solo valida un procedimiento de química analítica aplicable a la recuperación de oro, sino que también establece las bases para su futura optimización. Este enfoque tiene el potencial de convertirse en una herramienta técnica y económica valiosa para la pequeña minería, promoviendo tanto su independencia como su sostenibilidad a largo plazo.

6.1 Recomendaciones

A partir de los resultados obtenidos, se puede recomendar optimizar las condiciones de molienda, ya que esta etapa resulta necesaria para la granulometría del mineral y, por lo tanto, la eficiencia en la recuperación de oro. Se puede destacar que una granulometría inferior a 150 μm es altamente deseable, pues garantiza un contacto eficiente entre el mineral y los reactivos químicos, lo cual incrementa significativamente la eficacia del proceso. Además, sería conveniente ajustar el tiempo de molienda y evaluar su impacto en distintos tipos de minerales, lo que permitiría ampliar la aplicabilidad del método desarrollado.

Por otro lado, se sugiere trabajar en el control y eliminación de impurezas, lo cual podría lograrse optimizando las etapas de calcinación y tratamiento químico. Esto reduciría la formación de precipitados no deseados, como óxidos metálicos y residuos orgánicos, que, como se observó, pueden afectar los resultados. Asimismo, sería pertinente explorar el uso de otros reactivos que sean más eficientes para la separación de impurezas sin comprometer la recuperación del oro, lo cual fortalecería aún más el procedimiento.

Adicionalmente, se recomienda ampliar la validación del método analítico, aplicándolo a minerales provenientes de diferentes regiones y composiciones. Esto permitiría no solo evaluar su reproducibilidad, sino también determinar su versatilidad en diversos

contextos. Del mismo modo la incorporación de estándares internos, como soluciones patrón certificadas, sería de gran utilidad para la precisión de los análisis y garantizar resultados confiables. Además, sería beneficioso realizar análisis instrumentales complementarios, como espectrofotometría de absorción atómica o ICP-OES, ya que estos podrían validar cuantitativamente los resultados obtenidos y detectar posibles desviaciones.

En términos económicos, sería un factor desarrollar un análisis más detallado que concluya todos los costos asociados al procedimiento, lo cual facilitaría su comparación con otros métodos analíticos disponibles y permitiría determinar con mayor exactitud su viabilidad económica. Por otra parte, es requerido diseñar programas de capacitación dirigidos a pequeños mineros, enfocándose en la correcta implementación del procedimiento, las practicas operativas más adecuadas y la seguridad en el manejo de reactivos químicos.

Finalmente, es necesario realizar un estudio del impacto ambiental del procedimiento, especialmente en lo relacionado con el manejo de residuos químicos. La neutralización de los ácidos utilizados y la correcta disposición de los residuos sólidos son medidas para garantizar una implementación sostenible del método, asegurando su alineación con las buenas prácticas ambientales.

7. Referencias

- **Marsden, J., & House, I.** (2006). *The Chemistry of Gold Extraction* (2nd ed.). Littleton, CO: Society for Mining, Metallurgy, and Exploration.
- **Taggart, A. F.** (1925). *Handbook of Mineral Dressing*. New York: John Wiley & Sons.
- **Vogel, A. I.** (1989). *Vogel's Textbook of Quantitative Chemical Analysis* (5th ed.). London, UK: Longman Scientific & Technical.
- **Skoog, D. A., Holler, F. J., & Crouch, S. R.** (2017). *Principles of Instrumental Analysis* (7th ed.). Boston, MA: Cengage Learning.
- **Cullity, B. D., & Stock, S. R.** (2001). *Elements of X-Ray Diffraction* (3rd ed.). Upper Saddle River, NJ: Prentice Hall.
- **Harris, D.C.** (2015). *Quantitative chemical análisis* (9th ed.). New York, NY: W.H. Freeman and Company.
- **Reed, S. J. B.** (2005). *Electron Microprobe Analysis and Scanning Electron Microscopy in Geology*. Cambridge, UK: Cambridge University Press.
- **Domeyko, A.** (2022, abril 8). *La pequeña minería es fundamental para el desarrollo del ecosistema minero nacional*. Minería Chilena. Recuperado de <https://www.mch.cl/2022/04/08/alfonso-domeyko-la-pequena-mineria-es-fundamental-para-el-desarrollo-del-ecosistema-minero-nacional/>
- **Comisión Chilena del Cobre.** (2023). *Monitoreo de variables e indicadores relevantes de la mediana y pequeña minería chilena*. Recuperado de <https://www.cochilco.cl/web/pequena-y-mediana-mineria/>
- **Gerencia de Investigación y Desarrollo.** (2014). *Caracterización de la pequeña y mediana minería en Chile*. Comisión del Cobre (Cochilco).

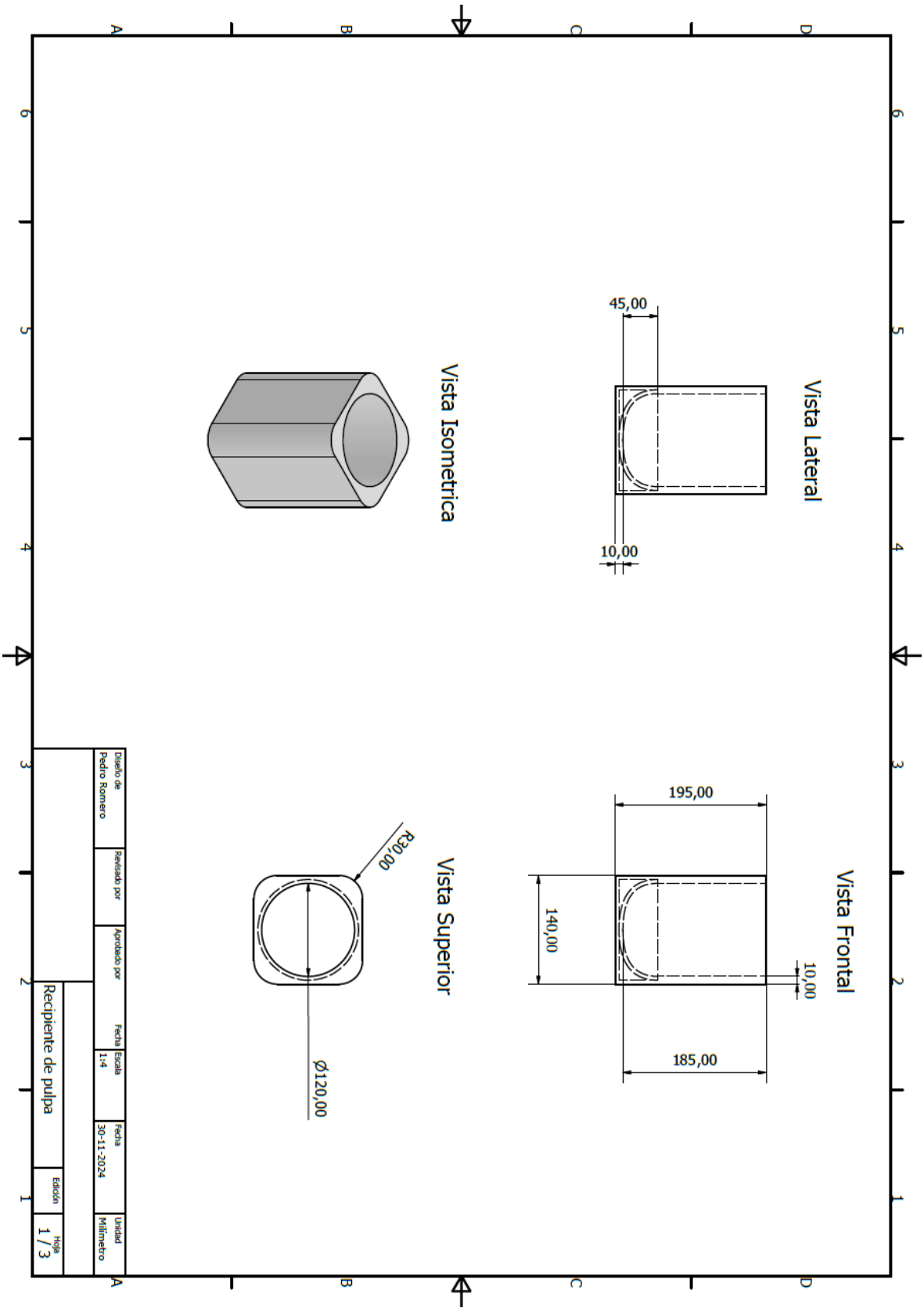
8. Anexos

8.1 Datos para los cálculos de la cantidad de sulfito

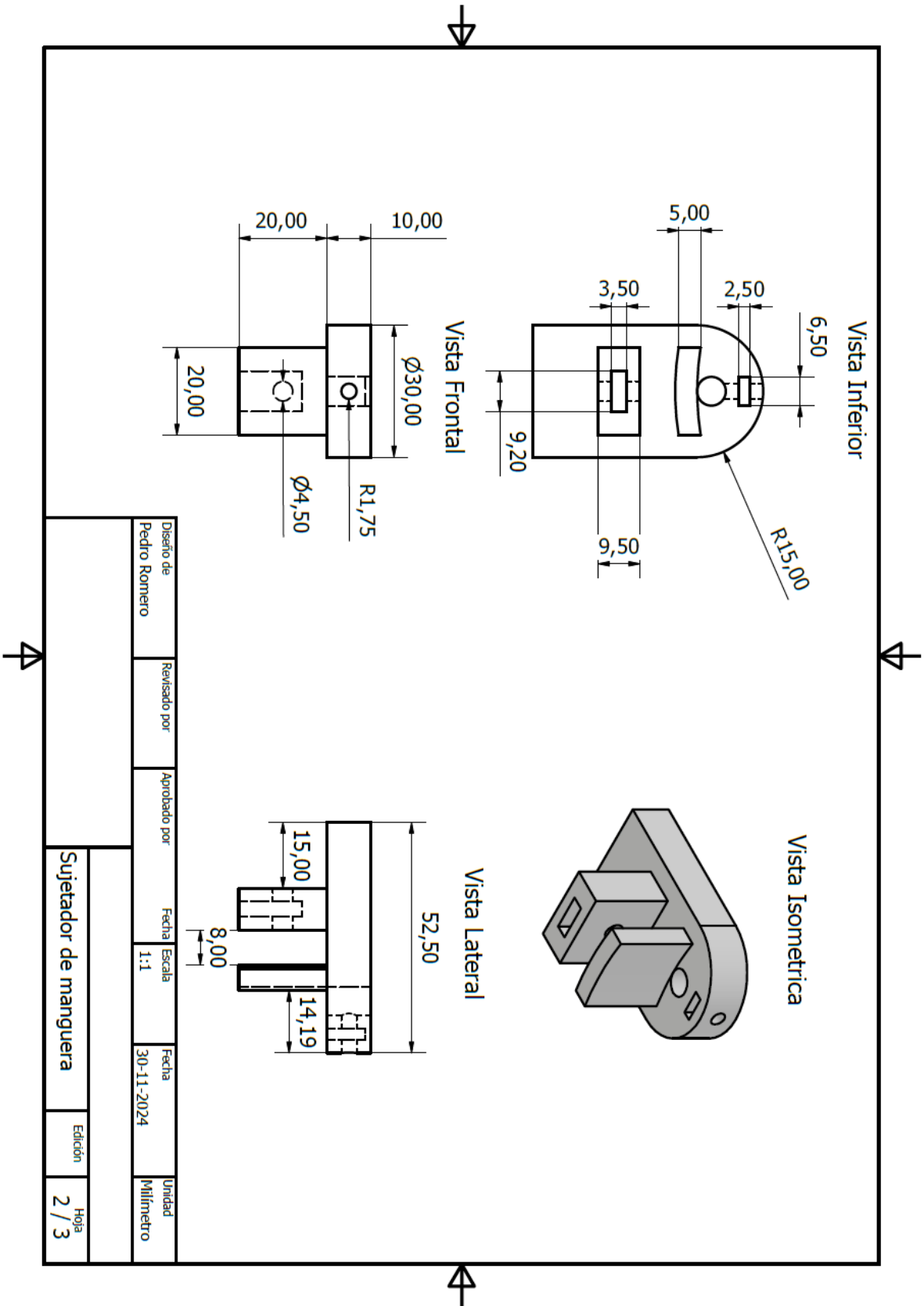
Tabla 7: Datos de cantidad de sulfito de sodio.

N° de muestra	Prueba N°	Volumen de AgNO ₃ (ml)	Promedio (ml)	Volumen muestra (ml)	Concentración de Cl ⁻ (M)	Volumen de solución (L)	Moles de Cl	Masa Na ₂ SO ₃ (g)
1	1	7,00	7,0	100	0,04	1,00	0,04	4,4219
	2	7,15						
	3	6,90						
2	1	8,25	8,3	100	0,04	1,00	0,04	5,2517
	2	8,25						
	3	8,50						
3	1	3,00	2,8	100	0,01	1,00	0,01	1,7436
	2	2,40						
	3	2,90						
4	1	7,05	6,9	100	0,03	1,00	0,03	4,3274
	2	6,65						
	3	6,90						
5	1	4,80	4,6	100	0,02	1,00	0,02	2,8779
	2	4,40						
	3	4,50						
6	1	2,05	2,0	100	0,01	1,00	0,01	1,2394
	2	1,90						
	3	1,95						
7	1	6,50	6,3	100	0,03	1,00	0,03	3,9388
	2	6,10						
	3	6,15						

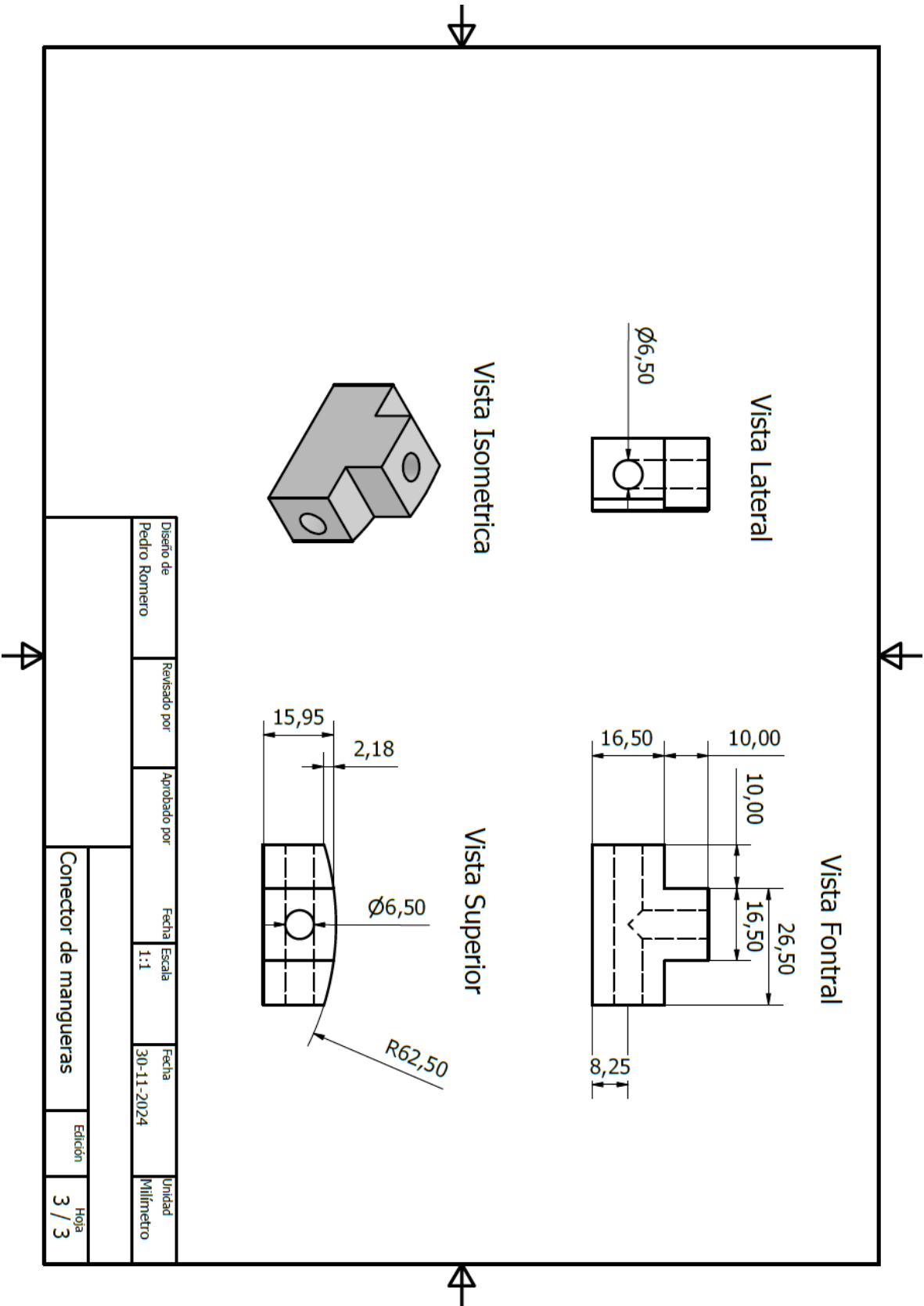
8.2 Plano 1, recipiente de la pulpa



8.3 Plano 2, sujetador de manguera



8.4 Plano 3, conector de manguera



8.5 Características del chancador manual

- Cantidad de pesas:
 - 2 grandes, de 2 kg.
 - 2 chicas. De 1 kg.

Tabla 8: Medidas del chancador manual.

Nombre	Alto cm	Diámetro cm
Chancador	60	16

- Foto de la construcción del chancador:



Figura 25: Proceso de construcción chancador.

8.6 Características del molino de barras

- 2 barras de 55 kg

Tabla 9: Medidas de molino de barras.

Nombre	Largo cm	Diámetro cm	Ancho cm
Molino	62	50	-
Puerta de alimentación	28	-	13

- Fotos del proceso de construcción:



Figura 26: Proceso construcción 1 molino de barras.



Figura 27: Proceso construcción 2 molino de barras.



Figura 28: Proceso construcción 3 molino de barras.



Figura 29: Proceso construcción 4 molino de barras.

