



UNIVERSIDAD
DE ATACAMA

SEDE VALLENAR

FACULTAD TECNOLÓGICA

ÁREA DE GEOMINERÍA

**“OPTIMIZACIÓN DEL ENSAYO METALÚRGICO:
FLOTACIÓN DE ORO, PLANTA ENAMI VALLENAR”**

Trabajo de titulación presentado en conformidad a los requisitos para obtener el título de
Técnico Universitario en Metalurgia

Profesora Guía: Mg. Carolina Venegas Abarzúa

Andersson Mauricio Alexander Espinoza Rojas

Ayleen Yamilet Gómez Bolados

César Andrés Gómez Bolados

Guillermo Francisco Saavedra Páez

Vallenar, Chile 2025

DEDICATORIA

Dedico este proyecto a mi abuelo, Domingo Rojas, el gran pilar de nuestra familia que mantuvo todo en orden hasta su fallecimiento, querido y extrañado. Esta tesis es dedicada a su memoria, por su incontable apoyo y paciencia. Deseando que hubiera seguido con vida para este momento, agradezco su forma única de amar, sus enseñanzas y su legado, pues este logro es para él.

Andersson Espinoza Rojas

Dedico este trabajo a mis amados padres, Patricia Bolados Campillay y César Gómez Campillay, por su sabiduría, esfuerzo incansable y por ser el pilar de amor que sostuvo cada uno de mis sueños. Mamá, gracias por tu fe inquebrantable; papá, gracias por enseñarme que la disciplina y la responsabilidad son el único camino seguro hacia el éxito. Este título es el fruto de sus sacrificios y de los valores que sembraron en mí, Asimismo, agradezco a mis compañeros por integrarme en su tesis; por su confianza, por el trabajo compartido y por ser parte de este gran logro

Ayleen Gómez Bolados

Dedico este proyecto a mis padres, César Gómez Campillay y Patricia Bolados Campillay, por los valores y la guía constante que me enseñaron a crecer y a no rendirme. A mis abuelos, Enilda Campillay Caballero, Héctor Gómez Campillay y Zahira Campillay Campillay, por su amor incondicional que dejó una huella imborrable en mi vida. Finalmente, a mi profesora de educación básica, Mirta Flores Rojas, por enseñarme desde temprana edad a creer en mis capacidades y a superarme.

César Gómez Bolados

Dedico este trabajo a mis queridos gatos, en especial a Eren y Mika, que ya no están, pero que siempre vivirán en mi corazón. A la Negra y Kílua, que siguen acompañándome día a día con su cariño incondicional. Y a mi familia, por su apoyo constante, paciencia y amor, que han sido fundamentales en este camino.

Guillermo Saavedra Páez

AGRADECIMIENTOS

De parte de los autores de la presente tesis agradecemos a la Empresa Nacional de Minería (ENAMI) por otorgar la oportunidad de desarrollar este proyecto con un enfoque en la recuperación de planta, permitiendo aplicar y fortalecer los conocimientos adquiridos durante nuestra formación como Técnico en Metalurgia.

De manera especial, expresamos nuestros agradecimientos al jefe de Operaciones, Mauricio Flores Torrejón y jefe de turno, Juan Rojas Masías, por autorizar y apoyar la realización del proyecto, así como a Víctor San Martín Medina, Metalurgista de Sulfuros, y a Matías Zanoni Julio, Ingeniero de Procesos de Oro, por su valiosa disposición, apoyo técnico y orientación en la estructuración y desarrollo del proyecto de título.

Extendemos un especial agradecimiento al personal del Laboratorio Metalúrgico, en particular a Joshua Gonzales Cortés, supervisor coordinador, y a María Aróstica González, encargada del área de laboratorio, quienes facilitaron el acceso a imágenes de los equipos y herramientas utilizados en el área, contribuyendo al desarrollo del presente trabajo.

Del mismo modo, se agradece a la profesora Magíster Carolina Venegas Abarzúa, por su destacada labor como profesora y profesora guía, su acompañamiento constante y su apoyo durante todo el proceso de creación y desarrollo del proyecto.

Finalmente, expresamos nuestro agradecimiento a los profesores:

Dixiana Diaz Vigorena, Álvaro Pereira Cortés, Felipe Pizarro Barraza, Javier Guerra Agosto, Jocelyn Concha Marchant, Ignacio Tapia Alfaro, Ilier Cortés Tapia, Cristian Urdiales Flores, que durante estos dos años han sido parte de nuestra formación como técnicos metalúrgicos, por su compromiso y dedicación como docente, así como por motivar a los estudiantes a dar lo mejor de sí durante su proceso formativo a todos ustedes muchas gracias.

ÍNDICE DE CONTENIDO

DEDICATORIA	2
AGRADECIMIENTOS	3
ÍNDICE DE CONTENIDO.....	4
ÍNDICE DE FIGURAS.....	7
ÍNDICE DE TABLAS	8
RESUMEN.....	9
ABSTRACT	10
CAPÍTULO I. MARCO INTRODUCTORIO	11
1.1. Introducción	11
1.2. Objetivo general	12
1.3. Objetivos específicos	12
1.4. Planteamiento del problema.....	12
1.5. Hipótesis.....	13
1.6. Antecedentes	13
1.7. Justificación.....	14
1.8. Alcances	14
CAPÍTULO II. MARCO TEÓRICO	15
2.1. Antecedentes de la empresa: Empresa Nacional de Minería (ENAMI). Historia 15	
2.2. Planta ENAMI Vallenar: Ubicación	16
2.3. Planta ENAMI Vallenar: Información general	17
2.4. Misión	18
2.5. Historia del oro a nivel Mundial	20
2.5.1. Historia del oro a nivel local	21

2.5.2.	Resultados producción global oro nivel nacional.	21
2.5.3.	Definición del oro	25
2.5.4.	Usos del oro	26
2.5.5.	Producción de oro	26
2.6.	Flotación de sulfuros	28
2.6.1.	Proceso de flotación	28
2.6.2.	Reactivos usados en flotación	29
2.6.3.	Granulometría del mineral	29
2.6.4.	Dosificación y el tipo de reactivos empleados.....	30
2.6.5.	Densidad de pulpa o porcentaje de sólidos	30
2.6.6.	Influencia del pH.....	30
2.6.7.	Aireación y acondicionamiento de la pulpa	31
2.6.8.	Calidad del agua.....	31
2.6.9.	Flotación de oro.....	31
2.6.10	Caracterización del proceso de flotación	32
2.7.	Flotación ENAMI	33
2.7.1	Flotación Oro ENAMI	34
2.7.2.	Concentración gravitacional.....	34
2.7.3.	Circuito de oro.....	36
CAPÍTULO III. METODOLOGÍA		42
3.1.	Caracterización fisicoquímica del mineral que ingresa al proceso de flotación 42	
3.1.1.	Análisis granulométrico	42
3.1.2.	Determinación de peso específico del mineral. Método del picnómetro	48
A.	Equipos y materiales	48
B.	Procedimiento	49

3.1.3.	Determinación de densidad de la pulpa	51
A.	Equipos y materiales	51
B.	Descripción del procedimiento	51
3.1.4.	Análisis de oro Total	55
A.	Equipos y materiales	55
B.	Descripción del procedimiento	55
3.2.	Optimización de parámetros de flotación de oro a nivel de laboratorio	57
3.2.1.	Pruebas de molienda y flotación Rougher	58
A.	Equipos y materiales	58
B.	Descripción de procedimiento.....	59
3.2.2.	Estudio de la recuperación de oro variando el tiempo de residencia	64
CAPÍTULO IV. RESULTADOS.....		65
4.1.	Caracterización fisicoquímica del mineral que ingresa al proceso de flotación	65
	65	
4.1.1.	Análisis granulométrico	65
4.1.2.	Determinación de peso específico del mineral.....	67
4.1.3.	Análisis de oro total	67
4.2.	Optimización de parámetros de flotación de oro a nivel de laboratorio	68
4.2.1.	Estudio de la recuperación de oro variando el tiempo de residencia	69
CAPÍTULO V. CONCLUSIÓN		72
BIBLIOGRAFÍA		74

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1. Vista satelital de la Planta Enami Vallenar. (Google Earth, 2025)	16
Figura 2.2. Entrada planta ENAMI Vallenar	17
Figura 2.3. Entrada planta ENAMI Vallenar	19
Figura 2.4. Relación producción/precio de oro, años 2015-2024	22
Figura 2.5. Porcentaje de iniciativas por tipo de recurso explorado, acumulados al 2024	23
Figura 2.6. Diagrama de flujos circuito cobre Planta ENAMI Vallenar.....	34
Figura 2.7. Diagrama de flujos circuito concentración gravitacional Planta ENAMI Vallenar	35
Figura 2.8. Diagrama de flujos circuito oro Planta ENAMI Vallenar	37
Figura 2.9. Celdas Rougher circuito principal Planta ENAMI Vallenar	38
Figura 2.10. Celdas Cleaner circuito principal Planta ENAMI Vallenar.....	38
Figura 2.11. Celdas Recleaner circuito principal Planta ENAMI Vallenar	39
Figura 2.12. Celdas Scavenger circuito principal Planta ENAMI Vallenar	39
Figura 2.13. Celdas circuito de repaso Planta ENAMI Vallenar	40
Figura 2.14. Circuito flotación Planta ENAMI Vallenar	40
Figura 3.1. Balanza de media precisión	43
Figura 3.2. Bandejas de acero inoxidable.....	43
Figura 3.3. Bandejas de acero enlozadas	43
Figura 3.4. Brocha, pala jis	44
Figura 3.5. Horno secado	44
Figura 3.6. Mallas de harnero	44
Figura 3.7. Ro-tap	45
Figura 3.8. Tamices.....	45
Figura 3.9. Picnómetro de vidrio.....	48
Figura 3.10. Balanza analítica.....	48
Figura 3.11. Determinación de la densidad de pulpa, proceso de flotación de oro	53
Figura 3.12. Tabla de densidad para determinar % de material pasante bajo #200Ty	54
Figura 4.1. Resultados: Curva granulométrica.....	66

Figura 4.2. Resultados: Cinética de flotación	71
---	----

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1.1. Valores de los parámetros del proceso de flotación de oro que actualmente se utilizan en Planta Vallenar	14
Tabla 2.1. Valores de embarques de exportación de la minería chilena 2020-2024.....	21
Tabla 2.2. Producción de oro, total anual y precio promedio, años 2015-2015	22
Tabla 2.3. Producción (tmf) de minerales metálicos y su variación porcentual, años 2023-2024.....	23
Tabla 2.4. Producción (tmf) de minerales metálicos por región, según tipo de mineral, año 2024.....	24
Tabla 2.5. Resumen de producción de la minería metálica por tamaño de empresa y producto (tmf y kg), año 2024.....	24
Tabla 2.6. Características del Oro	25
Tabla 2.7. Producción (kg) de oro, según procedencia, año 2024	26
Tabla 2.8. Producción de oro (kg) medianas empresas, por tipo de producto, año 2024	27
Tabla 2.9. Producción de oro (kg) pequeñas empresas, por tipo de producto, año 2024.....	27
Tabla 2.10. Producción de oro (kg), procedente de la minería del cobre, año 2024.....	28
Tabla 2.11. Dosificación de reactivos que actualmente se utilizan en Planta ENAMI Vallenar	37
Tabla 3.1. Determinación de peso específico para cada muestra de mineral.....	50
Tabla 3.2. Condiciones y esquema actual Planta ENAMI Vallenar	57
Tabla 3.3. Preparación de muestras para estudio de tiempo de residencia	64
Tabla 4.1. Resultados: Análisis granulométrico	65
Tabla 4.2. Resultados: Determinación de peso específico del mineral.....	67
Tabla 4.3. Resultados: de análisis oro total, composito 1 y 2 de oro	67
Tabla 4.4. Resultados: Parámetros de pruebas de flotación, escala laboratorio	68
Tabla 4.5. Recuperación actual de oro a diferentes tiempos de residencia, Planta ENAMI Vallenar	69
Tabla 4.6. Recuperación de oro a diferentes tiempos de residencia, propuesta Planta ENAMI Vallenar.....	70

RESUMEN

El presente estudio se enfoca en la optimización del circuito metalúrgico de oro de la Planta Vallenar de ENAMI, cuyo rendimiento es inferior a la meta de diseño del 67,42%, con el objetivo de definir, a escala de laboratorio, una estrategia operativa que permita incrementar su eficiencia y establecer bases técnicas para futuras mejoras. Los objetivos específicos consideran la caracterización fisicoquímica del mineral alimentado al proceso de flotación, la optimización de los parámetros de flotación a nivel de laboratorio y la evaluación de los resultados obtenidos, con el fin de proponer mejoras técnicas al proceso y aumentar la recuperación de oro. Se optimizó la sinergia entre el esquema de flotación actual y uno propuesto mediante modificaciones en el régimen de reactivos, incorporando sulfato como activador y reemplazando el espumante por D-250, más compatible con dicho activador, junto con la aplicación de procedimientos operacionales del laboratorio metalúrgico de planta, asegurando calidad y representatividad de las pruebas.

La metodología incluyó la preparación de una muestra compuesta representativa de la alimentación promedio, análisis granulométricos, determinación del peso específico mediante picnómetro y medición de la densidad de pulpa. Con estos antecedentes, se realizaron pruebas de flotación Rougher a nivel de laboratorio orientadas a la optimización de los parámetros del proceso, evaluando la recuperación de oro mediante la variación del tiempo de residencia, la definición de un esquema de reactivos simplificado, la adición de activadores como el sulfato de cobre y la determinación de la cinética del proceso. A partir de los parámetros óptimos obtenidos, se modelaron y simularon distintas configuraciones del circuito para identificar la alternativa teórica más eficiente.

La optimización del proceso de flotación de oro fino alcanzó una recuperación superior a la meta de diseño de 68,49%, a los 20 minutos de residencia de la pulpa en la etapa de flotación. La cinética demuestra que el esquema propuesto presenta una respuesta más rápida, alcanzando una recuperación óptima en un promedio de 17 minutos, con una diferencia de 7% respecto al esquema original, estableciendo una metodología robusta basada en pruebas de laboratorio, que entrega fundamentos técnicos para una futura implementación industrial con impacto económico en ENAMI y en la minería regional.

ABSTRACT

This study focuses on optimizing the gold metallurgical circuit at ENAMI's Vallenar Plant, which currently performs below the design target of 67.42%, with the objective of defining a laboratory-scale operational strategy that allows to increase its efficiency and establish technical foundations for future improvements. The specific objectives take into account the physicochemical characterization of the ore fed to the flotation process, the optimization of flotation parameters at a laboratory level, and the evaluation of the results to propose technical enhancements to the process and increase gold recovery. The synergy between the current flotation scheme and a proposed one was optimized by modifying the reagent regime, incorporating sulfate as an activator and replacing the frother with D-250, which is more compatible with the aforementioned activator, while applying operational procedures from the plant's metallurgical laboratory to ensure the quality and representativeness of the tests.

The methodology included the preparation of a representative composite sample of the average feed, granulometric analysis, determination of specific weight using a pycnometer, and pulp density measurement. Based on this data, laboratory-level Rougher flotation tests were conducted to optimize process parameters, evaluating gold recovery by varying residence time, defining a simplified reagent scheme, adding activators such as copper sulfate, and determining the process kinetics. Using the optimal parameters obtained, different circuit configurations were modeled and simulated to identify the most efficient theoretical alternative.

The optimization of the fine gold flotation process achieved a recovery exceeding the design target of 68.49% at 20 minutes of pulp residence in the flotation stage. Flotation kinetics demonstrate that the proposed scheme shows a faster response in copper recovery, reaching optimal recovery in an average time of 17 minutes, a 7% difference compared to the original scheme. This establishes a robust methodology based on laboratory testing, providing the technical grounds for future industrial implementation with an economic impact on ENAMI and regional small and medium-scale mining.

CAPÍTULO I. MARCO INTRODUCTORIO

1.1. Introducción

La flotación es el proceso de concentración de minerales más utilizado en Chile, entre los minerales para los cuales se utiliza se encuentran los de cobre y oro, especialmente para minerales sulfurados, ya que es el método que maximiza económicamente la recuperación de estos elementos valiosos de yacimientos complejos y de baja calidad (Contreras, Olgún, & Valenzuela, 2022)

La flotación consiste en un proceso fisicoquímico que usa reactivos específicos para hacer que las partículas de mineral valioso se adhieran a burbujas de aire y floten a la superficie, separándose de los materiales de desecho (ganga) (CODELCO, 2018)

El presente estudio tiene como objetivo principal la optimización del proceso de flotación en el circuito metalúrgico de la Planta Vallenar de ENAMI, cuyo rendimiento actual se encuentra por debajo de la meta de diseño del 67,42% y se espera llegar a un valor igual o superior. Esto se realizará a través de ensayos en laboratorio con diferentes parámetros, si bien es cierto se persigue la optimización del proceso, no es conocido si es posible lograrlo, ya que se trata de una evaluación preliminar para definir las condiciones operativas y los parámetros de flotación que podrían mejorar la eficiencia de la recuperación de oro, se incluye dentro del trabajo a realizar, diagnosticar las causas mineralógicas que afectan la baja recuperación de oro, optimizar los parámetros de flotación a nivel de laboratorio y modelar distintas configuraciones del circuito para identificar la opción más eficiente desde un punto de vista teórico. Debido a la alta variabilidad del mineral, proveniente de más de 100 proveedores, se comenzará con la creación de una muestra compuesta representativa de la alimentación promedio.

Los resultados de esta evaluación permitirán establecer las bases técnicas necesarias para futuras investigaciones y mejoras en el proceso, contribuyendo a una implementación

industrial más eficiente que impacte positivamente a ENAMI y a los pequeños y medianos mineros de la región.

1.2. Objetivo general

Optimizar el proceso metalúrgico de flotación de oro a través de la evaluación de ensayos metalúrgicos en diferentes condiciones, realizados en la Planta ENAMI Vallenar.

1.3. Objetivos específicos

- ✓ Caracterizar fisicoquímicamente el mineral que ingresa al proceso de flotación de oro.
- ✓ Optimizar los parámetros de flotación a nivel de laboratorio.
- ✓ Evaluar los resultados obtenidos para proponer mejoras al proceso de flotación de oro.

1.4. Planteamiento del problema

El oro continúa siendo un metal de alta relevancia estratégica para la economía mundial y un pilar fundamental para la industria minera chilena. En este escenario, la Empresa Nacional de Minería (ENAMI) cumple un rol social y productivo insustituible, fomentando el desarrollo de la pequeña y mediana minería en regiones como Atacama, al proporcionar poder de compra y procesamiento para minerales que, de otro modo, no podrían ser explotados, la Planta ENAMI Vallenar es un centro minero-metalúrgico para los productores de la zona, procesando minerales de oro que a menudo presentan una mineralogía compleja. Sin embargo, existe una problemática que se vislumbra en el proceso de flotación de oro cuyo rendimiento actual se encuentra por debajo de la meta de diseño del 67,42%.

1.5. Hipótesis

Un estudio cinético de flotación a escala de laboratorio demostrará que la configuración actual del circuito industrial opera con un tiempo de residencia subóptimo, lo que limita la recuperación de oro fino y asociado a sulfuros. En consecuencia, la simulación de una reconfiguración del circuito que extienda el tiempo de flotación Rougher, sumada a la optimización del esquema de reactivos (incluyendo la adición de sulfato de cobre como activador), proyectará una recuperación sinérgica y superior de partículas de oro. Esta estrategia, fundamentada en parámetros operacionales óptimos de concentración gravimétrica y flotación definidos en laboratorio, indicará el potencial para incrementar la recuperación metalúrgica global del circuito igual o superior a la meta del 67,42% y obtener un concentrado final con una ley teórica igual o superior a 50 g/t de Au.

1.6. Antecedentes

Actualmente, uno de los circuitos de oro de la Planta Vallenar de ENAMI opera por debajo de su meta de diseño, presentando una recuperación metalúrgica y ley inferior al objetivo establecido del 67,42% y de 50 g/ton, respectivamente. Esta brecha entre el rendimiento actual y el potencial representa una pérdida de valor significativa, no solo para la planta, sino también para los pequeños y medianos productores mineros que dependen de una recuperación óptima para la rentabilidad de sus faenas. La evidencia operativa por parte de los controles de planta que se tiene sugiere que el principal problema se encuentra en el circuito de flotación, etapa crítica para la recuperación de oro fino y ocluido en especies sulfuradas.

Los parámetros actuales de la Planta Vallenar, utilizados en el proceso de flotación son los siguientes (ver Tabla 1.1)

Tabla 1.1. Valores de los parámetros del proceso de flotación de oro que actualmente se utilizan en Planta Vallenar

Parámetros proceso de flotación	Valores
Granulometría pasante	80% -#200
pH	Entre 7,0 – 8,0
Tiempo de residencia (total)	62 minutos
Reactivos de flotación utilizados	PAX, 208, 404, 7524, 1012, MIBC

Fuente: Elaboración Propia

1.7. Justificación

La presente investigación aborda este desafío de manera directa. El problema central es la baja eficiencia del circuito de flotación de oro, que impide alcanzar la meta de recuperación, y la ley de concentrado es del 67,42% y 50 g/ton. Se postula que esta ineficiencia puede ser atribuida a condiciones subóptimas en variables operacionales clave. Para resolver esto, se requiere una investigación sistemática y una optimización de los parámetros y el diseño del circuito. Si se realizan estas pruebas, se tendrá evidencia suficiente para la toma de decisiones que lleven a una mayor eficiencia del proceso, llegando a los valores meta o incluso superándolos.

1.8. Alcances

El proyecto se centra en la evaluación y optimización del circuito de flotación de oro de la Planta Vallenar de ENAMI, con el objetivo de identificar y analizar las condiciones operacionales que afectan la recuperación de oro fino. Se realizarán ensayos a escala de laboratorio para caracterizar el mineral, evaluar parámetros de flotación y modelar distintas configuraciones del circuito, determinando de manera teórica la opción más eficiente. Por lo tanto, el proyecto impactará directamente a la comunidad de pequeños y medianos mineros de la región de Atacama, específicamente a los que se dediquen a la extracción de minerales de oro.

CAPÍTULO II. MARCO TEÓRICO

2.1. Antecedentes de la empresa: Empresa Nacional de Minería (ENAMI). Historia

La historia de la Empresa Nacional de Minería (ENAMI) se remonta a 1883, cuando la Sociedad Nacional de Minería (SONAMI) promovió la creación de la Caja de Crédito Minero (CACREMI), con el objetivo de apoyar a los pequeños productores. Esta institución fue clave para evitar que los mineros fueran perjudicados por intermediarios, permitiéndoles acceder al financiamiento y facilitando la compra y el tratamiento de minerales de baja ley.

En 1930, la industria del cobre enfrentó una grave crisis como consecuencia de la Gran Depresión. La drástica caída en los precios del metal (llegando a 6 centavos de dólar por libra) provocó el colapso de varios grandes productores, lo que llevó al gobierno a diseñar proyectos de ayuda para el sector minero.

Uno de los hitos más relevantes ocurrió en 1952, cuando se inauguró la primera fundición estatal en Paipote, un proyecto impulsado por Hernán Videla Lira, cuyo nombre adoptaría la instalación en 1983 en su honor. Tres años más tarde, en 1955, se creó la Empresa Nacional de Fundiciones (ENAF) con el propósito de aumentar la capacidad del país para procesar minerales, evitando su exportación en bruto.

En 1960, la Caja de Crédito Minero y ENAF se fusionaron para dar vida a ENAMI, cuyo propósito fue consolidar el apoyo al desarrollo de la pequeña y mediana minería nacional. En los años siguientes, la empresa expandió su infraestructura. En 1973 se creó la **Planta Vallenar**, que pasaría a ser propiedad total de ENAMI en 1984.

En tiempos más recientes, entre 2015 y 2018, ENAMI impulsó un Plan Estratégico centrado en la modernización de la empresa, con énfasis en la innovación, la sustentabilidad y el fortalecimiento de su rol institucional. En 2018, se aprobó una Política

de Género que buscó promover la igualdad y mejorar el clima laboral. Este compromiso se reflejó en 2020, cuando ENAMI fue reconocida por su inserción laboral femenina, logrando una participación de mujeres del 17%, el doble del promedio nacional en la industria minera.

Finalmente, en 2021, ENAMI marcó un hito al convertirse en la primera empresa minera estatal en operar con 100% energías limpias en sus cinco plantas de beneficio y en la fundición Hernán Videla Lira, reafirmando su compromiso con la sostenibilidad y el futuro energético del país. (Empresa Nacional de Minería (ENAMI), s.f.)

2.2. Planta ENAMI Vallenar: Ubicación

El Proyecto se localiza en la Provincia de Huasco, Comuna de Vallenar, Región de Atacama, aproximadamente a 2,0 km al noreste de la ciudad de Vallenar, específicamente en el sector denominado Llanos de Marañón. (Ver figura 2.1)

El acceso a la empresa es desde el cruce de la carretera a Alto del Carmen, desde la Ruta 5. Desde dicho cruce, la distancia a recorrer es de 3,4 km. por la ruta Alto del Carmen. (Servicio de Evaluación Ambiental (SEA), 2015)



Figura 2.1. Vista satelital de la Planta Enami Vallenar. (Google Earth, 2025)

2.3. Planta ENAMI Vallenar: Información general

La Planta Vallenar se dedica a la compra y procesamiento de minerales de cobre, oro y plata provenientes de pequeños mineros, contando con dos líneas de producción diferenciadas: una para minerales sulfurados y otra para minerales oxidados. El resultado de estos procesos es concentrado de cobre y cátodos de alta pureza, respectivamente.



Figura 2.2. Entrada planta ENAMI Vallenar

En términos operativos, ambos tipos de mineral comparten etapas iniciales de recepción y chancado. La recepción mensual alcanza aproximadamente 38.000 toneladas, distribuidas en 26.000 toneladas de minerales oxidados, 12.000 toneladas de minerales sulfurados y una fracción menor de minerales auríferos y de fundición directa. Posteriormente, el chancado se realiza en dos líneas con capacidad conjunta de 100

toneladas por hora, asegurando granulometrías adecuadas según el destino del mineral: flotación o lixiviación.

Para el caso de los minerales sulfurados, el proceso comprende molienda en molino de bolas, flotación en circuitos Rougher, Scavenger y Cleaner, y finalmente espesamiento y filtración, con la recuperación de agua clara para recirculación y la disposición del material estéril en el depósito de relaves.

En cuanto a los minerales oxidados, se procesan mediante un circuito hidrometalúrgico que incluye aglomeración con ácido sulfúrico, lixiviación en pilas dinámicas, extracción por solventes (SX) y Electroobtención (EW). Este esquema permite la obtención de cátodos de cobre de alta pureza, con una recuperación estimada del 80% y parámetros de diseño en concordancia con los estándares de la industria.

En suma, la Planta Vallenar integra procesos metalúrgicos de conminución, concentración y recuperación hidrometalúrgica, posicionándose como un actor clave para la pequeña minería regional. La propuesta del nuevo depósito de relaves espesados responde a la necesidad de asegurar la continuidad operacional, reforzando la sustentabilidad de la planta y su aporte al desarrollo minero local.

2.4. Misión

ENAMI es el gestor de las políticas públicas del Estado de Chile para el fomento y desarrollo de la pequeña y mediana minería, cuyo protagonismo se refleja en el impulso al crecimiento y la competitividad de manera sustentable. Para lograr lo anterior, ENAMI despliega en su negocio todo su conocimiento del mercado minero, con flexibilidad e innovación, potenciando y estimulando la actividad y los negocios mineros de todo tipo de minerales y productos mineros en el país, dando acceso al mercado internacional, generando y entregando condiciones financieras y comerciales atractivas a la pequeña y mediana minería y desarrollando sus propios procesos y operaciones de manera rentable, eficiente, segura, con responsabilidad social empresarial y en armonía con el medio

ambiente. Para ello, ENAMI se preocupa por el desarrollo de su organización y de sus trabajadores, de la incorporación de modelos y tecnologías de gestión, y de la articulación de relaciones con sus aliados estratégicos, productores mineros, en un clima de entendimiento con los actores relevantes de la empresa.

ENAMI es la empresa del Estado de Chile que ejerce un rol único en el país en la promoción, implementación y aplicación de instrumentos de fomento, en la gestión de propiedad minera, en el desarrollo de alianzas y asociaciones con terceros, que permiten mejorar las condiciones para el desarrollo de la pequeña y mediana minería.



Figura 2.3. Entrada planta ENAMI Vallenar

2.5. Historia del oro a nivel Mundial

Los científicos creen que el oro fue producido por la nucleosíntesis de supernovas, al menos es tan antiguo como nuestro planeta. Estas estrellas, con una masa 8 veces mayor que el sol, explotaron formando metales pesados y estas partículas de polvo entraron al campo gravitacional de la Tierra.

Como la Tierra aún estaba en formación, el hierro fundido se hundió hacia el interior, arrastrando los metales preciosos como el oro y el platino, y formó lo que conocemos como el núcleo (La apasionante historia del oro: desde la Antigüedad hasta nuestros días). No todo el oro descendió, una parte quedó en el manto y en la corteza terrestre. Además, se cree que la gran parte de este mineral llegó a través de meteoritos, a su vez el agua caliente que fluye a través de las rocas en el proceso geológico hidrotermal disuelve las pequeñas partículas de oro y las concentra en grietas a través de vetas que afloran en la superficie.

Estas concentraciones de mineral fueron aprovechadas en la historia de la humanidad, siendo así uno de los primeros metales en ser trabajados por el ser humano. En las civilizaciones como Egipto, Mesopotamia e India, aproximadamente 400 a.C. se utilizaban principalmente en elementos como adornos, joyas.

En los años 1000 a.C – 500 d.C los Peras, griegos y Romanos consolidaron el oro como un símbolo de riqueza en su imperio, así como se fabricaron las primeras monedas de oros estandarizadas. En el otro hemisferio del continente los Incas, Aztecas y Mayas utilizaban el oro como ofrendas religiosas, en la conquista de América siglo XVI tras la llegada de los españoles, grandes cantidades de oro y plata fueron extraídas y llevadas a Europa. Esto generó una revolución de los precios en el continente. Con ello llegó la fiebre del oro (Siglo XVII – XIX) acelerando el crecimiento en el ámbito minero.

2.5.1. Historia del oro a nivel local

La minería de oro en Chile existe desde, al menos, el año 700 d.C. cuando las culturas diaguita y molle extraían oro (Cuadra y Dunkerley 1991). Con la llegada de los españoles se impulsa fuertemente la explotación de lavaderos de oro y la producción se ha mantenido con algún nivel a lo largo de toda nuestra historia. En la historia más reciente del país la producción, que fue bastante baja durante el siglo XX, se vio fuertemente impulsada en la década de los 80 (17 ton anuales) con la apertura de las minas El Indio y Guanaco, y creció sistemáticamente hasta alcanzar un máximo de 54,1 ton en el año 2000. (A 30 años del Plan Aurífero Nacional, una revisión a la minería de oro en Chile).

2.5.2. Resultados producción global oro nivel nacional.

En la actualidad la extracción del mineral de oro en nuestro país siendo una proporción menor, pero no por ella, menos importante. En el año 2024 el sector minero experimento un crecimiento del 9 % de sus exportaciones, debido al mayor volumen de exportación de oro en un 31,3 % y, en segundo lugar, cobre en un 18,2 % respecto al año 2023.

Tabla 2.1. Valores de embarques de exportación de la minería chilena 2020-2024

Tipo de mineral	2020		2021		2022		2023		2024	
	US\$	%	US\$	%	US\$	%	US\$	%	US\$	%
Total, Minería	43603,9	100,0	60735,0	100,0	58151,5	100,1	55805,0	100,0	60491,0	100,1
Cobre	37992,4	87,1	53442,8	88,0	43830,6	75,4	43020,6	77,1	50835,6	84,0
Hierro	1512,1	3,5	2445,1	4,0	1681,7	2,9	1648,8	3,0	1503,5	2,5
Salitre y Yodo	740,6	1,7	663,2	1,1	1253,0	2,2	1450,6	2,6	1429,9	2,5
Carbonato de Litio	632,7	1,5	882,8	1,5	7762,7	13,3	4977,8	8,9	2582,3	4,3
Molibdeno	1214,9	2,8	1637,3	2,7	1833,0	3,2	2362,6	4,2	1925,4	3,2
Oro	848,6	1,9	876,9	1,4	867,1	1,5	977,3	1,8	1283,6	2,1
Plata	350,3	0,8	415,1	0,7	398,1	0,7	505,7	0,9	479,0	0,8
Otro	312,3	0,7	371,8	0,6	525,3	0,9	861,6	1,5	451,7	0,7

Fuente: Sernageomin

La producción global de oro del 2024 (37.247 kg) aumentó un 4,1 respecto del 2023 (35.790 kg) y su precio experimento un aumento significativo de 22,89%.

Tabla 2.2. Producción de oro, total anual y precio promedio, años 2015-2015

Año	Miles de kg ¹	US\$/oz ²
2015	42,5	1.160,06
2016	46,3	1.253,40
2017	37,9	1.257,80
2018	37,1	1.269,28
2019	38,5	1.392,50
2020	33,9	1.771,00
2021	34,2	1.799,20
2022	40,0	1.800,80
2023	35,8	1.941,67
2024	37,2	2.386,20

Fuente: Sernageomin

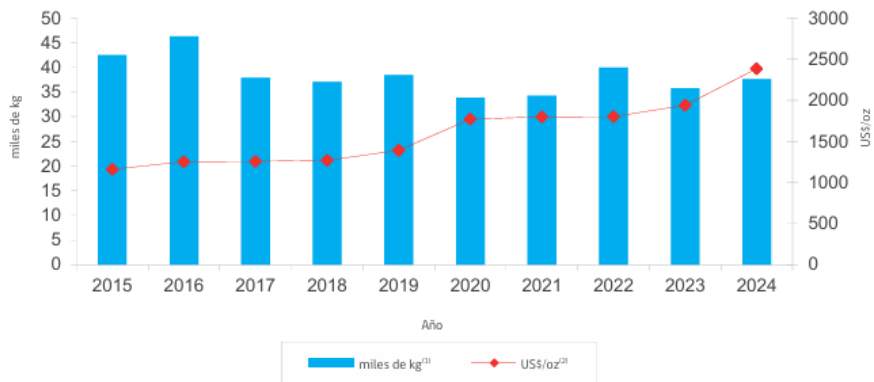


Figura 2.4. Relación producción/precio de oro, años 2015-2024

En cuanto al tipo de recurso, los proyectos de cobre siguen siendo los de mayor interés para las compañías, seguidos por los proyectos de cobre con otros minerales asociados (metales base y metales preciosos), y por los proyectos enfocados en minerales de oro y plata.

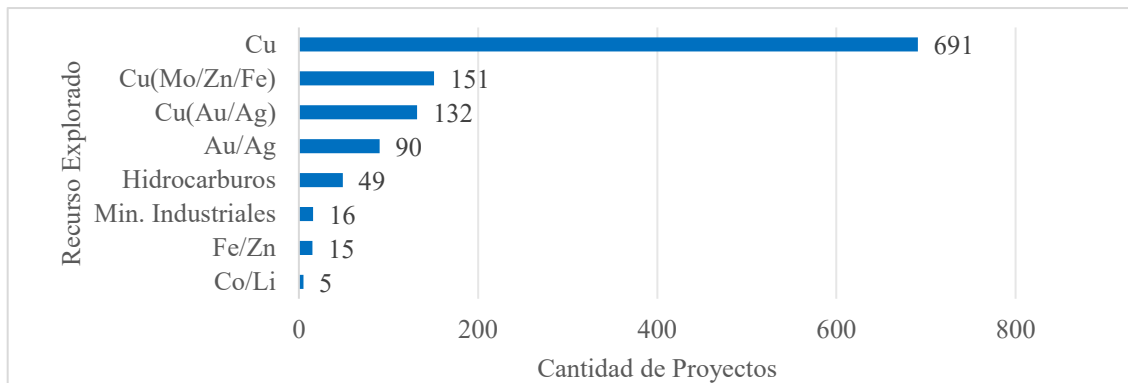


Figura 2.5. Porcentaje de iniciativas por tipo de recurso, acumulados al 2024

Tabla 2.3. Producción (tmf) de minerales metálicos y su variación porcentual, años 2023-2024

Minerales metálicos	2023	2024	% Variación
Cobre (tmf)	5.335.892	5.566.803	4,3
Molibdeno (tmf)	44.127	40.570	-8,1
Oro (kg)	35.790	37.247	4,1
Plata (kg)	1.262.287	1.354.564	7,3
Hierro (tmf)	11.500.149	9.770.948	-15
Plomo (tmf)	325	367	12,9
Zinc (tmf)	22.059	31.959	44,9

Fuente: Sernageomin

Tabla 2.4. Producción (tmf) de minerales metálicos por región, según tipo de mineral, año 2024

Región	Cu (tmf)	Mo (tmf)	Au (kg)	Ag (kg)	Fe (Mineral tms)	Fe (tmf)	Pb (tmf)	Zn (tmf)
Total	5.566.803	40.570	37.247	1.354.564	15.657.707	9.770.948	367	31.959
Arica y Parinacota	4.644	-	-	-	-	-	-	-
Tarapacá	757.846	2.464	-	-	-	-	-	-
Antofagasta	3.174.597	17.327	17.948	822.709	-	-	-	-
Atacama	427.425	3.178	12.610	219.765	14.374.327	8.920.842	-	-
Coquimbo	410.336	8.402	2.962	80.579	1.283.380	850.106	-	-
Valparaíso	268.090	1.585	484	81.979	-	-	-	-
Metropolitana de Santiago	173.802	2.683	2.492	59.442	-	-	-	6.060
O'Higgins	349.776	4.930	721	87.671	-	-	-	-
Aysén	287	-	031	2.420	-	-	367	25.899
Magallanes	-	-	-	-	-	-	-	-

Fuente: Sernageomin

Tabla 2.5. Resumen de producción de la minería metálica por tamaño de empresa y producto (tmf y kg), año 2024


Tamaño	Cu (tmf)	Mo (tmf)	Au (kg)	Ag (kg)	Fe (tmf)	Pb (tmf)	Zn (tmf)
Total							
Grandes	5.377.883	40.570	31.979	1.308.054	5.231.346	-	6.060
Medianas	133.970	-	3.703	36.888	4.539.602	367	25.899
Pequeñas	54.950	-	1.565	9.621	-	-	-

Fuente: Sernageomin

2.5.3. Definición del oro

Definición El oro (Au) es un metal precioso, de color amarillo brillante, caracterizado por su elevado peso atómico, ductilidad y maleabilidad. La mayor parte del oro se encuentra en la naturaleza en forma nativa, con plata (Ag) y con los metales del grupo del platino.

Tabla 2.6. Características del Oro

	
Símbolo	Au
Número Atómico.	79
Densidad a 20°C, (g/cm ³)	196,97
Punto de Fusión, (°C)	19,32
Punto de Ebullición, (°C)	1.063
Calor Latente de Fusión, (cal/g)	2.970
Calor Latente de Vaporización, (cal/g)	1.496
Calor Específico a 18 °C, (cal/g)	0,0312
Valencia	1-3
Dureza (Escala Mohs)	1,5-3
Estructura cristalina	Cúbica centrada en las caras.

2.5.4. Usos del oro

Debido a sus propiedades físicas se ha utilizado desde la antigüedad en joyería, orfebrería y decoración, convirtiéndose en el máspreciado de los metales nobles. Con el desarrollo de la ciencia y de la tecnología, en la actualidad se usa, también, en la industria y en la medicina. Su alta valoración comercial dio lugar a que se generalizase como unidad monetaria y se convirtiera en patrón de cambio en el mercado internacional.

2.5.5. Producción de oro

La producción de oro en Chile se lleva a cabo, principalmente, en las siguientes regiones: de Antofagasta, Atacama, Coquimbo, Valparaíso, Metropolitana de Santiago, del Libertador General Bernardo O’Higgins y de Magallanes y de la Antártica Chilena, regiones donde se concentra la mayor parte de las reservas conocidas del país. Esta producción proviene de las empresas de la minería del oro y del cobre y, en menor medida, del plomo y zinc, y de la plata, y se presenta, principalmente, bajo la forma de oro metálico, metal doré y concentrados de oro. La producción alcanzó a un total de 37.247 kg el año 2024, lo que significó un aumento del 4,1% respecto del 2023.

Tabla 2.7. Producción (kg) de oro, según procedencia, año 2024

Procedencia de producción de oro	Producción (Kg)
Total	37247
Minería del oro	16467
Minería del cobre	20749
Minería del plomo y zinc	31

Fuente: Sernageomin

Las empresas de la minería del oro produjeron 16.467 kg, correspondientes al 44,2% del total nacional anual, desagregado de la siguiente forma: grandes empresas, 76,9% (12.675 kg); medianas empresas, 16,4% (2.699 kg) y pequeñas empresas, 6,6% (1.093 kg) de ese total.

Tabla 2.8. Producción de oro (kg) medianas empresas, por tipo de producto, año 2024

Tipo de producto de medianas empresas minería del oro	Producción (Kg)
Total	2699
Metal doré	1830
Concentrados	823
Minerales de fundición	46

Fuente: Sernageomin

Tabla 2.9. Producción de oro (kg) pequeñas empresas, por tipo de producto, año 2024

Tipo de productos de pequeñas empresas mineras del oro	Producción (kg)
Total	1093
Metal doré	-
Concentrados	284
Oro en barra	60
Minerales de fundición	9
Minerales de oro concentración	740

Fuente: Sernageomin

Algunas de las empresas grandes, medianas y pequeñas de la minería del cobre produjeron un total de 20.749 kg, que corresponden al 55,7% de la producción nacional anual.

Tabla 2.10. Producción de oro (kg), procedente de la minería del cobre, año 2024

Producción procedente de la minería del cobre	Producción (kg)
Total	20.749
Grandes empresas	19.304
Medianas empresas	973
Pequeñas empresas	472

Fuente: Sernageomin

2.6. Flotación de sulfuros

2.6.1. Proceso de flotación

La flotación de minerales es un proceso fisicoquímico en el cual las especies útiles son separadas de la ganga gracias a la adhesión de partículas a burbujas de aire dentro de las celdas de flotación. La probabilidad de que esta adhesión ocurra está directamente relacionada con la hidrofobicidad de la superficie mineral, propiedad que se obtiene mediante la acción de reactivos colectores. El rol de las burbujas consiste en transportar las partículas hasta la superficie, donde se forman las espumas que serán recolectadas como concentrado. Para que esto suceda, las burbujas deben resistir la turbulencia y agitación propias de la celda, garantizando la estabilidad del transporte.

En el proceso de adhesión entre una burbuja y una partícula, se distinguen varias etapas. En primer lugar, debe ocurrir una colisión física entre ambos. Durante este breve instante, la partícula y la burbuja están separadas por un film de agua que actúa como barrera. Para que la colisión sea exitosa, dicho film debe adelgazar hasta romperse, generándose una nueva interfaz mineral/aire. La espontaneidad con la que ocurre esta ruptura, así como la

estabilidad posterior de la unión, dependen de la hidrofobicidad del mineral. En otras palabras, un mineral hidrofóbico tenderá a permanecer adherido a la burbuja, mientras que uno hidrofílico se separará y retornará a la pulpa.

Para obtener buenos resultados en términos de ley y recuperación, la liberación de las especies útiles es fundamental. Esta se logra en etapas previas de conminución, tales como molienda y remolienda, alcanzando tamaños de partícula óptimos por debajo de las 100 μm . La eficiencia del proceso de flotación depende de tres aspectos principales: los reactivos, el tipo de equipos y las variables de operación.

2.6.2. Reactivos usados en flotación

Su aplicación permite modificar las propiedades tanto de las partículas útiles como de la ganga mediante el ajuste del ambiente químico y electroquímico de la pulpa. Los colectores son compuestos orgánicos con propiedades surfactantes que poseen un grupo polar hidrofílico y un grupo no polar hidrofóbico. Estos se adsorben en la interfaz sólido/líquido y confieren carácter hidrofóbico a la superficie del mineral, facilitando su adhesión a las burbujas. Los espumantes, también compuestos orgánicos, tienen la función de estabilizar la espuma y de asegurar que las burbujas resistan su trayecto hasta la superficie, influyendo directamente en la cinética de adhesión. Por último, los modificadores de ambiente actúan intensificando o reduciendo la acción de los colectores sobre determinadas especies minerales, permitiendo de este modo una mayor selectividad.

Variables de flotación

2.6.3. Granulometría del mineral

Es uno de los factores más influyentes. Existe un rango de tamaño de partícula que favorece la recuperación metalúrgica; en general, se observa una disminución de la recuperación en partículas demasiado gruesas o finas. En el caso de las partículas finas, la baja energía cinética dificulta la formación de un agregado estable con la burbuja, mientras que, por el contrario, pueden ser arrastradas fácilmente a la espuma por efectos

hidráulicos. En la etapa Rougher no siempre es necesaria una liberación total, sin embargo, en las etapas de limpieza se requiere remolienda para asegurar la selectividad.

2.6.4. Dosificación y el tipo de reactivos empleados.

Los colectores determinan la hidrofobicidad del mineral, y los espumantes influyen en la altura y estabilidad de la espuma, afectando directamente la retención de partículas. La etapa de acondicionamiento es crítica, pues algunos reactivos deben agregarse en la molienda para maximizar su contacto con la pulpa, mientras que otros se incorporan directamente en los acondicionadores antes de la flotación.

2.6.5. Densidad de pulpa o porcentaje de sólidos

Usualmente se establece desde la molienda y clasificación, y afecta el tiempo de residencia de las partículas en la celda, así como la capacidad del circuito. En plantas concentradoras de cobre, la flotación rougher opera entre un 30 % y 45 % de sólidos, mientras que en Cleaner se utilizan porcentajes menores para favorecer la selectividad.

Tiempo de residencia

Se ajusta en función de las características del mineral y de las demás variables de proceso, siendo determinado mediante pruebas cinéticas.

2.6.6 Influencia del pH

El pH es probablemente la variable de control más utilizada, dado que incide en la recuperación, la selectividad y la depresión de minerales. En la flotación de cobre, por ejemplo, la cal se emplea para mantener el pH en valores óptimos, además de actuar como depresor de pirita en la etapa de limpieza.

2.6.7. Aireación y acondicionamiento de la pulpa

La aireación regula la probabilidad de colisión entre partículas y burbujas, mientras que el acondicionamiento otorga el tiempo necesario para que los reactivos actúen eficientemente sobre la superficie mineral.

2.6.8. Calidad del agua

El proceso debe ser considerada, ya que la reutilización de agua de proceso, aunque reduce consumos, puede incrementar la concentración de ciertos iones en solución, los cuales afectan negativamente la flotación si superan niveles críticos

2.6.9. Flotación de oro

La flotación es uno de los procesos más utilizados en las plantas de beneficio de minerales de oro sulfurado, debido a su gran eficacia para recuperar este metal cuando se encuentra en partículas muy finas. Este método resulta especialmente adecuado para tratar minerales de oro diseminados, vetas de cuarzo aurífero con buena flotabilidad, minerales de sulfuro aurífero polimetálicos e incluso minerales con presencia de grafito. Una de sus principales ventajas es que permite concentrar el oro, aunque se encuentre en cantidades muy pequeñas, en sulfuros como la arsenopirita o la pirita, que luego se concentran en el producto final.

Dependiendo de las características de los concentrados, estos pueden ser tratados mediante molienda fina y lixiviación con cianuro; en caso contrario, es necesario someterlos a procesos de tostación o fundición. La eficiencia de la recuperación del oro depende en gran medida de su naturaleza mineralógica y de la distribución del tamaño de partícula, por lo que las etapas de trituración y molienda son fundamentales. El mineral crudo, una vez extraído, se somete primero a trituración primaria en una trituradora de mandíbula, seguido por un tamizado con criba vibratoria. Las fracciones más gruesas pasan a una trituración secundaria con trituradoras de cono, que puede repetirse según la necesidad de alcanzar una granulometría adecuada. Tras este proceso, el material se dirige a la

molienda, generalmente en un circuito cerrado con clasificación, utilizando molinos de bolas de diferentes tipos: de rejilla para molienda gruesa y de rebose para molienda fina. Para minerales con buena flotabilidad, alcanzar un 60–80% del material pasando por una malla de 75 μm suele ser suficiente para lograr la liberación del oro. Finalmente, la flotación actúa como un método de separación basado en las diferencias de las propiedades fisicoquímicas de la superficie de los minerales. A través de reactivos y condiciones específicas, se consigue que las partículas de oro asociadas a sulfuros se adhieran selectivamente a las burbujas de aire, mientras que la ganga queda en el residuo. Los diagramas de flujo de flotación, adaptados a cada yacimiento y tipo de mineral, definen la secuencia exacta de operaciones para lograr la máxima recuperación del oro sulfurado. (Zhengzhou Quncheng Machinery Equipment, 2025)

En el proceso de flotación de minerales sulfurados, las especie valiosas principales son: Calcopirita (CuFeS_2), Calcosina (Cu_2S), Covelina, (CuS), Bornita (Cu_5FeS_4), Enargita (Cu_3AsS_4). La ganga que acompaña a estos minerales de interés es la sílice y la pirita. Siendo está ultima, la ganga con mayor dificultad en separar en el proceso de flotación. Para lograr el proceso de flotación de minerales se deben utilizar colectores tipo Xantato y sus derivados, las propiedades de los Xantato son la formación de compuestos insolubles hidrofóbicos con metales polivalentes (compuesto Xantato metálico) y compuesto de oxidación para formar dixantógeno (aceite insoluble altamente hidrofóbico, que por lo tanto, se adsorbe en superficie hidrofóbicas mejorando la flotabilidad)

2.6.10 Caracterización del proceso de flotación

En la industria las celdas de flotación se separan en dos zonas propiamente tal, primeramente, la zona de colección o zona de pulpa y por otra parte zona de limpieza de concentrado (espuma).

La zona en la cual se produce el contacto entre las partículas minerales y las burbujas de gas. Producto del balance de ocurrencia de los fenómenos de colisión, adhesión y

desadhesión, se genera el agregado partícula-burbuja que asciende y se recolecta de la zona de limpieza.

La optimización de la recuperación de oro a partir de minerales sulfurados es un objetivo central y persistente en la metalurgia extractiva. La literatura técnica demuestra que el éxito de estas operaciones depende de un control riguroso sobre un conjunto de variables interconectadas, que van desde la mineralogía del mineral hasta la implementación de tecnologías avanzadas. Los métodos predominantes para la concentración de oro son la flotación y la concentración gravitacional, cuya eficiencia está sujeta a la correcta configuración de parámetros operativos.

2.7. Flotación ENAMI

La flotación en ENAMI es de carácter inicial enfocado a recuperar los minerales sulfurados de cobre presentes en el mineral, por lo que su circuito se constituye como uno de los primeros sistemas de recuperación por flotación implementados en la planta, obteniendo un concentrado de alta ley que posteriormente pueda ser comercializado (ver Figura 2.6).

El proceso inicia con la molienda del mineral proveniente de la etapa de chancado. El equipo principal es un molino Humboldt 10'x11,5', cuya función es reducir el tamaño de las partículas de mineral hasta lograr una adecuada liberación de las especies de cobre, fundamental para la eficiencia de la flotación. La descarga del molino alimenta un sistema de clasificación mediante hidrociclones Cavex, donde el material fino (overflow) avanza hacia la flotación y el grueso (underflow) retorna al molino.

Antes de la flotación, la pulpa se acondiciona (ver figura 2.7) con reactivos que preparan la superficie del mineral para su adherencia a las burbujas. En la etapa Rougher a través de celdas Denver, se logra la mayor recuperación de cobre. Los concentrados se refinan en las etapas Cleaner y Recleaner con celdas Wenco 300. obteniendo un concentrado de mayor pureza. Los relaves de estas etapas se tratan en celdas Scavenger para recuperar

cobre residual, mientras que una celda neumática V-45 optimiza la flotación de partículas finas.

El concentrado final se espesa (espesador 9) y se filtra (filtro de bandas) para reducir humedad antes de almacenarse en la cancha de acopio. Los relaves finales se envían al depósito de relaves.

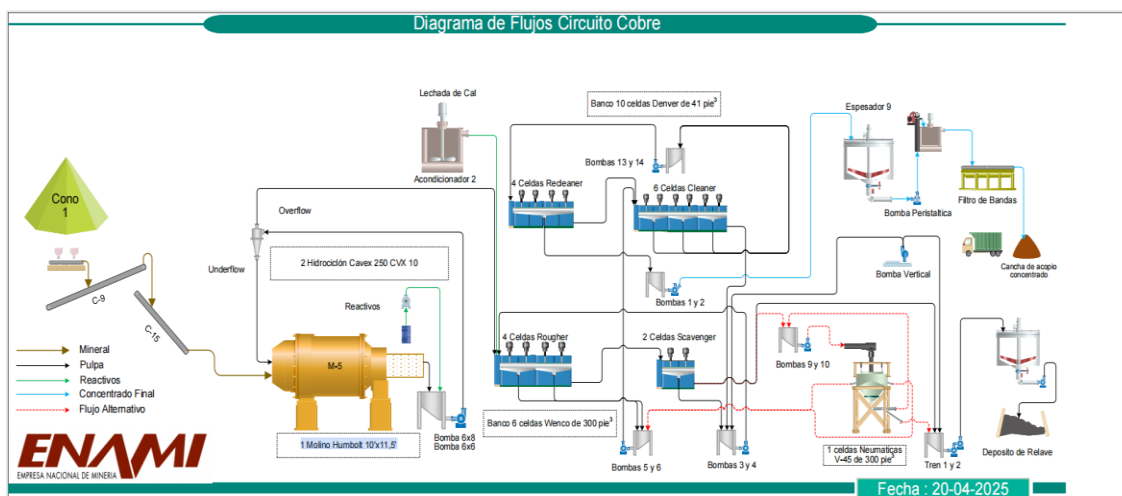


Figura 2.6. Diagrama de flujos circuito cobre Planta ENAMI Vallenar

2.7.1 Flotación Oro ENAMI

Gracias a que el sistema de flotación de cobre fue diseñado antes que el circuito de oro sirvió como base estructural y tecnológica sobre la cual se modelaron los procesos de flotación posteriores (circuito de oro y concentración gravitacional), sin embargo, manteniendo una configuración clásica (ver figura 2.8 y 2.7).

2.7.2. Concentración gravitacional

El circuito de concentración gravitacional (ver figura 2.7) es la primera etapa del proceso de recuperación de oro, y su función principal es separar el oro libre y grueso antes de la

flotación. De este modo, se mejora la eficiencia global del proceso al recuperar tempranamente el metal valioso y reducir la carga hacia las etapas posteriores.

El mineral proveniente de la molienda pasa primero por un tacho o criba donde se eliminan las partículas mayores a 2mm. Luego, la pulpa clasificada ingresa al Ciclón 1, que divide el flujo: el underflow, compuesto por partículas más densas se envía a los concentradores centrífugos, dos Falcon SB-400 y un Knelson KC-CD20, mientras que el overflow, más fino, se dirige directamente al circuito de flotación de oro.

Los concentradores aprovechan la fuerza centrífuga para separar el oro y minerales pesados de la ganga, obteniendo un concentrado gravitacional de alta ley, que se acumula en una cancha auxiliar de acopio. En tanto el relave de estos equipos, que aún contiene algo de oro fino, es enviado nuevamente hacia flotación para su recuperación total.

Además, el ciclón 2 (ver figura 2.7) desempeña un papel clave en el control de la carga circulante del molino, regulando el flujo de agua y sólidos tanto hacia la descarga del molino como hacia flotación, manteniendo estable la operación.

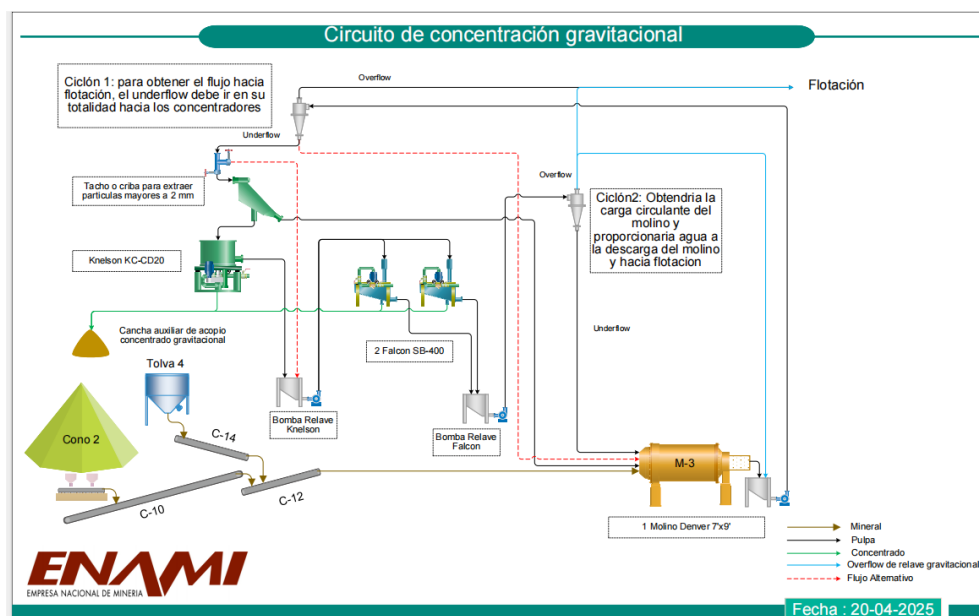


Figura 2.7. Diagrama de flujos circuito concentración gravitacional Planta ENAMI Vallenar

2.7.3. Circuito de oro

Tomando la estructura base del cobre y adaptado para recuperar el oro fino no recuperado por concentración gravitacional. Su objetivo es maximizar la extracción de oro contenido en sulfuros y partículas finas, obteniendo un concentrado de alta ley.

El proceso comienza con la molienda del mineral en un molino Denver 7'x9', que reduce el tamaño de partícula para liberar el oro. La descarga pasa por hidrociclones Krebs D10-B donde el overflow, avanza a flotación mientras que el underflow puede recircular o dirigirse a concentración gravitacional.

La pulpa fina ingresa al acondicionador (ver figura 2.8), donde se agregan reactivos que mejoran la adherencia del oro a las burbujas de aire (ver Tabla 2.3). Luego pasa a la etapa rougher, realizada en bancos de celdas Dorr Oliver de 78 ft³, donde se obtiene la mayor recuperación. El concentrado de estas celdas pasa a las etapas Cleaner y Recleaner, con celdas Wedag de 40 ft³, eliminando impurezas y elevando la ley de concentrado final. Los relaves rougher y Cleaner se procesan en celdas Scavenger para recuperar oro residual, asegurando una pérdida mínima de metal valioso.

El concentrado final se envía al espesador 8 para aumentar su densidad y luego al filtro de prensa, reduciendo la humedad antes del almacenamiento en la cancha de acopio de concentrado. Los relaves finales se cargan al depósito de relaves.

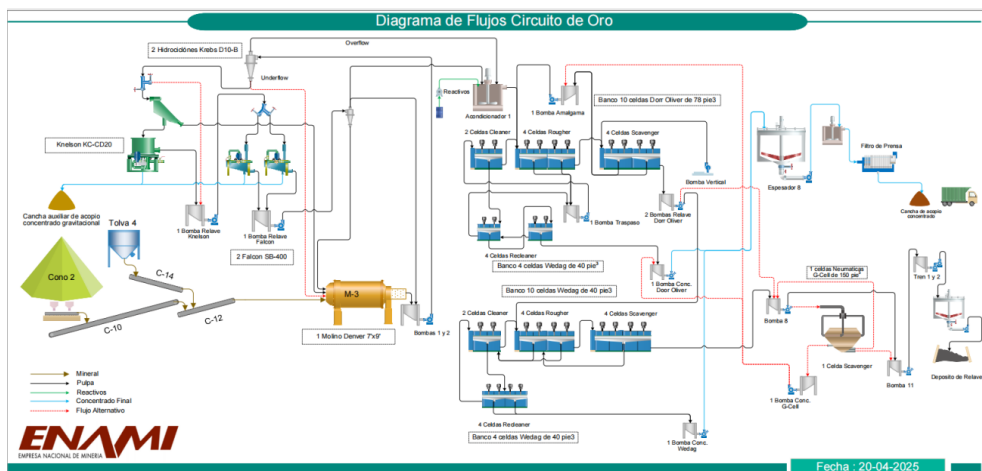


Figura 2.8. Diagrama de flujos circuito oro Planta ENAMI Vallenar

Tabla 2.11. Dosificación de reactivos que actualmente se utilizan en Planta ENAMI Vallenar

Ton/h	404 [cc/min]	MIBC [cc/min]	7524 [cc/min]	208 [cc/min]	1012 [cc/min]	Xant. Amiflico [cc/min]
1,5	0,5	0,9	0,9	0,7	0,7	7,4
2,0	0,7	1,2	1,2	1,0	1,0	9,8
2,5	0,9	1,5	1,5	1,2	1,2	12,3
3,0	1,0	1,8	1,8	1,5	1,5	14,7
3,5	1,2	2,1	2,1	1,7	1,7	17,2
4,0	1,4	2,4	2,4	2,0	2,0	19,6
4,5	1,6	2,7	2,7	2,2	2,2	22,1
5,0	1,7	3,0	3,0	2,5	2,5	24,5
5,5	1,9	3,3	3,3	2,7	2,7	26,9
6,0	2,1	3,6	3,5	2,9	2,9	29,4
6,5	2,3	3,9	3,8	3,2	3,2	31,8
7,0	2,4	4,2	4,1	3,4	3,4	34,3
7,5	2,6	4,5	4,4	3,7	3,7	36,8
8,0	2,8	4,9	4,7	3,9	3,9	39,2
8,5	3,0	5,2	5,0	4,2	4,2	41,7
9,0	3,1	5,5	5,3	4,4	4,4	44,1
9,5	3,3	5,8	5,6	4,7	4,7	46,6
10,0	3,5	6,1	5,9	4,9	4,9	49,0
10,5	3,7	6,4	6,2	5,2	5,2	51,5
11,0	3,8	6,7	6,5	5,4	5,4	53,9
11,5	4,0	7,0	6,8	5,6	5,6	56,4
12,0	4,2	7,3	7,1	5,9	5,9	58,8



Figura 2.9. Celdas Rougher circuito principal Planta ENAMI Vallenar



Figura 2.10. Celdas Cleaner circuito principal Planta ENAMI Vallenar

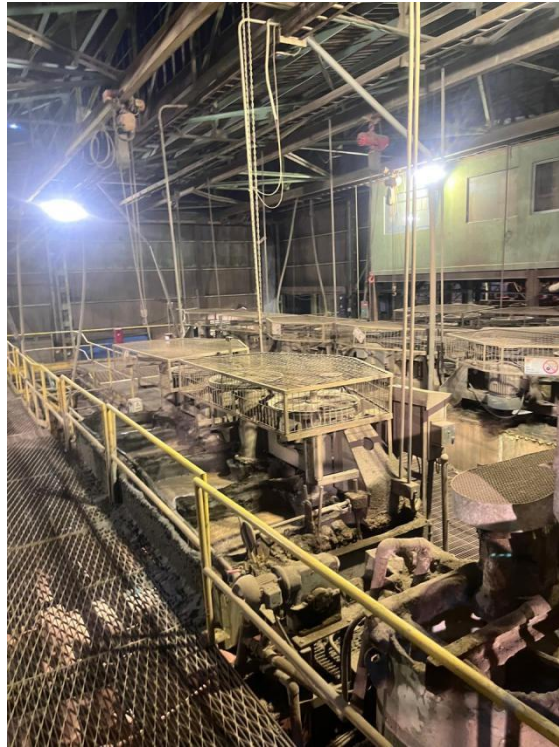


Figura 2.11. Celdas Recleaner circuito principal Planta ENAMI Vallenar



Figura 2.12. Celdas Scavenger circuito principal Planta ENAMI Vallenar

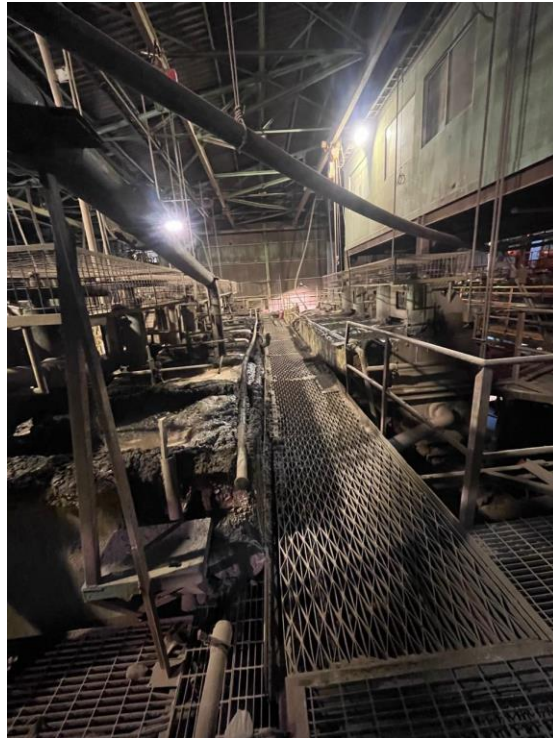


Figura 2.13. Celdas circuito de repaso Planta ENAMI Vallenar

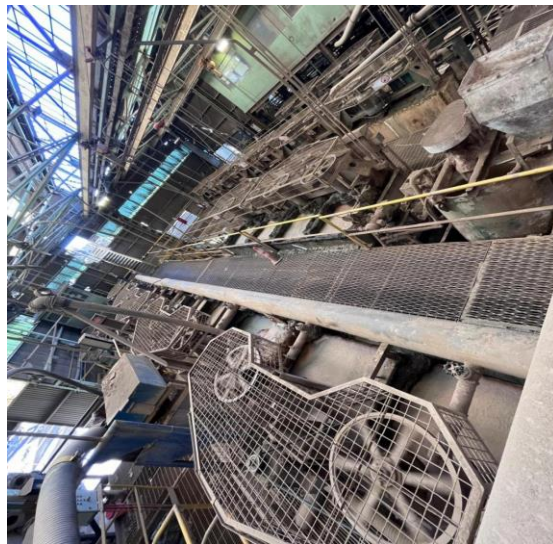


Figura 2.14. Circuito flotación Planta ENAMI Vallenar

El presente trabajo se propone optimizar el proceso de flotación de oro que actualmente desarrolla la Planta Enami Vallenar, por lo tanto, la metodología de trabajo es cuantitativa, dado que se analizarán muestras, a través de un estudio cinético, modificando parámetros de proceso, uno a la vez.

CAPÍTULO III. METODOLOGÍA

3.1. Caracterización fisicoquímica del mineral que ingresa al proceso de flotación

Para la caracterización fisicoquímica de las muestras minerales que ingresan al proceso de flotación de oro se realizan los siguientes análisis:

3.1.1. Análisis granulométrico

El análisis granulométrico tiene por objetivo determinar y clasificar el peso del mineral retenido en los diferentes tamaños de mallas de harnero y tamices en las muestras sólidas analizadas, para verificar la granulometría necesaria para los diferentes procesos.

A continuación, se detalla los equipos y materiales a utilizar en dicho análisis:

A. Equipos y materiales

- Balanza de media precisión
- Bandejas acero inoxidable
- Bandejas enlozadas
- Brocha
- Horno de secado o Plancha a gas.
- Mallas de Harneros ($\frac{3}{4}$ ", $\frac{1}{2}$ ", $\frac{3}{8}$ ", $\frac{1}{4}$ ")
- Pala Jis
- Ro-tap
- Tamiz de diferentes mallas (#1/2", #3/8", #1/4", #8 #10, #14, #20, #30, #40, #50, #70, #100, #140, #200, #270, #325, #400, #-400) para minerales sulfuros.



Figura 3.1. Balanza de media precisión



Figura 3.2. Bandejas de acero inoxidable



Figura 3.3. Bandejas de acero enlozadas



Figura 3.4. Brocha, pala jis



Figura 3.5. Horno secado



Figura 3.6. Mallas de harnero



Figura 3.7. Ro-tap



Figura 3.8. Tamices

Además, se debe tener en cuenta la seguridad en cualquier procedimiento a realizar, en particular, para esta tarea se necesitan los siguientes equipos de protección personal (EPPs): zapatos de seguridad con puntera de acero, lentes de seguridad, respirador con filtros para polvo y gases, slack antiácido (pantalón y camisa), guantes de nitrilo y guantes de cabritilla. Los EPPs nos ayudan a minimizar o controlar los riesgos propios asociados a la tarea, en el caso de este ensayo se reconocen los siguientes: atrapamiento, caída al mismo nivel, exposición al polvo en suspensión, exposición al ruido, golpes, proyección de partículas y quemaduras.

B. Descripción del procedimiento

En primer lugar, se debe estar provisto de todos los implementos de seguridad. Además, se debe observar que los equipos estén en condiciones de trabajar. En caso de encontrar alguna anomalía, se deberá avisar a quien corresponda.

La muestra a la que se realiza análisis granulométrico llega al laboratorio en bolsas de 60x40 cm y otra que es de 40x20 cm se conserva para la determinación de humedad de la muestra.

Para el cálculo de la humedad del mineral, se debe utilizar una bandeja de acero inoxidable, la cual será tarada en la balanza de media precisión (ver figura 3.1) para así pesar 300 gramos (Peso Inicial) de dicha muestra, se anota en el cuaderno ese peso inicial y luego se introduce la bandeja al horno por 4 horas a una temperatura de 105° que permita asegurar la eliminación de agua, luego del término de este tiempo, se retira la bandeja, se deja enfriar y se vuelve a pesar (Peso Final). Con los datos ya determinados, se realiza el cálculo, el cual corresponde a: (Peso Inicial - Peso Final) todo eso dividido por 300, obteniendo la humedad del mineral.

Para realizar la granulometría se debe posicionar las mallas de harnero (ver figura 3.6) en el mesón de forma ordenada, es decir, de la abertura mayor a la menor: $\frac{3}{4}$ ", $\frac{1}{2}$ ", $\frac{3}{8}$ ", $\frac{1}{4}$ ", y bajo esta última una base donde se recibe el mineral más fino (fondo).

Luego se ocupa la bolsa de 60x40 cm que contiene el mineral, la cual se encuentra rotulada desde que fue muestreada en terreno. Se debe masar el mineral que contiene la bolsa en la balanza de precisión media (ver figura 3.1) y luego agregarlo a la pila de mallas de harnero, en forma manual se debe pasar el mineral por las diferentes mallas. El mineral que queda en cada malla se debe pesar y anotar el valor en un cuaderno, como peso retenido para cada diámetro de abertura de malla.

El material que pasa por la malla de $\frac{1}{4}$ " debe ser transferido al tamiz N° 0,16" (ver figura 3.8.). La fracción retenida sobre este tamiz debe ser pesada y el valor correspondiente

registrado en el cuaderno de control. Por su parte, la fracción que pasa por el tamiz N° 0,16” debe ser recolectada en una bandeja y posteriormente sometida a secado, utilizando para ello un horno o una plancha eléctrica, según corresponda (ver figura 3.5.).

Una vez introducido el mineral en la pila de tamices (ver figura 3.8), estos deben moverse manualmente para favorecer el paso progresivo del material a través de las diferentes aberturas. En caso de existir una gran cantidad de mineral fino, este debe agregarse de manera gradual, con el fin de asegurar una clasificación eficiente. La cantidad recomendada para el análisis es de aproximadamente 700 gramos de muestra.

Posteriormente, la pila de tamices se coloca en un equipo Rotap (ver figura 3.7), el cual cumple la función de agitar y golpear mecánicamente la serie de tamices, permitiendo una clasificación más uniforme del mineral. Una vez ajustado y asegurado el sistema, se debe tamizar durante un tiempo de 15 minutos, manteniendo las condiciones operativas adecuadas del equipo para garantizar la reproducibilidad del ensayo.

Finalizado el proceso de tamizado, la serie de tamices se retira cuidadosamente del equipo Rotap y se traslada al mesón del laboratorio metalúrgico. Posteriormente, se procede a retirar cada tamiz de manera individual y a pesar la fracción de mineral retenida en cada uno. El peso correspondiente de cada fracción debe ser registrado en el cuaderno de control.

Dado que la muestra se encuentra en condición seca, es necesario incorporar el valor correspondiente a la humedad para obtener el peso total corregido del mineral. Finalmente, los datos obtenidos deben ser entregados al coordinador del laboratorio, quien se encarga de registrar la información en formato digital y remitir los resultados al área de operaciones para su análisis y control.

Una vez finalizado el pesaje de las fracciones retenidas en cada malla, se debe limpiar cuidadosamente el mesón de trabajo, retirando cualquier material o residuo de mineral que haya podido derramarse durante el proceso. Posteriormente, las muestras deben ser

ordenadas y almacenadas correctamente, junto con aquellas que ya han sido previamente analizadas. Finalmente, se deben trasladar al patio del laboratorio y depositarlas en sus respectivas bolsas identificadas, asegurando así un manejo adecuado y trazable del material procesado.

3.1.2. Determinación de peso específico del mineral. Método del picnómetro

El peso específico es una propiedad física que indica la relación entre el peso de un material y su volumen, es posible determinarlo para un mineral utilizando el método del picnómetro.

A. Equipos y materiales

- Picnómetro.



Figura 3.9. Picnómetro de vidrio

- Balanza Analítica.



Figura 3.10. Balanza analítica

- Espátula.
- Embudo
- Pizeta.
- Papel absorbente.

B. Procedimiento

Antes de iniciar la tarea se debe contar con todos los elementos de protección personal (EPP) exigidos por la normativa de seguridad vigente. Asimismo, se debe verificar que los equipos se encuentren en condiciones operativas adecuadas antes de iniciar cualquier procedimiento. En caso de detectar alguna anomalía o condición insegura se debe informar a quien corresponda, por ejemplo, encargado de laboratorio.

En primer lugar, se verifica que la sala de balanzas se encuentre cerrada, limpia y en orden, garantizando así condiciones adecuadas para el inicio del análisis. El procedimiento se debe realizar por triplicado para cada muestra mineral.

La balanza analítica, se utiliza para realizar los pesajes correspondientes de los picnómetros con agua destilada y del mineral previamente refinado al 100 % bajo malla #200 Tyler. Se registran los valores obtenidos en una tabla Excel que incluye la fórmula para calcular automáticamente el resultado total. Para facilitar la identificación de cada medición, se asignan letras a cada etapa del procedimiento.

Una vez que la sala de pesaje se encuentra en condiciones adecuadas, se procede de la siguiente manera:

(A): Se pesa el picnómetro vacío, limpio y seco, junto con su tapón. Este valor corresponde al primer dato registrado.

(M): Corresponde al peso del picnómetro más la muestra sólida (mineral), la cual se incorpora en el interior del picnómetro seco mediante una espátula y un embudo pequeño. La cantidad de muestra utilizada es de 2 gramos de mineral seco.

(S): Representa el peso del picnómetro lleno con agua destilada y la muestra sólida seca a ras.

(P): Corresponde al peso del picnómetro lleno únicamente con agua destilada a ras, utilizando una pizeta para completar el volumen y secando cuidadosamente el exterior con papel absorbente.

Una vez completado el procedimiento, los valores obtenidos se ingresan al Excel, la cual calcula el peso específico promedio a partir de las tres repeticiones realizadas por cada muestra analizada.

Tabla 3.1. Determinación de peso específico para cada muestra de mineral

Descripción	Peso específico 1	Peso específico 2	Peso específico 3
A			
M			
S			
P			
PER			

- Fórmula para determinar el peso específico:

$$Pe = \text{Peso Específico} = \frac{(M - A)}{(P + M - A - S)}$$

Ecuación 1 - Determinación de Peso Específico

A: Peso del picnómetro vacío y seco (g)

M: Peso del picnómetro seco + mineral seco (g)

S: Peso del picnómetro + muestra + agua hasta enrase (g)

P: Peso del picnómetro solo con agua (g)

3.1.3. Determinación de densidad de la pulpa

La determinación de densidad de pulpa es un procedimiento utilizado en metalurgia para medir la relación entre el peso del material sólido y líquido contenido en una pulpa, con respecto a su volumen total.

A. Equipos y materiales

- Balanza Marcy
- Escobilla
- Recipiente enlozado
- Pizeta de 1 litro
- Tacho de acero de 1 litro
- Tamiz #200 TY.

Identificación de muestras

- Pulpa de mineral

B. Descripción del procedimiento

Tal como ha sido en todos los procedimientos, antes de iniciar cualquier tarea se debe contar con EPP adecuado y revisar equipos, materiales y condiciones, para evitar incidentes o accidentes.

Se debe despejar el mesón de trabajo, con el fin de disponer de un área limpia y ordenada para la instalación de los materiales necesarios y el inicio del control.

Los materiales requeridos son los siguientes: la estructura de soporte para la balanza Marcy, el tacho de acero de un litro con aforo, una escobilla, un recipiente enlozado

destinado a evitar el ensuciamiento del mesón con pulpa, un tamiz de malla N°200 Ty y la balanza Marcy.

Una vez dispuestos todos los materiales, se procede a realizar el control. Se debe tomar el balde que contiene la pulpa y colocarlo sobre el mesón de trabajo. Posteriormente, homogenizar la muestra utilizando la escobilla, considerando que, con el transcurso de las horas, la pulpa tiende a decantarse. Esta acción es especialmente importante cuando la muestra corresponde al turno anterior, con el fin de asegurar la representatividad del material a analizar.

Se introduce la escobilla en el balde con el propósito de mezclar y agitar la pulpa, removiendo los sólidos decantados que se encuentran en el fondo. Una vez obtenida nuevamente una mezcla homogénea, se procede a aforar el tacho, procurando trasvasijar una muestra representativa.

Para garantizar la homogeneidad, el aforo se realiza por etapas: primero, se agita la pulpa con la escobilla y se llena aproximadamente un cuarto del tacho; posteriormente, se repite la agitación y se completa hasta la mitad. En este punto, se toma el tacho de un litro y se suspende en la balanza Marcy. Luego, se vuelve a agitar la pulpa y se continúa adicionando hasta completar el volumen de aforo, lo cual se evidencia mediante el rebalse de la muestra.

Con la ayuda de una pizeta, se elimina el exceso de pulpa que haya escurrido por las paredes del tacho, procurando mantenerlo lo más limpio posible. Finalmente, se procede a registrar el valor de densidad indicado por la balanza Marcy (densidad inicial) (Ver figura 3.11)



Figura 3.11. Determinación de la densidad de pulpa, proceso de flotación de oro

Con precaución, se debe tomar el tacho tapando ambos orificios con el fin de evitar la pérdida de muestra. Posteriormente, se trasvasa la pulpa hacia un tamiz de malla N°200 Ty, dispuesto sobre un soporte en el lavadero del laboratorio. A partir de este momento, se inicia el proceso de tamizado en húmedo.

La muestra debe ser lavada mediante agitación manual, utilizando una manguera con chorro de agua a presión, procurando en todo momento no perder material. El agua de lavado atraviesa la malla N°200, arrastrando las partículas de pulpa de tamaño menor a dicha abertura.

El lavado debe continuar hasta que el agua que atraviese la malla se observe completamente clara. Luego, el material retenido en el tamiz debe ser recogido cuidadosamente y arrastrado con agua industrial hacia el tacho de un litro. Posteriormente, se lleva a la balanza Marcy y se procede al aforo hasta el rebalse, utilizando una pizeta para completar el volumen y mantener el tacho limpio. Se registra la densidad final obtenida con la balanza Marcy.

Ambas densidades obtenidas se llevan a la tabla que muestra la figura 3.12, al cruzar ambas densidades, en la tabla se observa el valor que corresponde al porcentaje de pasante de la #200 Ty

Una vez finalizado el control, se limpia y ordena el mesón de trabajo, así como los materiales e instrumentos utilizados, dejando el área en condiciones adecuadas para el siguiente procedimiento.

Como ejemplo un material arroja un valor de densidad inicial igual a 1,24 y una densidad final de 1,06, al cruzar ambos valores en la tabla se obtiene el número 75, que significa que el 75% del material pasa bajo la malla 200 Ty. Este valor es el rendimiento de mayor eficiencia registrado en molienda para flotación.

		DENSIDAD FINAL																		
		G	2,5	2,6	2,7	2,8	2,9	3	3,1	3,2	3,3	3,4	3,5	3,6	3,7	3,8	3,9	4	4,1	4,2
		D	1,2	1,19	1,18	1,17	1,16	1,15	1,14	1,13	1,12	1,11	1,10	1,09	1,08	1,07	1,06	1,05	1,04	1,03
D	1,45	55,6	57,8	60,0	62,2	64,4	66,7	68,9	71,7	73,3	75,6	77,8	80,0	82,2	84,4	86,7	88,9	91,1	93,3	
E	1,44	54,5	56,8	59,1	61,4	63,6	65,9	68,2	70,5	72,7	75,0	77,3	79,5	81,8	84,1	86,4	88,6	90,9	93,2	
N	1,43	53,5	55,8	58,1	60,5	62,8	65,1	67,4	69,8	72,1	74,4	76,7	79,1	81,4	83,7	86,0	88,4	90,7	93,0	
S	1,42	52,4	54,8	57,1	59,5	61,9	64,3	66,7	69,0	71,4	73,8	76,2	78,6	81,0	83,3	85,7	88,1	90,5	92,9	
I	1,41	51,2	53,7	56,1	58,5	61,0	63,4	65,9	68,3	70,7	73,2	75,6	78,0	80,5	82,9	85,4	87,8	90,2	92,7	
D	1,40	50,0	52,5	55,0	57,5	60,0	62,5	65,0	67,5	70,0	72,5	75,0	77,5	80,0	82,5	85,0	87,5	90,0	92,5	
A	1,39	48,7	51,3	53,8	56,4	59,0	61,5	64,1	66,7	69,2	71,8	74,4	76,9	79,5	82,1	84,6	87,2	89,7	92,3	
D	1,38	47,4	50,0	52,6	55,3	57,9	60,5	63,2	65,8	68,4	71,1	73,7	76,3	78,9	81,6	84,2	86,8	89,5	92,1	
I	1,37	45,9	48,6	51,4	54,1	56,8	59,5	62,2	64,9	67,6	70,3	73,0	75,7	78,4	81,1	83,8	86,5	89,2	91,9	
N	1,36	44,4	47,2	50,0	52,8	55,6	58,3	61,1	63,9	66,7	69,4	72,2	75,0	77,8	80,6	83,3	86,1	88,9	91,7	
I	1,35	42,9	45,7	48,6	51,4	54,3	57,1	60,0	62,9	65,7	68,6	71,4	74,3	77,1	80,0	82,9	85,7	88,6	91,4	
N	1,34	41,2	44,1	47,1	50,0	52,9	55,9	58,8	61,8	64,7	67,6	70,6	73,5	76,5	79,4	82,4	85,3	88,2	91,2	
I	1,33	39,4	42,4	45,5	48,5	51,5	54,5	57,6	60,6	63,6	66,7	69,7	72,7	75,8	78,8	81,8	84,8	87,9	90,9	
C	1,32	37,5	40,6	43,8	46,9	50,0	53,1	56,3	59,4	62,5	65,6	68,8	71,9	75,0	78,1	81,3	84,4	87,5	90,6	
I	1,31	35,5	38,7	41,9	45,2	48,4	51,6	54,8	58,1	61,3	64,5	67,7	71,0	74,2	77,4	81,6	83,9	87,1	90,3	
A	1,30	33,3	36,7	40,0	43,3	46,7	50,0	53,3	56,7	60,0	63,3	66,7	70,0	73,3	76,7	80,0	83,3	86,7	90,0	
L	1,29	31,0	34,5	37,9	41,4	44,8	48,3	51,7	55,2	58,6	62,1	65,5	69,0	72,4	75,9	79,3	82,8	86,2	89,7	
I	1,28	28,6	32,1	35,7	39,3	42,9	46,4	50,0	53,6	57,1	60,7	64,3	67,9	71,4	75,0	78,6	82,1	85,7	89,3	
I	1,27	25,9	29,6	33,3	37,0	40,7	44,4	48,1	51,9	55,6	59,3	63,0	66,7	70,4	74,1	77,8	81,5	85,2	88,9	
I	1,26	23,1	26,9	30,8	34,6	38,5	42,3	46,2	50,0	53,8	57,7	61,5	65,4	69,2	73,1	76,9	80,8	84,6	88,5	
I	1,25	20,0	24,0	28,0	32,0	36,0	40,0	44,0	48,0	52,0	56,0	60,0	64,0	68,0	72,0	76,0	80,0	84,0	88,0	
I	1,24	16,7	20,8	25,0	29,2	33,3	37,5	41,7	45,8	50,0	54,2	58,3	62,5	66,7	70,8	75,0	79,2	83,3	87,5	
I	1,23	13,0	17,4	21,7	26,1	30,4	34,8	39,1	43,5	47,8	52,2	56,5	60,9	65,2	69,6	73,9	78,3	82,6	87,0	
I	1,22	9,1	13,6	18,2	22,7	27,3	31,8	36,4	40,9	45,5	50,0	54,5	59,1	63,6	68,2	72,7	77,3	81,8	86,4	
I	1,21	4,8	9,5	14,3	19,0	23,8	28,6	33,3	38,1	42,9	47,6	52,4	57,1	61,9	66,7	71,4	76,2	81,0	85,7	
I	1,20	0,0	5,0	10,0	15,0	20,0	25,0	30,0	35,0	40,0	45,0	50,0	55,0	60,0	65,0	70,0	75,0	80,0	85,0	

Figura 3.12. Tabla de densidad para determinar % de material pasante bajo #200Ty

3.1.4. Análisis de oro Total

El análisis de oro total tiene como objetivo principal determinar la cantidad de oro presente en una muestra con diferentes métodos utilizados, el método más común es el ensayo al fuego, que se refiere a la química de alta temperatura con principios gravimétricos e instrumentales, asegura la concentración de oro presente en la matriz de la muestra, permitiendo su medición con altos niveles de exactitud, para ello utilizaremos los siguientes equipos y materiales.

A. Equipos y materiales

- Horno de fusión (1000° - 1100°C)
- Horno de Copelación (o mufla) T° 900-960°C
- Plancha calefactora T° 220 y 280°C
- Balanza analítica (o de precisión)
- Micro balanza
- Crisoles de fusión
- Tenaza de hierro
- Pinzas
- Martillo y yunque
- Cápsulas de porcelanas
- Lingoteras/Moldes cónicos de hierro
- Copelas de magnesita
- Ácido Nítrico
- Cloruro de Sodio

B. Descripción del procedimiento

Este análisis por método de fundición es una técnica muy robusta y esencial, pero altamente peligrosa debido a las condiciones extremas y los materiales que se utilizan, involucra la manipulación de hornos a muy altas temperaturas, el manejo de plomo

fundido (altamente tóxico), y el uso de ácidos corrosivos (ácido nítrico), por estas condiciones es importante el uso de EPP para realizar este análisis.

El proceso comienza con pesar en balanza analítica (o precisión) si la muestra presenta un contenido de oro estándar, se pesa 10 gramos con exactitud de 0,01 gramos, y si se presencia que la muestra de mineral es con muy bajo contenido de oro, el tamaño de la muestra se incrementa a 20 gramos, manteniendo la exactitud del pesaje. Posteriormente la muestra se mezcla con los reactivos de fundición (Fundentes) y se adiciona la muestra en un crisol de arcilla de manera homogénea, el contenido del crisol se cubre con una capa de cloruro de sodio (entre 3 y 6 gramos) se lleva a cabo a la etapa de fundición donde se somete la muestra a elevadas temperaturas entre 1000 y 1100°C, durante un periodo de 45 a 55 minutos, se retira el crisol del horno utilizando las tenazas de hierro y el contenido se vacía en una lingotera de moldes cónicos, el material se deja enfriar para que el régulo de plomo (el botón que contiene oro y plata) se solidifique en el fondo, el régulo de plomo se retira de la lingotera y se golpea con un martillo para eliminar la escoria adherida para darle forma cúbica, durante esta etapa llamada copelación, el régulo de plomo se coloca sobre una copela de magnesita, y el conjunto se introduce en un horno de copelación a una temperatura entre 900 y 960°C, donde se debe tener una adecuada entrada de aire, quedando solo en la copela un botón de metales nobles (plata y oro) retirar copelas del horno y depositar en bandejas de hierro fundido para su enfriamiento, en la última etapa de separación comienza con el pesaje del botón oro-plata en una micro balanza retirándolo con unas pinzas, se coloca sobre un yunque y se golpea hasta formar una lámina y se transfiere a una capsula de porcelana, luego se pesa cuidadosamente el botón obtenido de oro y plata en una micro balanza, en esta capsula se adicionan 7 a 10 ml de ácido nítrico al 20% y se ataca la muestra en una plancha calefactora a una temperatura de 220 a 280°C por un periodo de 15 a 20 minutos, se baja la cápsula desde plancha calefactora, se adiciona 0,5 mL de ácido nítrico, para luego dejar enfriar y eliminar la solución lentamente por decantación, se llena con agua hasta la mitad la cápsula y se agrega alrededor de 1 mL de amoníaco para realizar la eliminación de la solución por decantación, se realiza un lavado con agua y se vuelve a eliminar, se deja secando la capsula aproximadamente 15 minutos en un horno mufla para luego calcinarla a temperaturas entre 400 y 600°C por

alrededor de 15 minutos, se procede a enfriar las capsulas con los botones de oro a temperatura ambiente, para luego pesar el botón de oro obtenido en una micro balanza y determinar el contenido de oro de la muestra original.

3.2. Optimización de parámetros de flotación de oro a nivel de laboratorio

Tabla 3.2. Condiciones y esquema actual Planta ENAMI Vallenar

Condiciones	Esquema actual
Granulometría	80% < -200#
Tiempo de molienda	65 minutos
Peso mineral (molienda)	1033 g
Peso agua (molienda)	1400 g
Peso pulpa (flotación)	3180 g
Colector 7524	0,04132 g (40 g/TMS)
Colector 208	0,03099 g (30 g/TMS)
Colector Xantato	0,03099 g (30 g/TMS)
Colector 404	0,025895 g (25 g/TMS)
Espumante MIBC	0,03099 g (30 g/TMS)
Espumante D-250 / A1M2	A1M2 → 0,03099 g
Activador (CuSO4)	No aparece
Curva 85 min	83%
Curva 45 min	78%
Curva 65 min	80%
Duplicado	Sí
pH	7
% sólidos flotación	30%
Paleteo	Cada 15 segundos
Velocidad	1400 rpm
Aire	10 lpm

Actualmente en ENAMI se utilizan los siguientes parámetros en el circuito de flotación de oro, los más importantes a considerar son los tipos de reactivos ya que estos serán los principalmente modificados, junto a la granulometría la cual será mucho más gruesa según el valor de mayor eficiencia obtenido en la tabla de densidad de pulpa (véase tabla 3.12). Se implementará como reactivo adicional el activador CuSO_4 y se quitará el colector 7524 para que no se solapen entre ellos, pues pueden generar el efecto contrario al activar el oro.

Para un análisis y comparación más exacta solo se modificarán los parámetros ya mencionados, manteniendo intacto los restantes, y así sin afectar el propio circuito de flotación.

3.2.1. Pruebas de molienda y flotación Rougher

El objetivo de esta prueba es determinar la recuperación metalúrgica del mineral ,mediante la evaluación de distintas variables operacionales clave durante el proceso de flotación tales el uso de dosificación de reactivos de flotación (colectores, espumantes, depresores, modificadores),uso y dosificación de Cal cual es un regulador de pH de uso común en la concentración de minerales de cobre ,el control de pH de la pulpa y el porcentaje de solidos en la pulpa durante el proceso de molienda y flotación.

A. Equipos y materiales

- Balanza analítica
- Balanza de precisión
- Baldes plásticos
- Bandeja de acero inoxidable y/o enlozadas
- Celda de flotación Denver
- Horno de secado
- Jeringas
- Molino de bolas
- pHmetro

- Papel de limpieza
- Pizeta
- Timer
- Vaso precipitado de 400 ml y 150 ml.

B. Descripción de procedimiento

Iniciando el procedimiento tiende ser un análisis crítico en el control metalúrgico donde al realizarse es vital importancia que todo el personal involucrado, conozca y aplique estrictamente este instructivo, es obligatorio en todo momento utilizar nuestros EPP, que es la principal medida de control para mitigar los riesgos inherentes a la tarea, que incluyen el contacto con sustancias peligrosas cortes, exposición a gases tóxicos y polvos en suspensión,

Primero recepción la muestra del mineral y la identifico claramente para evitar cualquier error, se verifica que el mineral tenga una granulometría 100% menor a la malla #10 TY si no cumple, se utiliza el chancador de mandíbulas y luego el tamiz #10 TY para reducir el tamaño, si el chancador es insuficiente, llevo el material sobre la malla a un pulverizador de disco hasta alcanzar la granulometría requerida, una vez que el mineral es 100% menor a la malla #10 TY, lo extiendo sobre una lona y lo homogenizo por paleo, formando un cono unas 10 veces, aplasto el cono, formo una “torta” y la divido en 4 partes; descarto 2 partes opuestas y repito la operación una vez más, luego roleo el mineral unas 10 veces formo otra “torta”, descarto 2 partes opuestas, y extraigo una muestra del material restante usando un cortador de rifles, para obtener la cantidad necesaria para análisis químico y la determinación del peso específico. Se lleva el rechazo de toda la muestra, almacenada en bolsas que va a un partidor de muestra giratorio de 8 envases de 200 ml, detengo el partidor de muestras a medida que los frascos se llenan para obtener el peso necesario para comenzar a moler y flotar, sé necesita saber la obtención del peso necesario de mineral para cada prueba de molienda y flotación, donde se muestran las siguientes variables: peso específico del mineral, porcentaje de sólido a flotar y volumen útil de la celda. Luego de obtener el peso específico del mineral, se debe conocer el volumen útil de la celda donde

se tara la celda vacía y la lleno con agua, esta se coloca en la celda Denver e introduzco el agitador, el agua se rebalsara en una bandeja, comienzo agitar los RPM solicitadas por la empresa mandante y abro completamente la válvula de aire, esperó que deje de caer agua, cierro la válvula de aire, retiro el agitador, y peso la celda con el agua restante, este peso es el valor del agua, que es lo mismo que el volumen útil o volumen de celda a utilizar, aplicaremos la fórmula para calcular nuestro peso de mineral que es el siguiente:

Peso de mineral:

$$\frac{\%Sólido a flotar * Volumen \acute{u}til celda}{(1 - \%Sólido a flotar) + \left(\frac{\%Sólido a flotar}{Densidad mineral}\right)}$$

Ecuación 2 - Determinación del peso del mineral

Donde el porcentaje de solido a flotar varía entre 30% a 35% o según requerimiento del cliente, igual dependiendo la cantidad de pruebas se prepara bolsas con el peso de mineral ya calculados, luego de conocer el peso del mineral, se debe determinar el agua que se utilizará en el molino de bolas, el que corresponde a:

Agua molino:

$$\frac{Peso de mineral}{\%Sólido molienta} - Peso de mineral$$

Ecuación 3 - Determinación de agua de molino

Nota: % Sólido molienda: valor que es conocido y varía entre un 70 a 75 %.

Con todas las variables ya conocidas, y previamente haber determinado el tiempo a moler para obtener la granulometría correspondiente, introduzco el peso del mineral y la cantidad de agua calculada al molino de bolas, se cierra y se coloca a girar usando un timer o cronometro, al finalizar el tiempo, se retira el molino, abro la tapa y vacío la pulpa generada a un balde, se deja el molino y las bolas limpias, sin restos de pulpa, uso un colador para retener las bolas y dejo que la pulpa baje al balde, limpio con una manguera

y/o pizeta con agua industrial, ajustamos la pulpa donde se vierte la pulpa del balde sobre la celda de flotación, teniendo cuidado de no excederme con el peso por exceso de agua de lavado, si hay exceso de agua, espero que decante y la retiro hasta ajustar el peso de pulpa necesario luego se calcula el peso de pulpa de la siguiente manera.

Peso pulpa:

$$\frac{\text{Peso de mineral}}{\% \text{ Sólido flotación}}$$

Ecuación 4 - Determinación de Peso de la pulpa

Considerando que el peso de la pulpa debe incluir el peso del mineral, el agua y la dosificación de reactivos a utilizar.

Tener en confirmación el reactivo a utilizar y la dosificación para la prueba, La celda de flotación vacía se deja en la balanza de precisión, se tara y luego se agrega la pulpa (mineral más agua) proveniente de la molienda, y luego se agregan los reactivos previamente preparados para llegar al peso de pulpa necesario para comenzar con la flotación. Para la preparación de reactivos, ya teniendo en cuenta que reactivo se utilizara y cuál será la dosificación de cada uno con la que se realizara la prueba de flotación, Se lleva los reactivos que utilizaremos a la sala de pesaje, además de todos los materiales necesarios, estos son: vasos precipitados, jeringas, pizeta con agua industrial, papel de limpieza y balanza analítica. Se deben rotular los vasos y las jeringas con los nombres de los reactivos a utilizar, y verificar que cada vaso este completamente seco para que no se vea alterada la balanza analítica por la humedad que pueda contener el vaso vacío, enciendo la balanza analítica, se introduce el vaso vacío de 150 ml, se cierra la compuerta y se tara la balanza, tomo la jeringa rotulada, saco la muestra de reactivo, abro la compuerta y añado el reactivo al vaso hasta alcanzar el peso requerido, sí el peso es correcto, se retira la jeringa, cierro la compuerta y espero la lectura estable, inmediatamente después, se agrega agua industrial por la posible volatibilidad del reactivo, si el peso es incorrecto, lo ajusto añadiendo con la jeringa o quitando con el papel de limpieza, luego añado los reactivos ya preparados a la celda que está en la balanza de

precisión con la pulpa, retiro la celda de la balanza una vez obtenido el peso de pulpa(mineral+agua+reactivos)y la llevo a la celda Denver, bajando el agitador, Para calcular la cantidad de reactivo a utilizar se debe conocer la dosificación de este y el peso del mineral, esto es de la siguiente forma:

$$\text{Peso real de reactivo (gr)} = \text{Dosis reactivo (gr/ton)} * \text{Peso mineral a flotar (ton)}$$

Ecuación 5 - Peso real del reactivo

Nota: El peso del mineral está en toneladas solo por conversión. Antes de comenzar con la flotación, se debe establecer las revoluciones por minutos (rpm) del agitador, y este es según requerimiento de la empresa mandante, los valores de las rpm pueden variar entre 1200 a 1600 rpm. Además de conocer el tiempo en el que se va a flotar la pulpa y el paleteo cada cierto tiempo (generalmente cada 10-15 segundos) y también se debe tener los materiales listos en el mesón donde se encuentra la celda Denver, y estos son: bandeja de acero inoxidable, que servirá para recepcionar el concentrado que se genera en la flotación, además de una pizeta con agua para la limpieza de la celda cada cierto tiempo, el pHmetro para determinar el pH de la pulpa, el reactivo “cal” si es que se necesita, y un vaso precipitado de 400 ml que se utilizará para agregar cierto volumen de agua y que mantendrá una cantidad de concentrado para poder flotar. La cal es uno de los reactivos de mayor uso en la concentración de minerales de cobre como regulador de pH. Por lo mismo para minerales de cobre se utiliza bastante la cal para mantener un pH básico en la pulpa, y en el caso de minerales de oro no es recomendable utilizar la cal ya que provocaría en la mayor parte de los casos su poca flotabilidad, El tiempo de flotación rougher se determina previamente a través de unas pruebas de cinéticas de flotación. Además, es preciso mencionar que el tiempo de flotación va a depender de la flotabilidad del mineral, el cual por lo general es entre 10 a 15 minutos, más el tiempo de acondicionamiento de 5 minutos, y que puede ser comprobable con la prueba de cinética de flotación. Teniendo todos los materiales listos y con la celda posicionada en el equipo se comienza a realizar la flotación, para ello se coloca el agitador dentro de la celda y se pone a correr el sistema en el que previamente se fijó el tiempo total de la flotación en el timer (5 minutos de acondicionamiento más el tiempo de flotación), y teniendo claro las revoluciones con las

que se va a trabajar. Al comienzo son 5 minutos de acondicionamiento, donde si es necesario regular el pH se le deberá agregar cal a la pulpa y llegar al pH deseado. Se debe utilizar el pHmetro para determinar el pH inicial de la pulpa, y si se utiliza la cal se debe seguir usando hasta llegar al pH requerido, para la limpieza del electrodo se debe hacer con agua industrial, pero con el mismo pH que la pulpa para no ser alterada. Una vez transcurrido el tiempo de acondicionamiento, se procede al tiempo determinado de flotación, y se irá paleteando cada 10-15 segundos (se debe establecer el tiempo antes). Al comienzo del tiempo de flotación, unos 10 segundos antes se debe abrir la válvula de aire de a poco hasta ir aumentando en su totalidad (esto puede ser antes de flotar, a los 30 segundos y al minuto ya abrir completamente la válvula de aire). Posteriormente, y si es necesario, se deben adicionar dosis de agua en cantidad de 50 o 100cc a la vez, y cuantas veces sea necesario para mantener una cierta cantidad de concentrado, anotando todos estos detalles en un cuaderno, además de agregar agua con la pizeta para limpiar las celdas, esto es cada 3 minutos agregar agua por alrededor de la celda, hasta el término de la flotación, Cuando ha terminado el tiempo de flotación, se saca la bandeja donde es depositado el concentrado por el paleteo, la bandeja es rotulada para no producir alguna confusión y se lleva al horno de secado por alrededor de 6 horas a 100°C. Por otro lado, en el caso del relave que es la pulpa que quedo dentro de la celda, se sube el agitador, se retira la celda y se adiciona en su totalidad a la bandeja, además se le debe agregar la pulpa que quedo en el agitador, para ello se coloca otra celda con agua, se introduce el agitador y se echa a correr para que bote todo resto de pulpa que tenga, y después es agregada a la bandeja del relave, donde posteriormente ira al horno de secado por 6 horas a 100°C. Si no es secada completamente la muestra, se debe dar mayor tiempo de secado. Si las muestras ya se encuentran secas, se deben retirar del horno, dejar enfriar, y pesar las bandejas que contienen el concentrado y el relave, descontando el peso de cada bandeja que fue anotada con anterioridad. Luego se preparan las muestras para ser refinadas y posterior confección de paquete para ser llevadas al laboratorio químico y ser analizadas por ley, y así poder calcular su recuperación metalúrgica. Una vez terminadas todas las pruebas, se debe ordenar el laboratorio y limpiar los materiales utilizados.

3.2.2. Estudio de la recuperación de oro variando el tiempo de residencia

Para este estudio se toman diferentes muestras del mismo mineral -#200, de tal forma que se le da un mismo tiempo de acondicionamiento ($t= 8$ minutos) y se varía el tiempo de residencia en el proceso de flotación, de acuerdo con lo que se indica en la Tabla 3.3. Luego se lleva el concentrado obtenido a la estufa a secar para cuantificar el fino de oro recuperado. El porcentaje se estima conociendo el oro total del mineral.

Tabla 3.3. Preparación de muestras para estudio de tiempo de residencia

ID Muestra	Tiempo de Acondicionamiento (min)	Tiempo de residencia (min)
CCR 1	8	1
CCR 2	8	3
CCR 3	8	5
CCR 4	8	7
CCR 5	8	10
CCR 6	8	15
CCR 7	8	20
CCR 8	8	25
CCR 9	8	30

CAPÍTULO IV. RESULTADOS

A continuación, se presentan en este capítulo los resultados de los diferentes métodos utilizados para lograr los objetivos planteados.

4.1. Caracterización fisicoquímica del mineral que ingresa al proceso de flotación

4.1.1. Análisis granulométrico

Tabla 4.1. Resultados: Análisis granulométrico

Malla ASTM	μm	Peso g	Peso %	Retenido acumulado %	Pasante %
1/2"	12500	0	0	0	100
3/8"	9500	287	14,74	14,74	85,26
1/4"	6300	405	20,81	35,54	64,46
8	4750	519	26,67	54,75	54,75
10	3350	400	20,54	75,29	45,25
14	2000	308	15,82	61,79	38,21
20	850	159	8,17	71,8	28,2
30	600	84	4,31	76,12	23,88
40	425	50	2,56	78,69	21,31
50	300	17	0,87	79,56	20,44
70	212	37	1,9	81,46	18,54
100	150	40	2,05	83,51	16,49
140	106	34	1,74	85,26	14,74
200	75	32	1,64	86,9	13,1
270	53	28	1,43	88,34	11,66
325	45	21	1,05	89,39	11,61
400	38	21	1,07	89,47	10,53
-400	-38	205	10,52	100	0

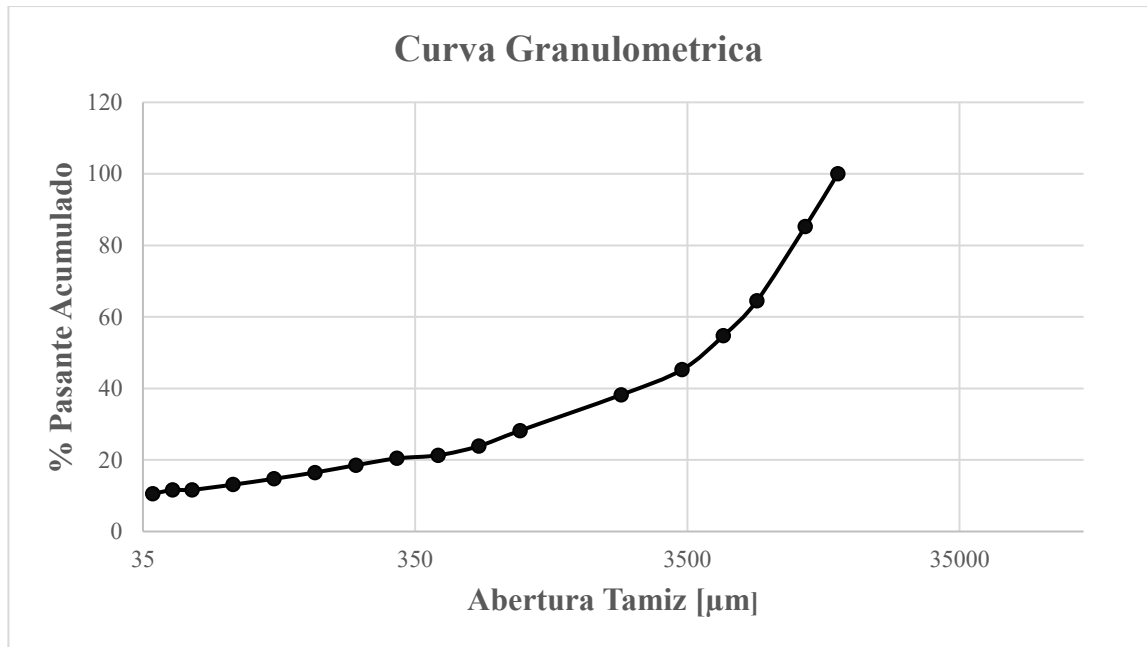


Figura 4.1. Resultados: Curva granulométrica

A partir del análisis de la curva granulométrica presentada, se puede concluir que el material en estudio posee una distribución continua y progresiva de tamaños de partículas, lo que indica que se trata de un material bien graduado. La forma de la curva muestra un incremento gradual del porcentaje pasante a medida que aumenta la abertura de los tamices, sin presentar saltos bruscos ni tramos horizontales prolongados, lo que evidencia una correcta distribución de finos, arenas y partículas gruesas.

Se observa que el contenido de partículas finas es bajo, ya que solo un pequeño porcentaje del material pasa por los tamices más finos. Esto es un aspecto favorable, puesto que un exceso de finos puede afectar negativamente la capacidad de drenaje y la resistencia mecánica del material. A su vez, en la zona intermedia de la curva se aprecia una mayor presencia de partículas del tipo arena, lo que contribuye a una buena capacidad de compactación. Finalmente, el incremento pronunciado del porcentaje pasante en los tamices de mayor abertura confirma una presencia significativa de material grueso, lo que aporta rigidez y capacidad portante a la mezcla.

4.1.2. Determinación de peso específico del mineral

Tabla 4.2. Resultados: Determinación de peso específico del mineral

Descripción	Peso específico 1	Peso específico 2	Peso específico 3
A	44,7486 g	47,0598 g	47,0991 g
M	46,7486 g	49,9598 g	49,0991 g
S	145,2787 g	146,7640 g	148,0080 g
P	143,9790 g	145,4600 g	146,7096 g
PER	2,85 g/cc	2,97 g/cc	2,85 g/cc

La determinación del peso específico del mineral mediante el método del picnómetro arrojó valores de 2,85 g/cc, 2,97 g/cc y 2,85 g/cc, obteniéndose un valor promedio cercano a 2,89 g/cc. Estos resultados presentan una variación mínima entre ensayos, lo que demuestra una buena repetibilidad experimental. El valor obtenido corresponde a un material de densidad media-alta, compatible con minerales de interés económico, validando su aptitud para análisis metalúrgicos posteriores como la determinación de oro total.

4.1.3. Análisis de oro total

Cálculo

$$\text{Ley Au (g/ton.)} = a \times 106/b$$

a = peso botón en g

b = peso de la muestra en g

Tabla 4.3. Resultados: de análisis oro total, composito 1 y 2 de oro

Muestra	Leyes g/t
Comp.1 Au	3,2
Comp.2 Au	2,4

4.2. Optimización de parámetros de flotación de oro a nivel de laboratorio

Tabla 4.4. Resultados: Parámetros de pruebas de flotación, escala laboratorio

Condiciones	Esquema actual	Esquema propuesto
Granulometría	80% < -200#	75% < -200#
Tiempo de molienda	65 minutos	23 minutos
Peso mineral (molienda)	1033 g	1033 g
Peso agua (molienda)	1400 g	1400 g
Peso pulpa (flotación)	3180 g	3133 g
Colector 7524	0,04132 g (40 g/TMS)	No aparece
Colector 208	0,03099 g (30 g/TMS)	0,03099 g (30 g/TMS)
Colector Xantato	0,03099 g (30 g/TMS)	0,03099 g (30 g/TMS)
Colector 404	0,025895 g (25 g/TMS)	0,025895 g (25 g/TMS)
Espumante MIBC	0,03099 g (30 g/TMS)	0,03099 g (30 g/TMS)
Espumante D-250 / A1M2	A1M2 → 0,03099 g	D-250 → 0,03099 g
Activador (CuSO4)	No aparece	0,162 g
Curva 85 min	83%	83%
Curva 45 min	78%	78%
Curva 65 min	80%	80%
Duplicado	Sí	Sí
pH	7	7
% sólidos flotación	30%	30%
Paletéo	Cada 15 segundos	Cada 15 segundos
Velocidad	1400 rpm	1400 rpm
Aire	10 lpm	10 lpm

En esta tabla comparativa se puede apreciar todas las diferencias en los parámetros del circuito de flotación de oro, antes de la propuesta y después de la misma.

A la hora de modificar los parámetros de flotación para la evaluación de la propuesta se buscó mantener el estándar de funcionamiento para las celdas, con el objetivo de lograr una comparación mucho más real y exacta, por ello las curvas granulométricas, velocidad de paleteo, % sólidos, etc. No presentan variación alguna.

4.2.1. Estudio de la recuperación de oro variando el tiempo de residencia

En la tabla N°20 y 21 se presentan los resultados de la recuperación de oro tras la flotación de la muestra a diferentes tiempos de residencia en escala de laboratorio, esto se puede expresar también como una curva de cinética del proceso.

Tabla 4.5. Recuperación actual de oro a diferentes tiempos de residencia, Planta ENAMI Vallenar

ID Muestra	Tiempo de residencia (min)	Recuperación [%]
CCR 1	1	29,2111
CCR 2	3	40,4206
CCR 3	5	45,1129
CCR 4	7	49,5239
CCR 5	10	53,5105
CCR 6	15	57,7689
CCR 7	20	62,4422
CCR 8	25	68,6176
CCR 9	30	74,6499

**Tabla 4.6. Recuperación de oro a diferentes tiempos de residencia, propuesta
Planta ENAMI Vallenar**

ID Muestra	Tiempo de residencia (min)	Recuperación [%]
CCR 1	1	35,38%
CCR 2	3	48,72%
CCR 3	5	53,56%
CCR 4	7	58,01%
CCR 5	10	62,04%
CCR 6	15	65,82%
CCR 7	20	68,49%
CCR 8	25	73,55%
CCR 9	30	75,52%

Los tiempos de residencia requieren una cantidad de minutos óptimos para que el circuito de flotación sea eficiente, estos suelen estar entre los 15 y 20 minutos en las muestras CCR 6 y CCR 7 respectivamente hablando, por lo que nuestro análisis tiene énfasis en ello. Se puede apreciar que en estos dos tiempos de residencia gracias a los cambios en los parámetros se ha logrado incrementar el porcentaje de recuperación metalúrgico (RM), el esquema actual presenta un aproximado de 58% de RM en 15 minutos, mientras que nuestra propuesta lo lleva a un 66% en la misma cantidad de tiempo, un aumento del 8%, mientras que para los 20 minutos el valor incrementa de un 62% a 68% de RM.

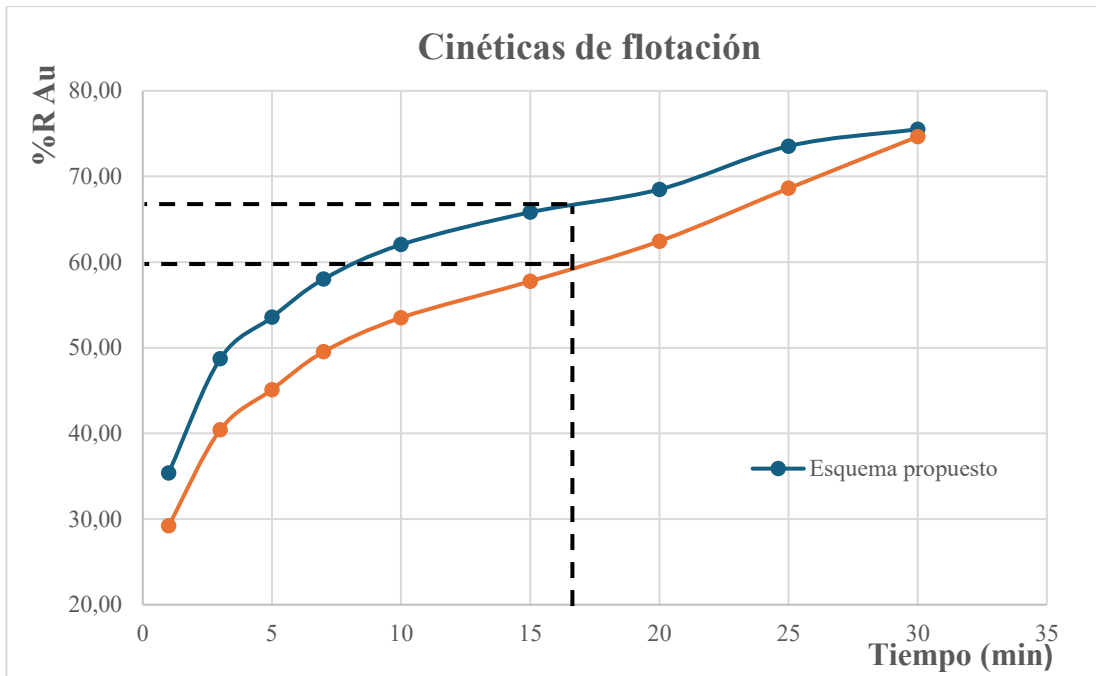


Figura 4.2. Resultados: Cinética de flotación

La cinética de flotación demuestra que el esquema propuesto presenta una respuesta más rápida a la hora de realizar la recuperación de cobre, alcanzando una recuperación óptima en un promedio de tiempo de 17 minutos, con una diferencia de 7% respecto al esquema original

CAPÍTULO V. CONCLUSIÓN

El presente estudio permitió evaluar de manera integral el comportamiento metalúrgico del mineral aurífero que ingresa al circuito de flotación de la Planta ENAMI Vallenar, aportando evidencia técnica para la comprensión de las causas que explican su rendimiento actual y para la identificación de potenciales mejoras operacionales. A partir de la caracterización fisicoquímica realizada (incluyendo análisis granulométrico, densidad del mineral, densidad de pulpa y contenido de oro) se determinó que la alimentación presenta una mineralogía fina, diseminada y con oro predominantemente asociado a sulfuros, lo que refuerza la necesidad de un control riguroso de la molienda y del ambiente químico durante la flotación. Asimismo, los resultados granulométricos confirmaron que la eficiencia del proceso depende estrechamente del porcentaje de material que pasa bajo la malla #200, como se observó que era mayor la eficiencia cuando se trabaja con un 75% bajo la malla #200.

En la etapa de optimización de parámetros a nivel de laboratorio, las pruebas de flotación rougher bajo diferentes condiciones (tiempo de, dosificación de reactivos, pH y % de sólidos) demostraron que el proceso opera con variables subóptimas respecto de las necesidades reales del mineral. La evaluación cinética evidenció una recuperación mejorada cuando se aumenta el tiempo de flotación y se ajusta adecuadamente la dosificación de reactivos clave, especialmente colectores y agentes modificadores. El ensayo también confirmó que un control más estricto del pH y una adecuada proporción de sólidos generan un efecto favorable en la selectividad y en la estabilidad de la espuma.

Los resultados obtenidos permiten concluir que es técnicamente viable mejorar de manera significativa la recuperación de oro mediante la optimización de parámetros operacionales y el uso eficiente de los reactivos. Si bien no se incorporó aún un nuevo reactivo industrial de forma definitiva, la evaluación realizada establece el fundamento técnico para justificar su implementación futura, especialmente si su incorporación mejora la activación de sulfuros auríferos o incrementa la hidrofobicidad de partículas finas que hoy no son recuperadas en el circuito industrial. La evidencia preliminar indica que una combinación adecuada entre un tiempo de residencia extendido, un esquema reforzado de reactivos y

un control refinado del ambiente de flotación permitiría superar las condiciones actuales y acercarse al rendimiento teórico esperado de la planta.

Finalmente, el estudio cumple los objetivos planteados: se caracterizó el mineral de forma representativa, se evaluaron parámetros operacionales críticos y se obtuvieron resultados que permiten proponer mejoras concretas aplicables tanto en laboratorio como en futuras pruebas industriales. La investigación sienta bases sólidas para avanzar hacia una optimización más profunda del circuito de oro, recomendando como pasos siguientes la validación piloto de nuevos reactivos, la revisión del diseño del circuito rougher y la implementación de un control más estricto de la molienda y las condiciones de acondicionamiento. De este modo, el trabajo contribuye directamente al fortalecimiento del proceso productivo de ENAMI Vallenar y al desarrollo de una operación más eficiente, confiable y alineada con los requerimientos del mineral aurífero que procesa.

BIBLIOGRAFÍA

- B. Wills, J. F. (2016). *Mineral Processing Technology: An Introduction to the Practical Aspects of Ore Treatment and Mineral Recovery*. Elsevier.
- CMP. (2024). *CMP una empresa del grupo CAP*. Recuperado el 08 de octubre de 2024, de 100 años de tradición minera: <https://www.cmp.cl/sobre-cmp/tradicion-minera/>
- CODELCO. (2018). *CODELCO Educa*. Obtenido de Flotación "Burbujas de cobre": <https://www.codelcoeduca.cl/codelcoeduca/site/edic/base/port/flotacion.html>
- Condori, A. H. (2019). *Optimización del proceso de recuperación de oro con un concentrador centrífugo para la pequeña minería aurífera*. Tacna: Universidad Nacional Jorge Basadre Grohmann.
- Contreras, A., Olguín, Y., & Valenzuela, E. (2022). *Implementación del rediseño de celda de flotación tipo Denver, en el laboratorio químico Metalúrgico de la Universidad de Atacama, sede Vallenar*. Vallenar: Universidad de Atacama.
- CROMTEK. (s.f.). *CROMTEK*. Recuperado el 12 de septiembre de 2024, de Así funciona un Ro-tap: <https://www.cromtek.cl/2020/12/23/asi-funciona-un-tamiz-ro-tap/>
- Empresa Nacional de Minería (ENAMI). (s.f.). *ENAMI*. Obtenido de Historia: <https://www.enami.cl/SobreENAMI/Pages/Historia.aspx>
- Galvan, V. L. (2018). *Las variables operativas de flotación de los minerales sulfurados de cobre-oro y la mejora de las recuperaciones del oro y zinc en la planta de beneficio Cazaderos de la provincia del Oro-Ecuador*. Machala: Universidad Técnica de Machala.
- Gregory Cuesta Andrade, D. C. (2020). Recovery of gold-bearing minerals through flotation, from the La Panguí sector, Chinapintza mining district - Ecuador. *Conciencia Digital*.
- Luis Valderrama, M. S. (2012). Recuperación de oro grueso en concentrador centrífugo Knelson. *Revista de la facultad de ingeniería*, 35-41.
- Pari, J. S. (2018). *Optimización del proceso de flotación para la recuperación de un preconcentrado de oro en minerales sulfurados de la Minera Colibrí Sac. Caravelí-Arequipa*. Arequipa: Universidad Nacional de San Agustín.

Segura, I. H. (2023). *Implementación de una celda de flotación flash para optimizar la recuperación de oro en el proceso de flotación en una compañía minera aurífera al norte del Perú*. Lima: Universidad Privada del Norte.

Servicio de Evaluación Ambiental (SEA). (31 de Julio de 2015). *Sistema de Evaluación de Impacto Ambiental*. Obtenido de Ficha del Proyecto: Modificación de la Localización y Dimensiones Proyecto Depósito de Relaves Espesados Planta Vallenar:

<https://infofirma.sea.gob.cl/DocumentosSEA/MostrarDocumento?docId=f0/04/3aa660e442b0c7179d9d6cd3f165fc8bddbb>

Stonexbullion. (s.f). ¿Cómo se forma el oro y de dónde proviene? págs.

<https://stonexbullion.com/es/blog/como-se-forma-el-oro-y-de-donde-proviene/>.

Teague, A. J. (2000). The effect of copper activation on the behaviour of free and refractory gold during froth flotation. *International Journal of Mineral Processing*, 35-41.