

**UNIVERSIDAD DE CONCEPCIÓN**

Facultad de Ingeniería

Departamento de Ingeniería Metalúrgica

**Profesores patrocinante**

Dr. Leopoldo Gutiérrez B.

Dra. Isabelle Demers

(Universidad de Québec de  
Abitibi-Témiscamingue, Canadá)

**Profesora co – guía**

Dra. Carmen Neculita

(Universidad de Québec de  
Abitibi-Témiscamingue, Canadá)

**Optimización del proceso de flotación para la  
producción de concentrado de Grafito: Evaluación de  
Celda Denver e Hydrofloat en minerales sulfurados de  
una mina en Québec.**

Javiera Andrea Farías Viacava

Informe de Memoria de Título para optar al Título de  
Ingeniero Civil Metalúrgico

Marzo 2024

## **AGRADECIMIENTOS**

Quiero expresar mi más profundo agradecimiento a mis padres, cuya decisión de inscribirme en el Lycée Charles de Gaulle de Concepción hace dos décadas sentó las bases para las oportunidades que hoy en día tengo. Gracias a su visión y sacrificios, he tenido el privilegio de llevar a cabo mi investigación de tesis en Canadá.

Agradezco sinceramente a la Universidad de Québec de Abitibi-Témiscamingue por su cálida acogida y apoyo constante desde mi llegada hasta la culminación de mi proyecto. En particular, quiero reconocer a mis profesoras Isabelle Demers y Carmen Neculita por su dedicación y orientación inquebrantable a lo largo de este camino académico. También agradezco a mi profesor guía, Leopoldo Gutiérrez, por su disponibilidad y consejos a lo largo de nuestras reuniones en línea.

Mis agradecimientos se extienden a los técnicos de laboratorio del IRME y la URTSM, con especial reconocimiento a Cathy Chouinard por su incansable colaboración y apoyo en todas las etapas de mi investigación. Asimismo, quiero agradecer a Amira Merchichi por su invaluable ayuda en la búsqueda de información y la elaboración del informe.

Por último, no puedo dejar de mencionar a mi pololo Rodrigo, quien ha sido mi apoyo incondicional y fuente de inspiración para embarcarme en esta emocionante aventura académica en el extranjero. Su aliento y motivación han sido fundamentales en mi desarrollo personal y profesional.

## RESUMEN

La creciente demanda de grafito ha impulsado la realización de investigaciones destinadas a optimizar su extracción. En este contexto, el presente estudio, fue realizado en la UQAT, y tuvo como objetivo evaluar las celdas Hydrofloat y Denver para optimizar el proceso de flotación flash en la producción de concentrado de grafito de la futura mina de Lac Knife.

Para poder lograr este objetivo, se realizaron en total 11 pruebas de flotación entre ambas celdas, variando los parámetros operacionales. Además, estas flotaciones se llevaron a cabo a un tamaño de partícula de  $P80 = 648 \mu\text{m}$  y con un porcentaje inicial de carbón de 14.7%.

Los mejores resultados se obtuvieron en las flotaciones realizadas con la celda Denver, en el ensayo n°5 (E5), en la cual se alcanzó recuperaciones de hasta un 78% con leyes de concentrado aproximadas a un 96% de carbón. Esto se logró mediante flotaciones de 4 minutos, con un flujo de aire de 4 LPM, una agitación de 1800 rpm, un porcentaje de sólido de 34%, y con 2,5 g/ton de Diesel y 15 g/ton de MIBC, alimentando este último reactivo, en 2 etapas: en  $t_0 = 0 \text{ min}$  y  $t_1 = 2 \text{ min}$ . Dado los resultados de esta prueba, se replicaron 3 pruebas en las mismas condiciones para validar los resultados.

Por el contrario, en el caso del Hydrofloat, la recuperación más alta alcanzada fue del 26% en la prueba n° 11(E11), y la mayor ley se obtuvo en la prueba n°8 (E8) con un 37%. En la prueba E8, la dosis de colector fue menor que en la prueba E11, siendo de 15 g/ton y 25 g/ton respectivamente, y en cuanto al MIBC, se emplearon 2,5 g/ton para la prueba E8 y 15 g/ton para la prueba E11. Además, en ambos casos se operó durante aproximadamente 12 minutos con un flujo de aire de 4 LPM, un flujo de agua de 2.5 LPM, y un contenido de sólidos del 22% en el Hydrofloat.

Finalmente, dado a los resultados presentados y la dificultad de operar el Hydrofloat de manera óptima debido a diversos factores operacionales, tales como mantener un porcentaje de sólido constante y flujos de alimentación del material continuos, se optó a un corto plazo por continuar el tratamiento del material con la celda mecánica y a un largo plazo estudiar en detalle las variables operacionales del Hydrofloat.

## ABSTRACT

The increasing demand for graphite has spurred research efforts aimed at optimizing its extraction methods. In this regard, our study, conducted at UQAT, aimed to evaluate the performance of Hydrofloat and Denver cells in optimizing the flash flotation process for graphite concentrate production at the prospective Lac Knife mine.

To achieve this goal, we conducted a series of 11 flotation tests using both cell types, with variations in operational parameters. These tests were carried out with a particle size of  $P80 = 648 \mu\text{m}$  and an initial carbon content of 14.7%.

The most promising results were observed in the Denver cell trials, particularly in trial No. 5 (E5), where we achieved recoveries of up to 78% with concentrate grades reaching approximately 96% carbon. This was accomplished through 4-minute flotation cycles, utilizing an air flow rate of 4 LPM, agitation at 1800 rpm, a solids percentage of 34%, and the addition of 2.5 g/ton of Diesel and 15 g/ton of MIBC. The MIBC was added in two stages: at  $t_0 = 0 \text{ min}$  and  $t_1 = 2 \text{ min}$ . Encouraged by these findings, we replicated the conditions in three additional tests to validate the results.

In contrast, the Hydrofloat trials yielded lower results, with the highest recovery recorded at 26% in trial No. 11 (E11) and the highest grade achieved in trial No. 8 (E8) at 37%. Notably, the collector dose in E8 was lower compared to E11, at 15 g/ton and 25 g/ton respectively. Similarly, the MIBC dosage differed between the two trials, with 2.5 g/ton for E8 and 15 g/ton for E11. Operations were conducted for approximately 12 minutes in both cases, with an air flow rate of 4 LPM, a water flow rate of 2.5 LPM, and a solids content of 22% in the Hydrofloat.

Considering the presented results and the operational challenges encountered with the Hydrofloat, such as maintaining consistent solids percentages and continuous material feed, we have decided to continue short-term material treatment using the mechanical cell. However, in the long term, we plan to conduct a detailed study of the Hydrofloat's operational variables.

## ÍNDICE DE CONTENIDO

CAPÍTULO 1. Introducción .....	1
1.1 Marco General.....	1
1.2 Objetivos .....	2
1.2.1 Objetivo general.....	2
1.2.2 Objetivos específicos .....	2
CAPÍTULO 2. Antecedentes Teóricos .....	3
2.1 Estado del Arte.....	3
2.1.1 Descripción del grafito.....	3
2.1.2 Tipos de grafitos.....	4
2.1.3 Yacimientos de grafito en el mundo.....	5
2.1.4 Métodos de tratamientos .....	7
2.2 Fundamentos teóricos .....	9
2.2.1 Localización y aspecto geológico del yacimiento de grafito .....	9
2.2.2 Principios de la flotación.....	9
2.2.3 Reactivos.....	13
2.2.4 Flotación celda Hydrofloat.....	15
2.2.5 Flotación Celda Denver .....	16
CAPÍTULO 3. Desarrollo Experimental .....	20
3.1 Equipos y Reactivos.....	20
3.2 Preparación de Mineral .....	21
3.2.1 Secado del mineral .....	22
3.2.2 Tamizaje en seco .....	22
3.2.3 Análisis mineralógicos, químicos y físicos.....	23
3.3 Proceso de extracción por flotación .....	26
3.4 Circuito 1.....	27
3.4.1 Chancado primario.....	27
3.4.2 Flotación en celda Denver (CD) y celda Hydrofloat (CH). .....	28
3.4.3 Flotación Denver: reproducibilidad del mejor ensayo (E5).....	32
CAPÍTULO 4. Resultados y Discusiones.....	33
4.1 Análisis de muestras del material de cabeza .....	33
4.1.1 Caracterización Mineralógica .....	33

4.1.2	Caracterización Química.....	34
4.1.3	Caracterización Física .....	35
4.2	Ensayos en celda Denver e Hydrofloat .....	36
4.3	Balance de masa.....	37
4.4	Análisis Azufre - Carbono.....	38
4.5	Análisis de recuperación .....	40
CAPÍTULO 5. Observaciones y Recomendaciones .....		42
CAPÍTULO 6. Conclusiones .....		43
REFERENCIAS.....		44
ANEXOS.....		47
Anexo A. Evolución demanda de grafito entre los años 2018 y 2050 (National Minerals Information Center, s. f.). .....		47
Anexo B. Flowsheet global del proceso de extracción de grafito propuesto por SGS.....		47
Anexo C. Minas, proyectos mineros y recursos naturales de Grafito en Quebec (Gouvernement du Québec, 2020). .....		48
Anexo D. Protocolo de preparación de briquetas para microscopio óptico (Adaptación de Issu de Bouzahzah).....		49
Anexo E. Protocolo para la preparación de crisoles para el análisis de contenido de S/C (Adaptación de diagrama de Cathy Chouirnard).....		49
Anexo F. Pruebas de granulometría realizadas para corroborar la preparación del material. ....		50
Anexo G . Masa de las muestras homogeneizadas guardadas en los 12 tarros.....		50
Anexo H. Análisis obtenidos por DRX para las 4 muestras.....		51
Anexo I. Resultados análisis ICP para las 4 muestras de cabeza. ....		53
Anexo J. Resultados de análisis de densidad por picnometría. ....		54
Anexo K. Concentrados y colas resultantes de los ensayos realizados entre E5 y E10.....		55
Anexo L. Concentrados y colas resultantes de ensayos replicados del ensayo 5.....		57

## ÍNDICE DE FIGURAS

<b>FIGURA 1.</b> UNIVERSIDAD DE QUÉBEC DE ABITIBI-TÉMISCAMINGUE (UQAT, 2023). .....	XI
<b>FIGURA 2.</b> ESTRUCTURA CRISTALINA DEL GRAFITO. ● : CARBÓN COMPENSADO Y ○ : CARBÓN DESCOMPENSADO (CHUNG, 2002). .....	3
<b>FIGURA 3.</b> APLICACIONES COMUNES DEL GRAFITO. ADAPTACIÓN DE (MOORES, 2013) Y (DNI METALS INC, 2014). .....	4
<b>FIGURA 4.</b> TIPOS DE GRAFITO. ....	5
<b>FIGURA 5.</b> RANKING DE LOS PAÍSES CON MAYORES RESERVAS DE GRAFITO EN 2022 (GRAFITO, 2022B). .....	5
<b>FIGURA 6.</b> RANKING DE PRINCIPALES PAÍSES PRODUCTORES DE GRAFITO A NIVEL MUNDIAL EN 2022 (GRAFITO, 2022A). ...	6
<b>FIGURA 7.</b> DIAGRAMA DE FLUJO SIMPLIFICADO DEL PROCESAMIENTO DEL GRAFITO (ADAPTACIÓN DE CHELGANI, 2015). ..	8
<b>FIGURA 8.</b> PROVINCIA DE GRENVILLE EN CANADÁ (PROVINCE DE GRENVILLE – GÉOLOGIE QUÉBEC, 2015). .....	9
<b>FIGURA 9.</b> RESUMEN DEL PROCESO DE FLOTACIÓN (GUTIÉRREZ, 2019). .....	10
<b>FIGURA 10.</b> VISUALIZACIÓN DE CAPAS Y BORDES EN LA ESTRUCTURA DEL GRAFITO. ○: CARBÓN, LÍNEAS ROJAS: BORDES Y LÍNEAS AZULES: CAPAS (ADAPTACIÓN DE J.S.LASKOWSKI AND Z. YU, 1994). ..	11
<b>FIGURA 11.</b> ADHESIÓN PARTÍCULA BURBUJA UNA VEZ QUE EL FILM SE ROMPE (ADAPTACIÓN DE GUTIÉRREZ, 2019). .....	12
<b>FIGURA 12.</b> ÁNGULO DE CONTACTO (ADAPTACIÓN DE GUTIÉRREZ, 2019). .....	12
<b>FIGURA 13.</b> ORIENTACIÓN DEL ESPUMANTE EN LA SUPERFICIE DE LA BURBUJA (ADAPTACIÓN DE GUTIÉRREZ, 2019). .....	13
<b>FIGURA 14.</b> ESTRUCTURA Y PARTES DE HYDROFLOAT (ERIEZ FLOTATION, 2022). .....	15
<b>FIGURA 15.</b> DIBUJO ESQUEMÁTICO SIMPLIFICADO CON LAS 3 ZONAS DEL HYDROFLOAT (DEMIR ET AL., 2022). .....	16
<b>FIGURA 16.</b> PARTES DE UNA CELDA MECÁNICA (GUTIÉRREZ, 2019). .....	17
<b>FIGURA 17.</b> ZONAS DE UNA MÁQUINA DE FLOTACIÓN, VISIÓN FLUIDODINÁMICA (ADAPTACIÓN DE GUTIÉRREZ, 2019). ....	17
<b>FIGURA 18.</b> ZONAS DE UNA MÁQUINA DE FLOTACIÓN, VISIÓN METALÚRGICA. ....	18
<b>FIGURA 19.</b> RESUMEN DEL DESARROLLO EXPERIMENTAL. ....	20
<b>FIGURA 20.</b> SECADO DE MINERAL EN EL HORNO A 60°C. ....	22
<b>FIGURA 21.</b> EQUIPO GILSON TESTING SCREENS. ....	23
<b>FIGURA 22.</b> A) BRIQUETAS Y B) MICROSCOPIO. ....	23
<b>FIGURA 23.</b> A) PASTILLA Y B) EQUIPO BRUKER AXS (DRX). ....	24
<b>FIGURA 24.</b> PROTOCOLO DE PREPARACIÓN DE PASTILLAS PARA ANÁLISIS DE DRX. ....	24
<b>FIGURA 25.</b> A) EQUIPO PARA ANÁLISIS DE PORCENTAJE DE S/C Y B) PREPARACIÓN DE CRISOLES CON CONTENIDO DE FE Y W. ....	25
<b>FIGURA 26.</b> A) PULVERIZADORA CON 4 RECIPIENTES Y B) SPLITTER PARA LA PREPARACIÓN DE MUESTRAS DE ANÁLISIS S/C. ....	25
<b>FIGURA 27.</b> TAMIZADOR VIBRATORIO RO – TAP. ....	26
<b>FIGURA 28.</b> SIMULACIÓN CIRCUITO 1 DE RECUPERACIÓN DE GRAFITO POR FLOTACIÓN FLASH (ADAPTACIÓN DE PROPUESTA DE SGS). .....	27
<b>FIGURA 29.</b> A) CHANCADOR DE CONO METSO Y B) CARRUSEL. ....	27
<b>FIGURA 30.</b> MATERIAL OBTENIDO DEL PRIMER CHANCADO 648.96 μM. ....	28
<b>FIGURA 31.</b> CELDA DENVER. ....	30
<b>FIGURA 32.</b> ETAPAS DE FLOTACIÓN CON SUS RESPECTIVOS TIEMPOS Y PRODUCTOS PARA LOS ENSAYOS 5 Y 6. ....	30
<b>FIGURA 33.</b> ETAPAS DE FLOTACIÓN CON SUS RESPECTIVOS TIEMPOS Y PRODUCTOS LOS ENSAYOS 7 Y 8. ....	31
<b>FIGURA 34.</b> A) INFERIOR A 300 μM, B) ENTRE 300 - 1400 μM Y C) SUPERIOR A 1400 μM. ....	31
<b>FIGURA 35.</b> ETAPAS DE FLOTACIÓN CON SUS RESPECTIVOS TIEMPOS Y PRODUCTOS PARA EL ENSAYO 9. ....	32
<b>FIGURA 36.</b> MICROSCOPIA ÓPTICA DEL MATERIAL CHANCADO Y PULVERIZADO AL INICIO DE LA INVESTIGACIÓN. GR: GRAFITO Y PYH: PIRROTITA. TAMAÑOS DE MINERAL DE GR 1) 283 MM, 2) 450 MM, 3) 1433 MM, 4) 283 MM, 5) 333 Y 6) 333. MAGNIFICACIÓN X50. ....	33
<b>FIGURA 37.</b> RESULTADOS DE PRINCIPALES ELEMENTOS PRESENTES INICIALMENTE POR ICP. ....	35
<b>FIGURA 38.</b> ESPECTRO DE DRX PARA LA MUESTRA A. ....	51
<b>FIGURA 39.</b> ESPECTRO DE DRX PARA LA MUESTRA B. ....	51
<b>FIGURA 40.</b> ESPECTRO DE DRX PARA LA MUESTRA C. ....	52
<b>FIGURA 41.</b> ESPECTRO DE DRX PARA LA MUESTRA D. ....	52

<b>FIGURA 42.</b> A) CONCENTRADOS Y B) COLAS, PARA EL ENSAYO 5.....	55
<b>FIGURA 43.</b> A) CONCENTRADOS Y B) COLAS, PARA EL ENSAYO 6.....	55
<b>FIGURA 44.</b> A) CONCENTRADOS Y B) COLAS, PARA EL ENSAYO 7.....	55
<b>FIGURA 45.</b> A) CONCENTRADO 1, B) CONCENTRADO 2 Y C) COLAS, PARA EL ENSAYO 8.....	56
<b>FIGURA 46.</b> A) CONCENTRADOS Y B) COLAS, PARA EL ENSAYO 9.....	56
<b>FIGURA 47.</b> A) CONCENTRADO 1, B) CONCENTRADO 2 Y C) COLAS, PARA EL ENSAYO 10.....	56
<b>FIGURA 48.</b> A) CONCENTRADO 1, B) CONCENTRADO 2 Y C) COLAS, PARA EL ENSAYO 11.....	57
<b>FIGURA 49.</b> A) CONCENTRADOS Y B) COLAS, PARA EL ENSAYO E 5.1.....	57
<b>FIGURA 50.</b> A) CONCENTRADOS Y B) COLAS, PARA EL ENSAYO E 5.2.....	57
<b>FIGURA 51.</b> A) CONCENTRADOS Y B) COLAS, PARA EL ENSAYO E 5.3.....	58

## ÍNDICE DE TABLAS

<b>TABLA 1.</b> RESUMEN PROPIEDADES FÍSICAS DEL GRAFITO (ADAPTACIÓN DE ALQUISIRA, S. F.).	4
<b>TABLA 2.</b> EQUIPOS Y MATERIALES UTILIZADOS PARA EL DESARROLLO EXPERIMENTAL.	21
<b>TABLA 3.</b> RESUMEN ETAPAS DE CONMINUCION Y HOMOGENEIZACIÓN PARA LA PREPARACIÓN DE LA MUESTRA.	28
<b>TABLA 4.</b> ENSAYOS PARA DETERMINAR LOS PARÁMETROS ÓPTIMOS CON SUS RESPECTIVAS CONDICIONES.	29
<b>TABLA 5.</b> COMPOSICIÓN PORCENTUAL DE LOS ELEMENTOS PRESENTES INICIALMENTE.	34
<b>TABLA 6.</b> RESULTADOS % DE C Y S PARA LAS MUESTRAS A, B, C Y D.	34
<b>TABLA 7.</b> PORCENTAJES PASANTES PARA LAS GRANULOMETRÍAS DE COMPROBACIÓN.	36
<b>TABLA 8.</b> DENSIDAD APARENTE DE LA MUESTRA MINERAL.	36
<b>TABLA 9.</b> BALANCE DE MASA DE LOS TODOS LOS ENSAYOS.	38
<b>TABLA 10.</b> PORCENTAJES DE CARBÓN Y AZUFRE EN LOS CONCENTRADOS.	38
<b>TABLA 11.</b> PORCENTAJES DE CARBÓN Y AZUFRE EN LAS COLAS.	39
<b>TABLA 12.</b> PORCENTAJES DE CARBÓN Y AZUFRE EN LOS CONCENTRADOS DE LOS ENSAYOS DE REPRODUCCIÓN.	40
<b>TABLA 13.</b> PORCENTAJES DE CARBÓN Y AZUFRE EN LAS COLAS DE LOS ENSAYOS DE REPRODUCCIÓN.	40
<b>TABLA 14.</b> RECUPERACIÓN Y LEY PARA LOS ENSAYOS E5 A E12.	41
<b>TABLA 15.</b> RECUPERACIÓN Y LEY PARA LOS ENSAYOS E 5.1, E 5.2 Y E 5.3.	41
<b>TABLA 16.</b> RESULTADOS PARA LA MUESTRA 1.	54
<b>TABLA 17.</b> RESULTADOS PARA LA MUESTRA 2.	54

## NOMENCLATURA Y ABREVIACIONES

<b>CD</b>	Celda Denver
<b>CG</b>	Carbón Grafítico
<b>CH</b>	Celda Hydrofloat
<b>CT</b>	Carbón Total
<b>DRX</b>	Difracción de Rayos X
<b>FRX</b>	Fluorescencia de Rayos X
<b>ICP</b>	Espectroscopía Plasma con Acoplamiento Inductivo
<b>IRME</b>	Instituto de Investigación Minera y Medioambiental
<b>MIBC</b>	Metil Isobutil Carbinol
<b>MEB</b>	Microscopio Electrónico de Barrido
<b>MRNF</b>	Ministerio de Recursos Naturales y Bosques
<b>PAX</b>	Xantato Amílico de Potasio
<b>URSTM</b>	Unidad de Investigación y Servicios en Tecnología Mineral
<b>UQAT</b>	Universidad de Québec de Abitibi-Témiscamingue
<b>S/C</b>	Azufre y Carbono

## PRESENTACIÓN DEL ESTABLECIMIENTO DE ACOGIDA

El desarrollo de esta investigación tuvo lugar en la Universidad de Québec de Abitibi-Témiscamingue (UQAT), Canadá (Figura 1). Esta institución académica cuenta con tres sedes en la región de Abitibi Témiscamingue: Val d'Or, Amos y Rouyn-Noranda. El presente trabajo se desarrolló en este último campus, ubicado en la ciudad de Rouyn-Noranda, reconocida como la capital del cobre en dicha región, aproximadamente a 600 km al noreste de la ciudad de Montreal. Además, se realizó en conjunto con el Instituto de Institut de Recherche en Mines et en Environnement (IRME).



**Figura 1.** Universidad de Québec de Abitibi-Témiscamingue (UQAT, 2023).

La UQAT ofrece una amplia variedad de programas académicos, abarcando desde estudios universitarios hasta niveles de maestría y doctorado. Entre las diversas disciplinas, se incluyen áreas como agricultura, creación de videojuegos, salud, trabajo social, ingeniería, tratamiento de aguas, medio ambiente, entre otras. Cabe destacar que la UQAT es la única universidad de Quebec que ha priorizado el sector minero.

El IRME es un instituto de investigación cuyo propósito es desarrollar soluciones para los desafíos ambientales que surgen durante la explotación minera, desde la fase de exploración hasta la post restauración de este. Algunas áreas de investigación incluyen el tratamiento y gestión de aguas de mina, la recuperación de sitios mineros y el transporte de contaminantes en el medio ambiente. Este instituto es financiado por socios industriales como Agnico Eagle y por organismos de financiación provinciales y federales de Quebec y Canadá. Cada año se llevan a cabo investigaciones relacionadas con el entorno minero con un valor de más de 6 millones de dólares (*Institut de recherche en mines et en environnement, s. f.*).

Las investigaciones se realizan a través del equipo científico de Unité de Recherche et de Service en Technologie Minérale (URSTM), que forma parte del IRME. Esta unidad cuenta con laboratorios equipados con tecnología de alta gama. En el laboratorio de Difracción de Rayos X (DRX), se utiliza el equipo Bruker AXS D8 Advance para análisis especializados. Además, se dispone de un laboratorio multifuncional de planta abierta y pruebas medioambientales. En estos espacios, se realizan principalmente pruebas cinéticas con columnas y ensayos de flotación utilizando, por ejemplo, células de flotación Denver y columnas de flotación flash. Gracias a la destacada potencia de estos equipos, la URSTM realiza proyectos para diversas industrias de la región.

## **CAPÍTULO 1. Introducción**

### **1.1 Marco General**

La creciente necesidad de adoptar fuentes de energía más sostenibles ha impulsado a las industrias a migrar hacia una transición energética. Para lograrlo, se hace imperativo recurrir a los elementos catalogados como “elementos críticos”, entre los cuales se encuentra el cobalto, el grafito, el níquel, el litio, y otros recursos fundamentales. El problema de estos es que son considerados minerales o elementos escasos que son económicamente importantes para algunos sectores claves de la economía y no pueden ser fácilmente sustituidos por otro elemento disponible.

En marzo del 2021 el gobierno de Canadá señaló 31 minerales críticos que designó como pilares para el sostenimiento de la economía y la transición energética (Canadá, 2023). Entre estos, el grafito se encuentra debido a que está principalmente relacionado con la fabricación de las baterías para los vehículos eléctricos.

En la actualidad, los principales productores de este valioso elemento en su estado natural son China, seguido de la Mozambique, Madagascar, Brasil y, en sexto lugar Canadá. Según los datos de producción de United States Geological Survey (USGS) el año 2022, China lideró la producción con 1.210.000 toneladas (U.S. Geological Survey, 2024)

Finalmente, estudios recientes realizados por USGS y World Bank muestran que entre los años 2018 y 2050, la demanda de este elemento aumentará en un 494% (Gouvernement du Québec, 2020), por lo que es importante continuar realizando exploraciones de yacimientos donde se pueda hallar este mineral y posteriormente explotarlo (Anexo A).

En este estudio, se llevaron a cabo análisis del tratamiento del mineral perteneciente al yacimiento de Lac Knife, el cual está siendo evaluado para una futura explotación. Para ello, en un primer momento, se abordaron los antecedentes teóricos relacionados con el grafito y su proceso de tratamiento. Posteriormente, se detalla la metodología experimental del circuito 1 extraído del diagrama de flujo (Anexo B) propuesto por SGS. Este circuito consta de un chancado primario, para lograr una liberación efectiva del mineral, seguido de pruebas de flotación en las celdas Hydrofloat y Denver para realizar una comparación en cuanto a la eficiencia de recuperación. Finalmente, se presenta un

análisis y discusión detallado de los resultados, acompañados de recomendaciones para futuras investigaciones.

## **1.2 Objetivos**

### 1.2.1 Objetivo general

Comparar la eficiencia de las celdas Denver y Hydrofloat como flotación flash para la recuperación de grafito de un mineral sulfurado del yacimiento Lac Knife. El principal mineral presente en la ganga es la pirrotita (un sulfuro de hierro).

### 1.2.2 Objetivos específicos

- Ejecutar la fase inicial de flotación del circuito 1 en el laboratorio, empleando las celdas Denver y Hydrofloat, como parte del proceso de extracción de grafito.
- Realizar diferentes pruebas de flotación variando los flujos de aire y agua, parámetros dosis de reactivos y % de sólidos.
- Comparar el rendimiento de la flotación Hydrofloat y la flotación en celda Denver.

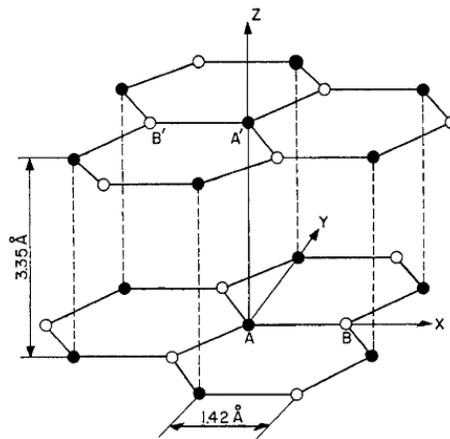
## CAPÍTULO 2. Antecedentes Teóricos

Para una comprensión adecuada de los siguientes capítulos de este informe, es importante obtener un conocimiento previo. En este sentido, a continuación, se abordará el elemento de interés, el grafito, explorando sus ubicaciones potenciales y los métodos de tratamiento empleados para su extracción y concentración.

### 2.1 Estado del Arte

#### 2.1.1 Descripción del grafito

El grafito, conocido desde tiempos muy antiguos, tuvo su verdadera identidad a finales del siglo XVIII (Canada. Mines Branch (1901-1936) & Spence, 1920). Este es un alótropo del carbono cristalino, compuesto principalmente por enlaces covalentes de carbono horizontalmente y enlaces Van der Waals verticalmente, además que contiene sólo orbitales híbridos  $sp^2$  y enlaces  $\pi$  en su estructura (Pierson, 1993). Dependiendo de las condiciones bajo las cuales se forme, puede presentar diferentes tipos de estructuras, siendo la más común la hexagonal. En la Figura 2 se muestra su estructura.



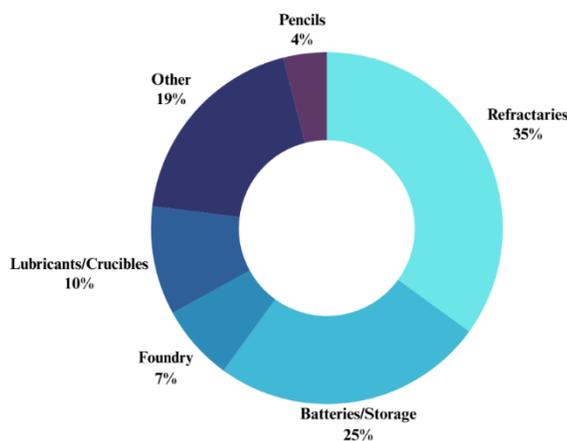
**Figura 2.** Estructura cristalina del grafito. ● : carbono compensado y ○ : carbono descompensado (Chung, 2002).

A diferencia de los metales, el grafito es un mineral no metálico que, a pesar de esta distinción, exhibe excelentes propiedades térmicas y eléctricas, así como una notable estabilidad química. Además, presenta propiedades como resistencia a la corrosión, hidrofobicidad natural, buena lubricidad, un alto punto de fusión ( $3650^{\circ}\text{C}$ ) (Segemar, 2011), entre otras. En la Tabla 1 se mencionan algunas propiedades básicas del grafito.

**Tabla 1.** Resumen propiedades físicas del grafito (Adaptación de Alquisira, s. f.).

Propiedades	Características
<b>Estructura</b>	Hexagonal laminar
<b>Color</b>	Gris oscuro
<b>Dureza</b>	Blando
<b>Conductividad eléctrica y térmica</b>	Conductor
<b>Densidad [g/m<sup>3</sup>]</b>	2.25
<b>Lubricidad</b>	Sí

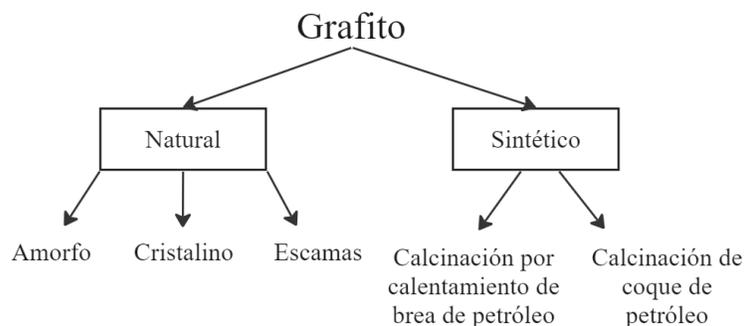
Esta versatilidad, tanto en sus propiedades físicas como químicas, permite al grafito ser utilizado en una amplia gama de aplicaciones industriales, que incluyen la fabricación de minas de lápices, ladrillos o crisoles refractarios, baterías de almacenamiento, lubricantes, entre otras (Chelgani, 2015). Estas diversas aplicaciones se ilustran en la Figura 3.

**Figura 3.** Aplicaciones comunes del grafito. Adaptación de (Moore, 2013) y (DNI Metals Inc, 2014).

### 2.1.2 Tipos de grafitos

Se puede clasificar el grafito en dos grandes categorías: natural y sintético. En la categoría natural, se distinguen tres variedades: microcristalino o “amorfo”, cristalino o en forma de escamas. Por otro lado, el grafito sintético se puede subdividir en dos subcategorías según el método utilizado para su elaboración. Estas dos subcategorías son el electrografito, producido mediante la calcinación de coque de petróleo, y el grafito obtenido por la calcinación por calentamiento de brea de petróleo calcinado a 2800°C. El grafito sintético también presenta una alta pureza, pero, a diferencia del grafito natural,

tiene una menor densidad, mayor resistencia eléctrica y porosidad, lo que le confiere propiedades diferentes y, por ende, usos distintos (Segemar, 2011). El resumen de esta clasificación se observa en la Figura 4.



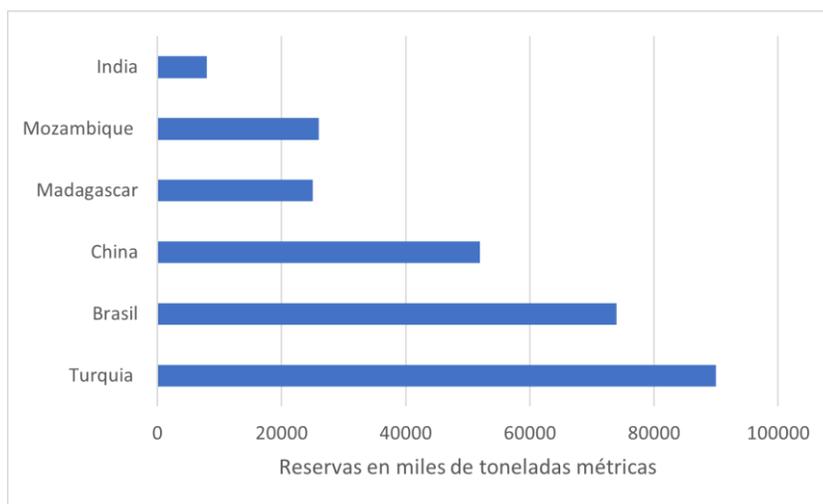
**Figura 4.** Tipos de grafito.

En el yacimiento de Lac Knife, el grafito se encuentra en forma de escamas, también conocido como “flakes”, debido al área geológica en la que está ubicado, la cual se detallará más en la sección 2.2.1.

### 2.1.3 Yacimientos de grafito en el mundo

#### Reservas

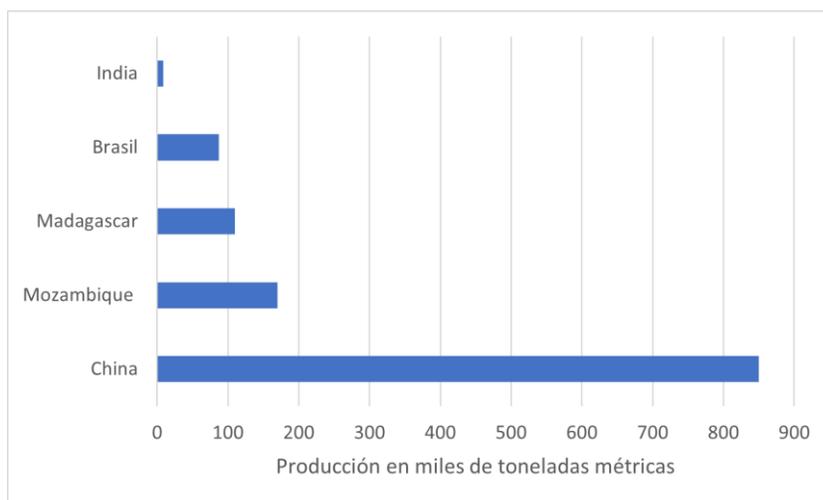
La principal fuente de grafito es el grafito natural, el cual se encuentra ampliamente distribuido en todo el mundo. Según Statista, en 2022, Turquía registró las mayores reservas de grafito natural a nivel mundial, alcanzando aproximadamente 90,000 toneladas métricas (Grafito, 2022b), seguida por Brasil y China (Figura 5).



**Figura 5.** Ranking de los países con mayores reservas de grafito en 2022 (Grafito, 2022b).

### Producción anual mundial

A pesar de ser Turquía el país con las mayores reservas de este mineral a nivel mundial no figura entre los principales países productores del elemento (Figura 6). En primer lugar, se encuentra China, liderando la extracción de este mineral, con una producción de 1.210.000 toneladas métricas (U.S. Geological Survey, 2024). China ha mantenido esta posición desde hace un par de años; en 2022, ya representaba un 59.1% (Merino, 2021).



**Figura 6.** Ranking de principales países productores de grafito a nivel mundial en 2022 (Grafito, 2022a).

En el año actual, 2023, se estima que el mercado del grafito alcanza los 3.45 mil millones de dólares (USD), y se proyecta un aumento a 4.41 mil millones de dólares para el año 2028 (Mordor Intelligence, s. f.). Esta perspectiva hace que resulte intrigante continuar explotando este mercado.

### Estudio de caso: Québec (Canadá)

Quebec destaca como una de las principales provincias mineras en Canadá, gracias a su abundancia y diversidad de recursos minerales. La región cuenta con todos los minerales fundamentales para la producción de baterías, incluyendo litio, níquel, cobalto y grafito (Gouvernement du Québec MNR, 2023).

Varios proyectos de grafito se encuentran en desarrollo en Quebec, entre los que destacan Lac Knife (Focus Graphite), Lac Rainy Nord (Metals Australia), La Loutre Graphite (Métaux Lomiko), Metawiniw (Nouveau Monde Graphite), entre otros (MRNF, 2023b).

Actualmente, solo una mina se encuentra en operación activa en la región de Québec, e incluso en toda América del Norte; esta corresponde a Lac-des-Îles (Northern Graphite Corporation) (MRNF, 2023a). Revisar Anexo C que ilustra la localización de los proyectos mencionados.

### Lac Knife (Focus Graphite)

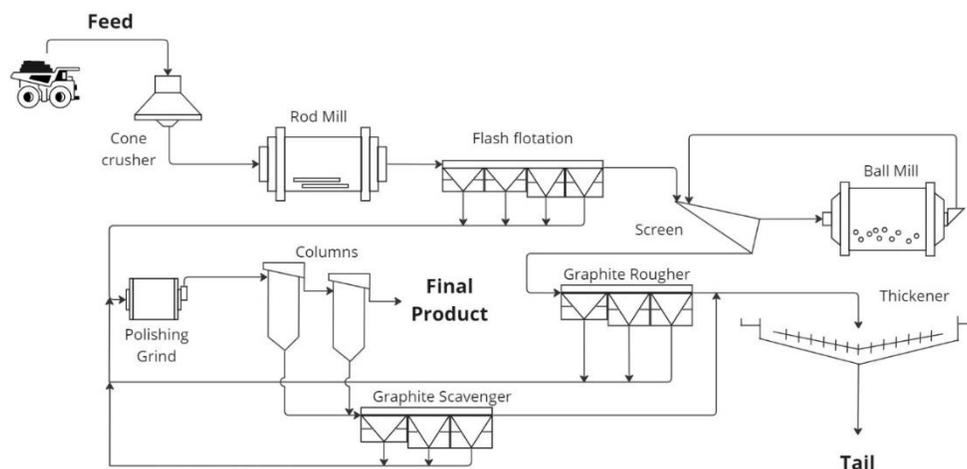
El proyecto Lac Knife se centra en la extracción de grafito en escamas mediante un método convencional a cielo abierto. Se ha planificado un tajo de explotación con dimensiones de 1.130 metros de longitud y 400 metros de ancho en la superficie, alcanzando una profundidad de 150 metros, lo que resulta en una superficie total del tajo de aproximadamente 319.000 m<sup>2</sup> («Lac Knife», s. f.).

En términos de durabilidad, se estima que la mina tendrá una vida útil de 27 años, generando al menos 109 puestos de trabajo durante este período. La operación contará con una planta concentradora in situ, operando de manera continua las 24 horas del día, los 365 días del año.

La planta de procesamiento está diseñada para procesar una capacidad anual de 365.320 toneladas, con una producción diaria de 1.000 toneladas, y una ley media del 14,97% de carbono grafitico (GC). A partir de esta tasa de alimentación, se proyecta una producción anual de 50.000 toneladas de concentrado de grafito en escamas. De esta cantidad, se espera recuperar 47.781 toneladas, con una ley media del 98,2% de carbono total (TC). En términos de producción de la vida útil de la mina se anticipa una extracción total de 9.31 millones de toneladas de mineral.

#### 2.1.4 Métodos de tratamientos

En las fases iniciales de la extracción del grafito natural, suele presentar bajos niveles de carbono. Para aumentar su concentración, es necesario someterlo a diversos métodos de tratamiento que eliminen las impurezas asociadas y lo enriquezcan. Estos métodos incluyen procesos mineros convencionales, como chancado, tamizaje, molienda, concentración y purificación (refinación). Ahora bien, los diagramas pueden variar según el tipo de grafito con el que se esté trabajando (Damm, S. Zhou, 2020). A continuación, la Figura 7 ilustra un flowsheet simplificado del proceso para la extracción de grafito.



**Figura 7.** Diagrama de flujo simplificado del procesamiento del grafito (Adaptación de Chelgani, 2015).

En todo proceso minero, la etapa inicial, el chancado, se destaca como fundamental, ya que es aquí donde se consigue liberar gran parte del mineral necesario para la concentración, factor crucial para garantizar la calidad del producto final. Para el chancado, se pueden utilizar diversos métodos, como chancadores de mandíbula, de cono o de martillos. En la etapa siguiente, la molienda, se emplean molinos de bolas, molinos de martillos, molinos de chorro de aire y molinos de barras, siendo la elección dependiente del tipo de mineral de grafito (Damm, S. Zhou, 2020).

Estas fases de conminución, especialmente la molienda, son etapas cruciales para la extracción de grafito, dado que es necesario ser capaz de liberar los granos sin romperlos, considerando que es un mineral blando. El tamaño de las escamas va a jugar un rol importante en la recuperación. Además, la etapa de conminución suele ir acompañada de harneros para asegurar la obtención de la granulometría deseada.

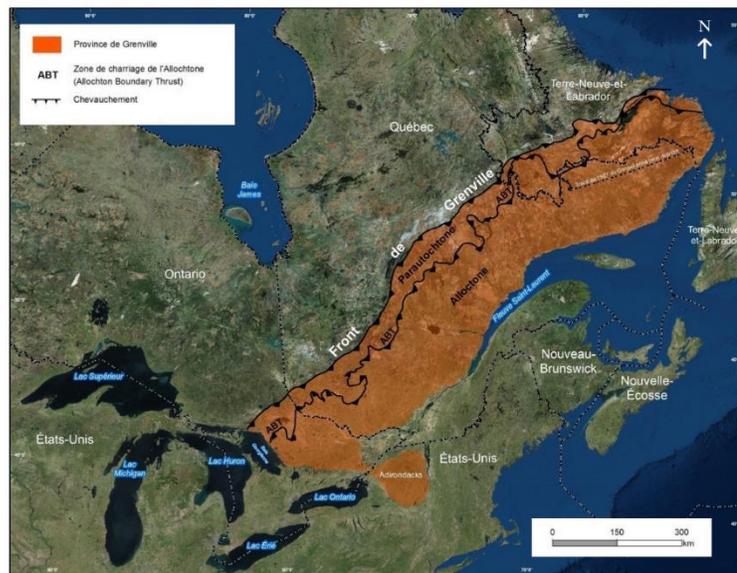
Finalmente, las últimas fases comprenden la recuperación y purificación del material. La concentración de este mineral se logra a través del proceso de flotación, seguido por varias etapas de limpieza y culminando con la etapa de purificación, que puede involucrar procesos como lixiviación, tostado, separación magnética, flotación inversa, separación por gravedad, entre otros (Jara et al., 2019).

En el contexto de esta investigación, se restringirá el análisis al proceso de extracción por flotación, excluyendo la fase de purificación de este mineral.

## 2.2 Fundamentos teóricos

### 2.2.1 Localización y aspecto geológico del yacimiento de grafito

Este depósito se compone principalmente de grafito en forma de escamas cristalinas y está ubicado en el noreste de Quebec, específicamente en la provincia geológica de Grenville. Esta provincia se divide en dos secciones distintas: Parautochtone y Allochtone, como se ilustra en la Figura 8. En este contexto particular, se sitúa en la primera subdivisión geológica, caracterizada por una litología de rocas sedimentarias, y la mineralización de grafito se encuentra en gneis de feldespato cuarzo mimetizado. Adicionalmente, esta área geográfica pertenece a la formación de Nault, que forma parte del Grupo de Gagnon, datada de la época Paleoproterozoico inferior (Clarke, 1977).



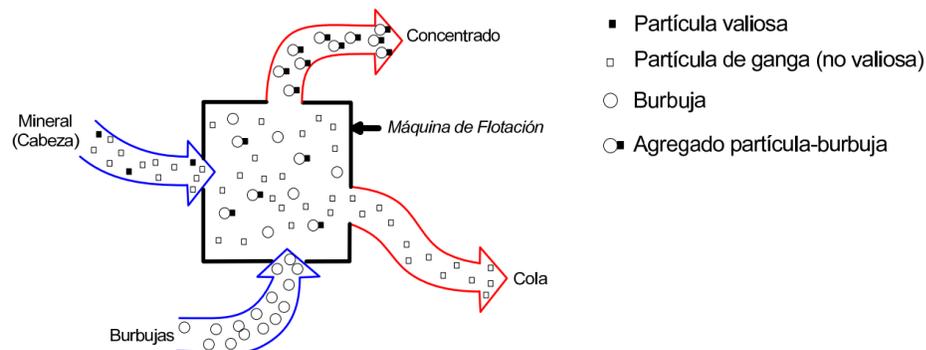
**Figura 8.** Provincia de Grenville en Canadá (Province de Grenville – Géologie Québec, 2015).

### 2.2.2 Principios de la flotación

La flotación es un proceso físico – químico el cual es producido por la diferencia de las propiedades superficiales de las partículas. Este es un proceso que depende del tamaño de las partículas. Fue diseñado para la separación y concentración de minerales valiosos, los cuales serán recolectados como “concentrado”. La recuperación de estos minerales se logra mediante la adhesión selectiva de burbujas de gas al material, formando un agregado partícula-burbuja que se recupera a través de la espuma

ascendente en la superficie del tanque de flotación. Esto es posible gracias a las propiedades de superficie, principalmente a la hidrofobicidad.

Por el contrario, las partículas con propiedades hidrofílicas se consideran como ganga, es decir, partículas no valiosas desde el punto de vista de la extracción, y se recolectan en otra corriente denominada “colas”, que presentan una baja concentración del elemento de interés. La Figura 9 ilustra de manera simplificada el proceso descrito.



**Figura 9.** Resumen del proceso de flotación (Gutiérrez, 2019).

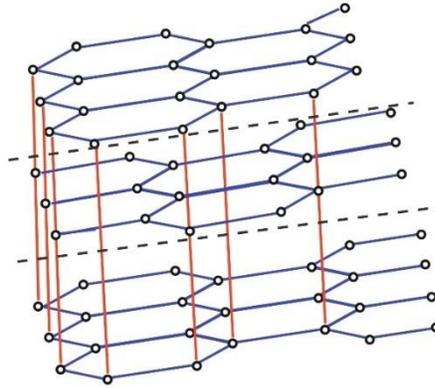
### Hidrofobicidad

Al abordar el tema de la flotación, resulta crucial estudiar las propiedades superficiales de las partículas. Entre ellas, destacada la hidrofobicidad, una propiedad física que limita la interacción con el agua. Contrariamente, estas partículas muestran una afinidad por las burbujas de gas, dado que las moléculas hidrófobas tienden a ser no polares, a diferencia de las moléculas de agua, que son polares. Esta disparidad conduce a que las moléculas no polares no se disuelvan eficientemente en el agua, y prefieran en su lugar entornos con disolventes no polares.

Existen minerales con hidrofobicidad natural y otros carecen de ella, por lo que es necesario agregar reactivos químicos, en este caso, colectores, que inducen la hidrofobicidad en las especies que no la poseen.

En el caso específico del grafito, este presenta una hidrofobicidad natural, la cual se atribuye al tipo de enlaces descompensados presentes en su estructura. Es relevante señalar que para comprender su comportamiento es esencial analizar la partícula de manera fragmentada y no como un todo, ya que las superficies de las partículas minerales a menudo exhiben comportamientos diferentes.

Al realizar un estudio horizontal en este mineral anisotrópico se observan capas unidas por enlaces covalentes dentro de los hexágonos, mientras que en un análisis vertical se identifican bordes que conectan las láminas de grafito mediante enlaces débiles de van der Waals (Figura 10). Se clasifican los enlaces polares como hidrofílicos y los enlaces de van der Waals como hidrofóbicos.



**Figura 10.** Visualización de capas y bordes en la estructura del grafito.  
 ○: carbón, líneas rojas: bordes y líneas azules: capas (Adaptación de J.S.Laskowski And Z. Yu, 1994).

### Adsorción

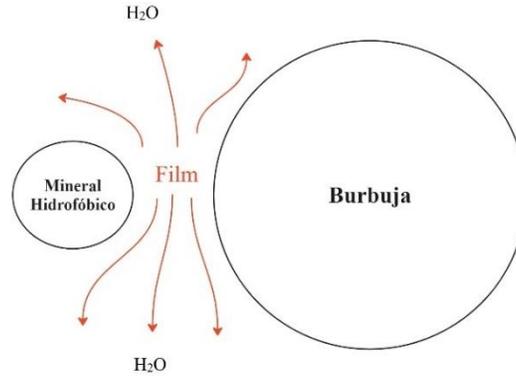
La adsorción desempeña un papel fundamental en la flotación, siendo un fenómeno de gran relevancia en la química de superficie de las partículas minerales. Este proceso implica la adhesión de adsorbatos, que pueden ser átomos, iones o moléculas, a la superficie de un mineral específico, actuando como el adsorbente. En este contexto, las sustancias se atraen y se unen a la superficie del mineral, dando lugar a la formación de una capa delgada que modifica las propiedades químicas de la partícula.

La comprensión de este fenómeno resulta esencial para optimizar los procesos de flotación, mejorando así las propiedades hidrofóbicas y logrando una separación selectiva eficiente entre los minerales valiosos y la ganga.

### Adhesión partícula – burbuja

El concepto de agregado partícula-burbuja es otro fenómeno crucial en la flotación, ya que determina la eficacia del proceso de separación. Este es una función de la hidrofobicidad por lo que la flotación de los agregados es posible por la diferencia de densidad existente entre los agregados partícula burbuja y la densidad de la pulpa mineral.

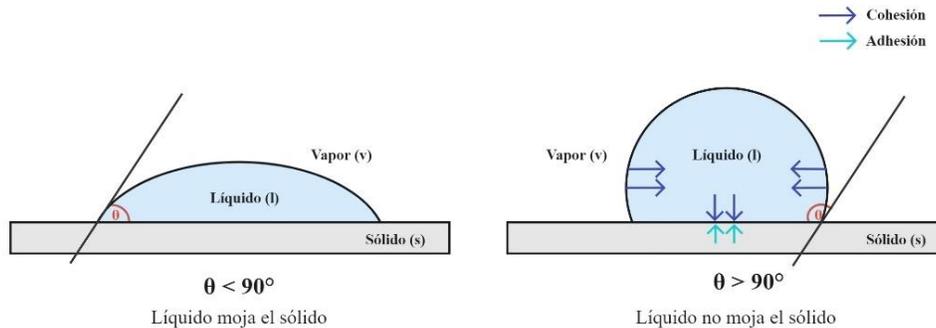
La formación de los agregados partícula-burbuja ocurre cuando se rompe el film de agua presente en la partícula y la burbuja, permitiendo su adhesión, como se ilustra en la Figura 11.



**Figura 11.** Adhesión partícula burbuja una vez que el film se rompe (Adaptación de Gutiérrez, 2019).

Las partículas hidrofóbicas se adhieren selectivamente a las burbujas debido a la diferencia en las propiedades de superficie entre las partículas de valor y la ganga, fenómeno conocido como agregado partícula-burbuja.

El ángulo de contacto, que cuantifica la hidrofobicidad de una partícula, tiene la capacidad de influir en la adhesión de las partículas a las burbujas. Este ángulo se mide a través de la fase líquida y corresponde al ángulo formado entre la tangente de una gota de agua (líquido) en el punto de contacto y la superficie líquido-sólido. Para que el líquido sea capaz de mojar al sólido, el ángulo de contacto debe ser menor a  $90^\circ$ , mientras que, en el caso contrario, debe ser mayor a  $90^\circ$  (Figura 12).



**Figura 12.** Ángulo de contacto (Adaptación de Gutiérrez, 2019).

Un bajo ángulo de contacto indica una buena mojabilidad, facilitando la adherencia de la burbuja a la partícula debido a una mayor hidrofobicidad, mejorando así la eficiencia del proceso de flotación. En contraste, un ángulo de contacto elevado sugiere una baja mojabilidad, lo que podría dificultar la adhesión de las burbujas a las partículas, reduciendo la eficacia de la separación de minerales. La capacidad del líquido para mojar el sólido depende de la relación entre las fuerzas de cohesión que actúan en el interior del líquido y las fuerzas de adhesión intermoleculares que actúan entre el líquido

y el sólido. En otras palabras, el mojado ocurre cuando las fuerzas de adhesión son mayores que las de cohesión, indicando una fuerte interacción del líquido.

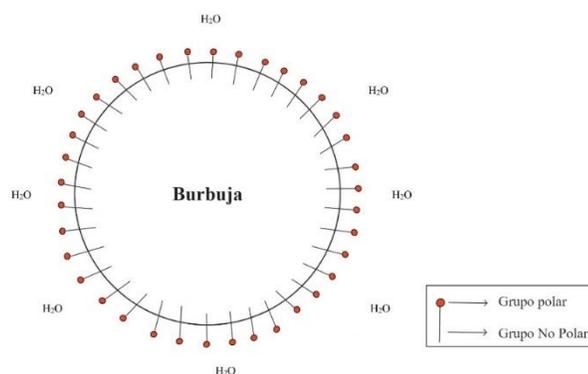
Para controlar y ajustar el ángulo de contacto, se deben seleccionar los reactivos adecuados. Es por ello por lo que, en este proceso, se añaden reactivos capaces de modificar las propiedades superficiales de las partículas y las condiciones de flotación. Los tres reactivos adicionados son: colectores, espumantes y modificadores, los cuales serán objeto de estudio en los siguientes ítems.

### 2.2.3 Reactivos

#### Espumante

Los espumantes, también denominados como surfactantes, son compuestos tenso activos diseñados para operar en la interfaz líquido-gas. Estos actúan como agentes “selectivos”, siendo elegidos en función de sus propiedades específicas. Su incorporación en el proceso de flotación se realiza con el propósito de desempeñar tres funciones clave: reducir el tamaño de las burbujas, estabilizar la espuma y disminuir la tensión superficial.

La característica distintiva de estos agentes radica en su distribución asimétrica de grupos polares, lo que facilita la interacción con el agua para equilibrar los enlaces libres en la superficie. Esta compensación permite la orientación preferencial de la interfaz agua-aire, dirigiendo los grupos hidrofílicos o polares hacia la fase acuosa, mientras que la cadena hidrofóbica o la porción no polar se orienta hacia la fase gaseosa (burbuja). Este comportamiento es esencial para explicar la formación y estabilidad de la espuma en el proceso de flotación, y se ilustra visualmente en la Figura 13.



**Figura 13.** Orientación del espumante en la superficie de la burbuja (Adaptación de Gutiérrez, 2019).

Finalmente, estos compuestos son responsables de estabilizar y mejorar la calidad de la espuma generada durante el proceso, gracias a la tensión superficial, que es la fuerza que tiende a minimizar

la superficie de un líquido. En el caso del agua, esta afecta directamente la formación de burbujas y la estabilidad de la espuma. Una reducida tensión superficial implica que las burbujas encuentran menos resistencia para formarse y persistir en la pulpa.

La selección adecuada del espumante es capaz de determinar el éxito de la flotación por espuma. Comúnmente, el espumante más empleado en la industria es el MIBC, ya que está ampliamente disponible y es económicamente accesible. En este proyecto, se optará por utilizar este espumante.

### Colectores

Los colectores son reactivos utilizados ampliamente en la flotación de minerales, dado que interactúan en la interfaz sólido-líquido, otorgando características hidrofóbicas selectivas a las partículas valiosas. Este proceso crea condiciones propicias para que las partículas se adhieran a las burbujas de aire. Los colectores se clasifican en dos grandes categorías según su capacidad de disociación: ionizables (catiónicos y aniónicos) y no ionizables.

En esta investigación, se empleará un colector no ionizable, comúnmente utilizado en la flotación de minerales que ya poseen un grado de hidrofobicidad, como el azufre, grafito, molibdenita y carbón. En esta categoría se incluyen colectores no ionizables como keroseno, hidrocarburos y aceites hidrocarbonados sin grupos polares (Pochteca Chile, 2022).

### Modificadores

Se pueden identificar cuatro categorías de modificadores en el proceso de flotación: los reguladores de pH, dispersantes, depresantes y activadores.

El principal regulador de pH es la cal, obtenida mediante la calcinación de CaO. Este componente eleva el pH de la solución y, en presencia de pirita, tiene la capacidad de depresarlo a un pH superior a 11. En cuanto a los dispersantes, estos evitan la unión de partículas. Se distinguen dispersantes orgánicos, generalmente biodegradables y de bajo impacto ambiental, y dispersantes inorgánicos, solubles en agua y que, al hidrolizarse, contribuyen al aumento del pH.

En el caso de los depresantes, su función es dispersar los elementos, eliminando impurezas y limpiando la superficie de los minerales para mejorar su flotabilidad. Estos se dividen en dos categorías: los orgánicos, que inducen hidrofiliidad a las partículas hidrofóbicas, y los inorgánicos, capaces de prevenir la interacción de los colectores con los minerales.

Finalmente, los activadores, como su nombre indica, potencian la flotabilidad de los minerales con baja flotación. Dependiendo del tipo de mineral que se desee activar, se utilizan surfactantes catiónicos, cationes o aniones. Para este estudio, no se utilizará ningún tipo de modificador.

#### 2.2.4 Flotación celda Hydrofloat

##### Descripción general del equipo

Se empleó la celda de flotación Eriez Hydrofloat, representada en la Figura 14 en donde se pueden observar la estructura de ésta, para llevar a cabo la flotación flash. Esta innovadora celda tiene la capacidad de recuperar minerales de interés a partir de partículas considerablemente más gruesas y menos liberadas en comparación con el rendimiento de una celda de flotación mecánica convencional (Demir et al., 2022).



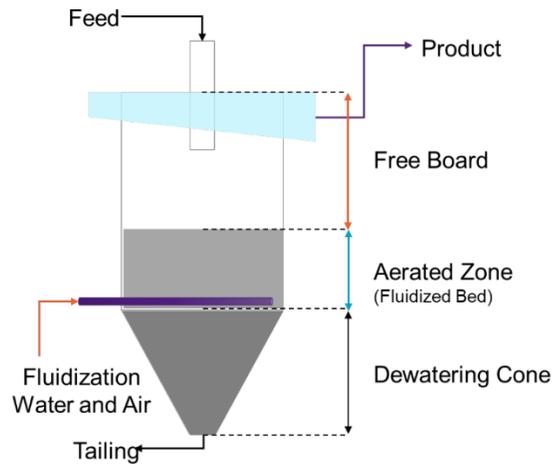
1	Feed	6	Air In
2	Concentrate	7	Underflow Valve
3	Pressure Transducer	8	Pressure gauge
4	Water Distribution Manifold	9	Air Flow Meter
5	Water In	10	Water Flow Meter

**Figura 14.** Estructura y partes de Hydrofloat (Eriez Flotation, 2022).

##### Zonas del equipo

En la celda se identifican tres secciones en donde ocurren diferentes procesos, estas zonas se ilustran en la siguiente Figura 15. La primera zona, designada como “Free Board” en el dibujo, corresponde a la región de espacio libre y a la región por donde comienza la flotación. Además, es la entrada del material a través de una tubería incorporada en el centro del Hydrofloat. Es importante tamizar el material antes de introducirla en la celda para así eliminar los finos y evitar una posible perturbación en la formación del lecho. Simultáneamente, mientras se alimenta el material, hay un flujo ascendente de agua de fluidización, lo que reduce la probabilidad de sedimentación de las partículas. De esta

manera, las partículas encuentran mayor facilidad para adherirse a las burbujas de aire y, por ende, son recuperadas en el concentrado.



**Figura 15.** Dibujo esquemático simplificado con las 3 zonas del Hydrofloat (Demir et al., 2022).

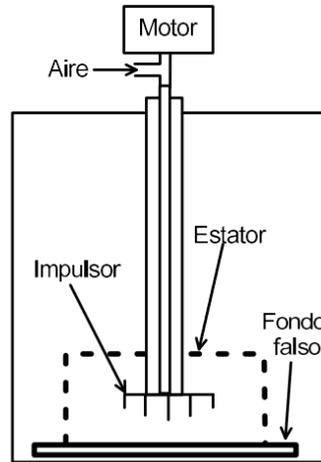
Siguiendo el recorrido descendente en el esquema, se observa la segunda zona, denominada “Zona Aireada” o “Lecho Fluidizado. En este espacio, se maximiza la interacción entre las partículas y las burbujas, facilitando la adhesión de las fases.

La última zona corresponde a una región cónica especialmente diseñada para deshidratar el flujo de relaves, donde no tiene lugar la flotación. En esta sección, se introduce agua de fluidización y aire mediante un colector ubicado sobre la región cónica. La forma de esta zona permite que el agua de fluidización se desplace hacia arriba en la celda, arrastrando consigo los agregados de partículas que se liberan para ser recuperados por el concentrado (Demir et al., 2022).

### 2.2.5 Flotación Celda Denver

#### Descripción general del equipo

La celda Denver es un dispositivo de flotación mecánica que produce burbujas de pequeño tamaño mediante el rompimiento mecánico de la corriente de aire inyectada a través de impulsores o agitadores. La celda está compuesta por un motor, un impulsor, un estator y un fondo falso (Figura 16).

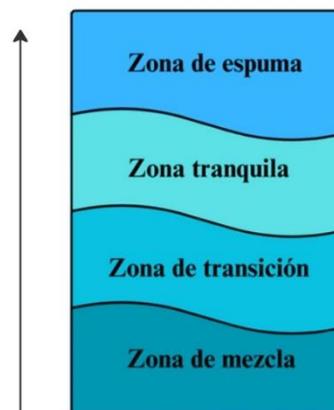


**Figura 16.** Partes de una celda mecánica (Gutiérrez, 2019).

El impulsor está conectado a un tubo concéntrico por donde se introduce el aire en la pulpa, desempeña un papel crucial para la flotación. Otra pieza fundamental es el estator, este genera patrones de flujo distintos en la celda, creando zonas de tranquilidad. Y finalmente, el fondo falso, diseñado específicamente para facilitar y hacer más eficiente la circulación de la pulpa en la celda, previniendo además posibles embancamientos del material. Este conjunto de elementos asegura un funcionamiento coordinado y eficaz de la celda Denver en el proceso de flotación.

#### Zonas de equipo: punto de vista fluido dinámico

Dentro de esta celda, y de cualquier celda de flotación mecánica se pueden identificar cuatro zonas: zona de mezcla, zona de transición, zona tranquila y zona de espuma, ilustradas en la Figura 17.



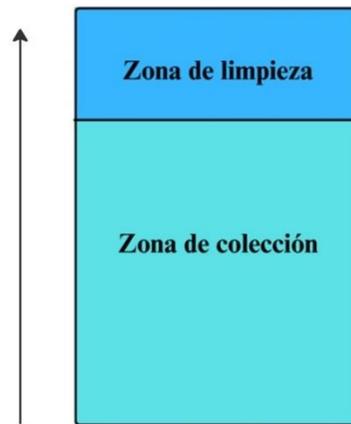
**Figura 17.** Zonas de una máquina de flotación, visión fluidodinámica (Adaptación de Gutiérrez, 2019).

Analizando las distintas zonas de la máquina en el orden mencionado anteriormente, la primera es la zona de mezcla, a la que se somete a una intensa agitación, ya que aquí es donde se forman los

agregados partícula-burbuja como resultado de sus colisiones. Luego, en la zona de transición, comienza a notarse la separación de los agregados partícula-burbuja del material hidrofílico, es decir, la ganga. Justo encima de esta, se encuentra la zona tranquila, donde se evidencia una clara separación de los agregados con el resto de las partículas, preparando el terreno para la formación de la zona de espuma. En esta última, las partículas hidrofóbicas adheridas a las burbujas se desplazan hacia afuera de la celda por rebalse, constituyendo el concentrado.

#### Zonas de equipo: punto de vista metalúrgico

En el caso de hacer un análisis desde un punto de vista metalúrgico, solo se identifican dos zonas: una zona de colección y una zona de limpieza (Figura 18).



**Figura 18.** Zonas de una máquina de flotación, visión metalúrgica.

La zona de colección ocupa aproximadamente  $\frac{3}{4}$  de la celda de flotación. En este sector, se da el contacto entre las partículas minerales y las burbujas de gas, formando los agregados que ascenderán a lo largo de la columna para luego ser recolectados en la zona de limpieza. Este proceso es resultado de tres fenómenos principales: colisión, adhesión y desorción. Diversas variables influyen en esta fase de agregación, tales como los reactivos, el tiempo de residencia, el tamaño de la partícula y el flujo de gas, entre otros.

En contraste, en la zona de limpieza, las variables de operación que afectan las leyes del concentrado final son la altura del colchón de espuma y el agua de lavado.

#### Comparación Hydrofloat con Celda Mecánica

El Hydrofloat presenta ventajas sustanciales en comparación con la celda mecánica convencional. Una de las principales ventajas radica en la utilización de un tamaño de partícula mayor, lo que resulta

en una reducción significativa del tiempo de molienda lo cual se traduce directamente en una reducción de los costos asociados al tratamiento de minerales.

Otro factor, es que el Hydrofloat exhibe un bajo nivel de turbulencia, a diferencia de la celda mecánica convencional que utiliza un impulsor para mantener las partículas en suspensión. En el caso del Hydrofloat, las partículas se mantienen suspendidas en el lecho fluidizado, lo que contribuye a una operación más eficiente dado que en él se favorecen las interacciones entre las partículas y burbujas de aire, mejorando así la probabilidad de adhesión entre ellos (Awatey et al., 2013).

### Recuperación

La recuperación proporciona información sobre la eficacia del proceso de flotación para la separación y concentración de los minerales. Se refiere a la proporción de mineral valioso recuperado en el concentrado final en comparación con la cantidad del mineral valioso presente en la alimentación del proceso. La fórmula general para calcular la recuperación se expone como se indica en la ecuación 1:

$$\%R = \frac{Cc}{Ff} * 100 \quad (1)$$

Este se empleará en cada prueba efectuada con el fin de compararlas y determinar qué parámetros y condiciones son más propicios para obtener resultados óptimos.

### CAPÍTULO 3. Desarrollo Experimental

En un primer momento, se procedió a la recepción y preparación del material recibido. Se llevaron a cabo procesos de secado, tamizado y chancado, los cuales fueron complementados con análisis de granulometría para determinar hasta qué momento chancar. Una vez alcanzada la granulometría deseada, se realizaron pruebas de preparación de flotación en celdas Denver e Hydrofloat para identificar los parámetros óptimos de la celda Hydrofloat y así lograr recuperaciones satisfactorias. Esto, se puede ver resumido en la Figura 19.

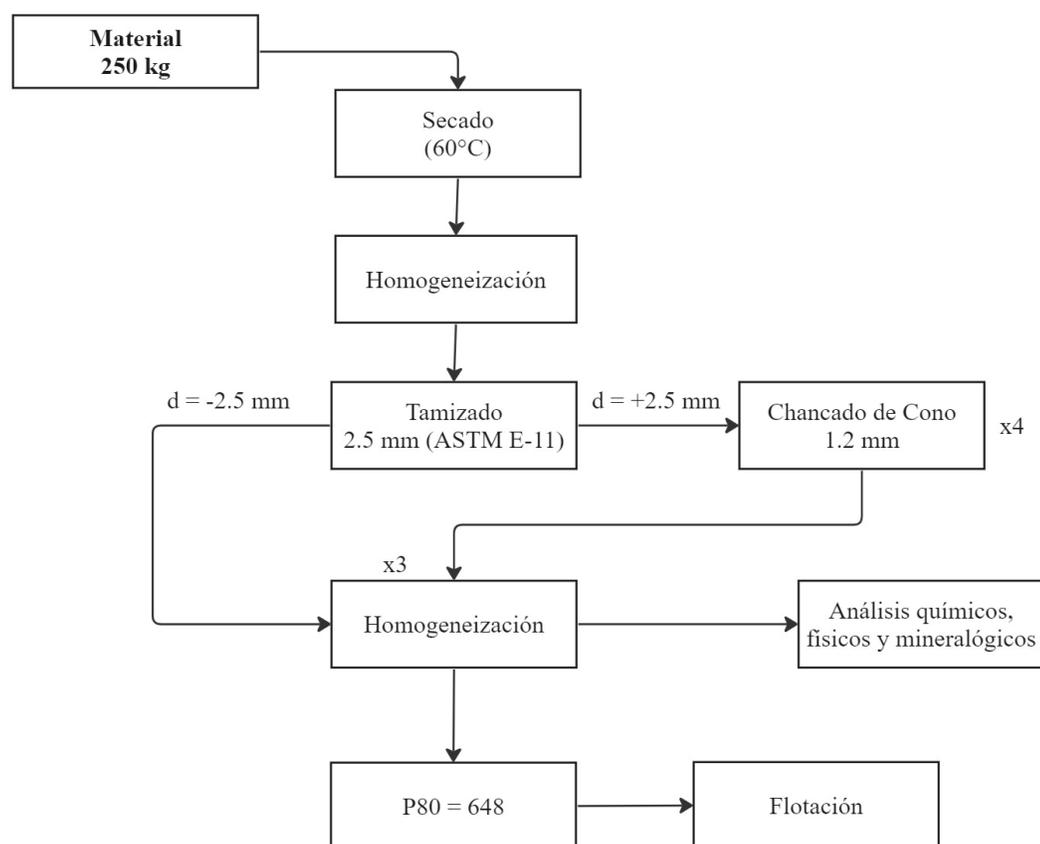


Figura 19. Resumen del desarrollo experimental.

#### 3.1 Equipos y Reactivos

##### Equipos

A lo largo de la investigación, tanto para la preparación de las muestras minerales como para su extracción se utilizaron los equipos enlistados en la Tabla 2.

**Tabla 2.** Equipos y materiales utilizados para el desarrollo experimental.

<b>Equipo</b>	<b>Especificaciones</b>	<b>Etapa Utilizada</b>
Alimentador vibrante	Fritsch – Laborette 24	Circuito 1
Carrusel	GENEQ inc. 040J – 001	Preparación del material
Carbon Sulfur Determinator	ELTRA CS 2000z	Análisis físicos y químicos
Chancador de cono	Metso minerals – Marcy GY-Roll crusher. Cierre máximo de 1.2 mm	Preparación del material y circuito 1
Crisoles	Alúmina	Análisis físicos y químicos
Celda de flotación HydroFloat	Eriez	Circuito 1
Celda de flotación Denver	GENEQ inc	Circuito 1
Equipo de DRX	Bruker axs	Análisis físicos y químicos
Filtro a presión		Pruebas de parámetros para flotación
Horno	Binder a 60°C	Preparación del material y circuito 1
Micronising mill	McCRONE	Análisis mineralógico
Microscopio óptico	ZEISS Axio	Análisis físicos y químicos
Paño de roleo	Lona de polietileno de grado económico Erickson 8 pies x 10 pies	Preparación del material
Pulverizadora	Fritsch – Planetary Ball Mill Pulverisette 5	Preparación para análisis
Ro tap + 8 tamices	GENEQ inc. ROTAP RX – 29	Preparación del material y circuito 1
Separador	Divisor de rifles de 5 mm	Preparación para análisis
Tamizador	Gilson Testing Screens. Model TS-1	Preparación del material y circuito 1

### Reactivos

Reactivos utilizados en el circuito del grafito:

- Colector de grafito: fuel-oil n° 2 (Diésel)
- Espumante: metil 21sobutil carbinol (MIBC)

### **3.2 Preparación de Mineral**

Se recibieron 250 kg de minerales sulfurados procedentes de una mina en Quebec con el propósito de recrear el proceso de flotación para la extracción de grafito. Estos minerales se transportaron en

barriles y se almacenaron en bolsas de plástico que contenían algo de agua, por lo que llegaron en un estado húmedo.

Antes de iniciar el proceso de conminución, fue esencial preparar el mineral, sometiéndolo a un proceso de secado y tamizaje antes de llevar a cabo el proceso de reducción de tamaño.

### 3.2.1 Secado del mineral

Las muestras del mineral fueron divididas y colocadas en bandejas metálicas de acero inoxidable siguiendo los procedimientos de laboratorio establecidos. Para prevenir cualquier tipo de contaminación, las bandejas fueron cubiertas con papel Kraft. Posteriormente, se dejaron en el horno a una temperatura de 60°C durante un período de 3 a 7 días, dependiendo del nivel de humedad inicial presente en las muestras, como se ilustra en la Figura 20.



**Figura 20.** Secado de mineral en el horno a 60°C.

Una vez el mineral completamente seco se transfirió a tarros plásticos y se cerraron bien para evitar que se oxidaran.

### 3.2.2 Tamizaje en seco

Para determinar la distribución de tamaño de las partículas presentes, se utilizó un tamizador vibrante a través del cual se hizo pasar todo el material. En este caso, no fue necesario utilizar todos los tamices; solo se empleó el tamiz de 2,5 mm (ASTM E-11). El equipo utilizado se ilustra en la Figura 21.



**Figura 21.** Equipo Gilson Testing Screens.

De este proceso resultaron dos productos: fracción superior a +2,5 mm, con una masa de 59 kg, y otro con un tamaño inferior a -2,5 mm, siendo un total de 182 kg.

### 3.2.3 Análisis mineralógicos, químicos y físicos.

#### Mineralógico: microscopía óptica, DRX y MEB

En las pruebas mineralógicas se llevaron a cabo 2 análisis: microscopía y DRX. Para realizar los estudios microscópicos, en una primera fase, se procedió a confeccionar las briquetas, visibles en la Figura 22 A). Su elaboración siguió el protocolo detallado en el Anexo D. Una vez preparadas, se examinaron bajo el microscopio (Figura 22 B)), utilizando luz reflejada, dado que se trata de minerales opacos.

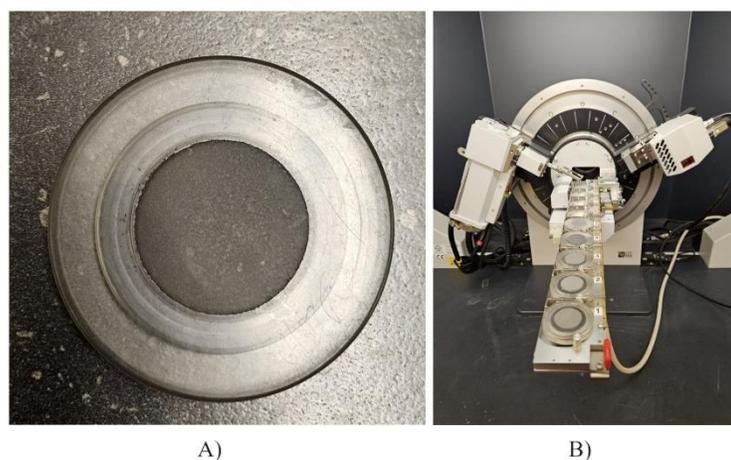


A)

B)

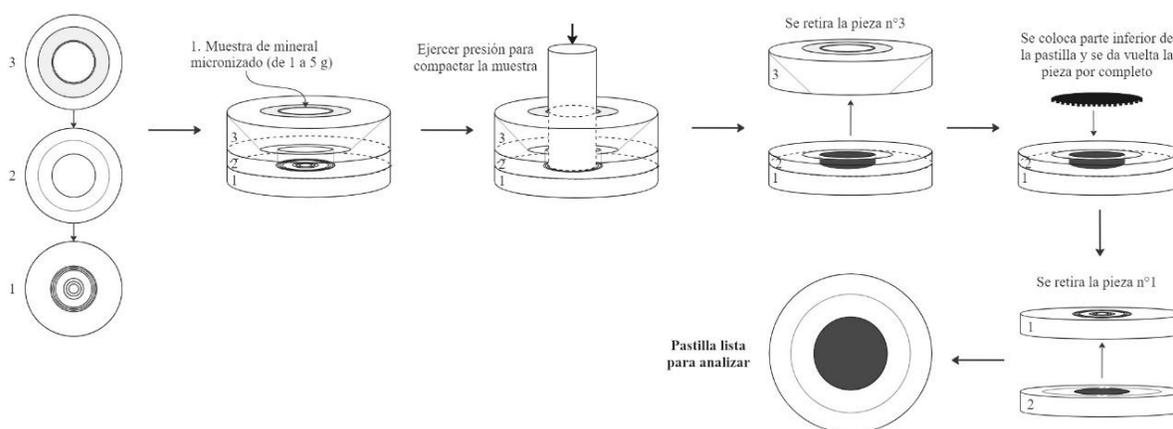
**Figura 22.** A) Briquetas y B) Microscopio.

Para el segundo análisis, mediante DRX, también se requirió preparar el mineral, pero en esta ocasión en forma de briquetas (Figura 23 A)). Inicialmente, se llevó a cabo la pulverización (80  $\mu\text{m}$ ) y micronización del material durante 15 minutos con isopropanol en un molino micronizador. Una vez completado este proceso, se dejó secar el material durante un día, y al estar completamente seco, se siguieron los pasos detallados en la Figura 24 para confeccionar las pastillas. Una vez preparadas, se dispusieron en el centro del equipo, según se muestra en la Figura 23 B). Se dedicó una hora al análisis de cada pastilla.



**Figura 23.** A) Pastilla y B) Equipo Bruker axs (DRX).

Finalmente, cabe destacar que los estudios de microscopía electrónica de barrido (MEB) fueron remitidos a un laboratorio externo para su análisis correspondientes.

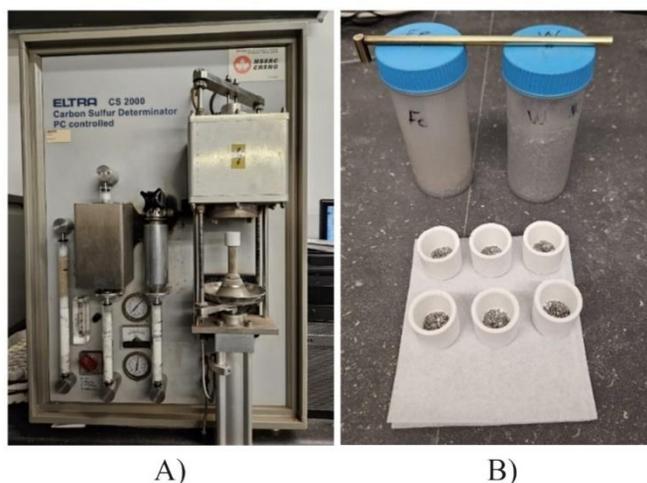


**Figura 24.** Protocolo de preparación de pastillas para análisis de DRX.

Finalmente, cabe destacar que los estudios de microscopía electrónica de barrido (MEB) fueron remitidos a un laboratorio externo para su análisis correspondiente.

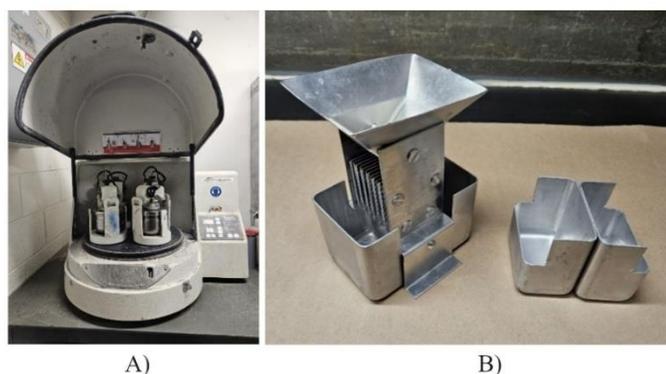
### Químico: Análisis S/C

En lo que respecta a los análisis químicos, se llevaron a cabo pruebas de azufre/carbono mediante el equipo detallado en la Figura 25 A). Estas acciones se realizaron siguiendo el protocolo de muestras descrito en el Anexo E preparando los crisoles con Fe y W (Figura 25 B).



**Figura 25.** A) Equipo para análisis de porcentaje de S/C y B) Preparación de crisoles con contenido de Fe y W.

El objetivo era verificar si los porcentajes de carbono y azufre eran consistentes en todo el material, permitiendo así confirmar una adecuada homogeneización de la etapa anterior. Se extrajeron cuatro muestras representativas del material una vez que se alcanzó una homogeneización completa. Estas muestras se prepararon pulverizándolas (Figura 26 A)), tomando una porción mediante un divisor de rifles, ilustrado en la Figura 26 B).



**Figura 26.** A) Pulverizadora con 4 recipientes y B) Splitter para la preparación de muestras de análisis S/C.

Los análisis de XRF siguieron el mismo procedimiento que los análisis MEB, siendo enviados a un laboratorio externo.

### Físico: Granulometría

Dado que el material inicial llegó mezclado y sin un tratamiento previo, este presentaba partículas de diversos tamaños. Con el fin de determinar las granulometrías presentes, se realizaron pruebas antes y después de cada etapa de conminución y homogeneización. Estas pruebas se llevaron a cabo utilizando un tamizador vibrante Ro-Tap (Figura 27), que emplea 7 tamices de diferentes tamaños (n°08, n°012, n°16, n°20, n°30, n°40 y n°50), además del fondo.



**Figura 27.** Tamizador vibratorio Ro – Tap.

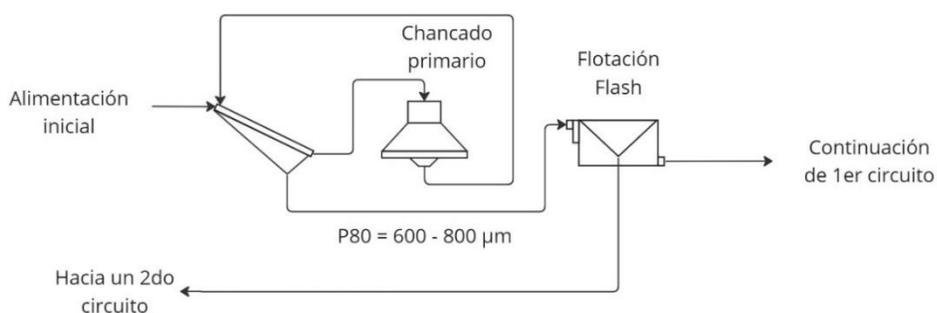
Estas pruebas proporcionaron información crucial para comprender en qué medida era necesario moler el material y lograr así una liberación adecuada del mineral de interés. En total, se llevaron a cabo siete evaluaciones de granulometría, las cuales se detallan en el Anexo F junto con sus respectivos tiempos de molienda y sus cálculos.

### **3.3 Proceso de extracción por flotación**

Como se mencionó en los objetivos de este estudio, la obtención de grafito se concentra en la fase de flotación flash, utilizando dos tipos de celdas. Dado que SGS ya ha realizado pruebas con este material en la celda Denver, se tomó como referencia el procedimiento de operación de esta celda, incluyendo sus respectivas dosis.

### 3.4 Circuito 1

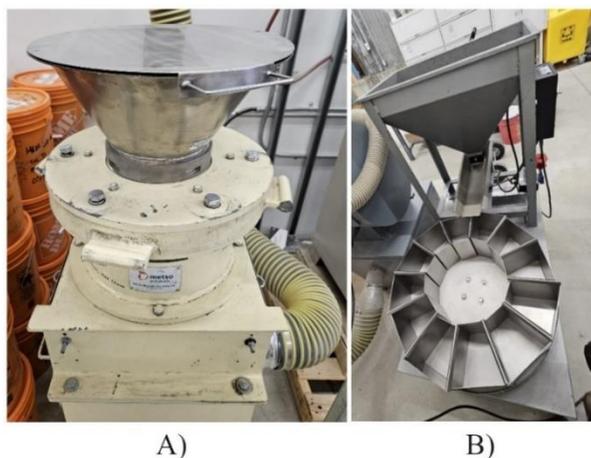
El circuito 1 (Figura 28) comenzó con la etapa de trituración primaria para lograr una granulometría de 600 a 800 micrones, necesaria para la flotación flash. Se emplearon dos tipos de celdas de flotación para este proceso, realizándose un total de 14 pruebas de flotación por lote. Las primeras cinco pruebas se llevaron a cabo en la celda Denver, mientras que las nueve pruebas restantes se efectuaron en la celda Hydrofloat.



**Figura 28.** Simulación circuito 1 de recuperación de grafito por flotación flash (Adaptación de propuesta de SGS).

#### 3.4.1 Chancado primario

El material fue sometido a etapas de conminución las cuales se acompañaron de etapas de homogeneización. En total, se llevaron a cabo tres fases de chancado utilizando un triturador de cono (Figura 29 A)), el cual fue ajustado en la última etapa a una apertura máxima de 1.2 mm. Entre cada fase de chancado, se implementaron procedimientos de homogeneización mediante el uso de un paño extenso de polietileno y para una mejor representatividad se utilizó un carrusel (Figura 29 B)).



**Figura 29.** A) Chancador de cono Metso y B) Carrusel.

En la Tabla 3, se presenta un resumen de las etapas previamente descritas.

**Tabla 3.** Resumen etapas de conminucion y homogeneización para la preparación de la muestra.

<b>Etapas</b>	<b>Material Chancado</b>	<b>Equipo</b>
Chancado 1	Fracción + 2.5 mm	Chancador de Cono
Homogeneización 1	1er chancado y fracción – 2.5 mm	Paño de Roleo
Chancado 2	Todo el material (1er chancado y fracción – 2.5 mm)	Chancador de Cono
Homogeneización 2	Material obtenido de chancado 2	Paño de Roleo
Chancado 3	Muestra de 500 g del material homogeneizado	Chancador de Cono
Chancado 4	Todo el material	Chancador de Cono
Homogeneización 3	Todo el material	Carrusel

Una vez que todo el material fue chancado, se almacenó en 12 tarros de pesos similares; los detalles de las masas se encuentran en el Anexo G. El producto final obtenido se muestra en la Figura 30.



**Figura 30.** Material obtenido del primer chancado 648.96  $\mu\text{m}$ .

### 3.4.2 Flotación en celda Denver (CD) y celda Hydrofloat (CH).

A continuación, se exhibe la Tabla 4, que sintetiza el propósito de cada evaluación efectuada con sus condiciones correspondientes.

**Tabla 4.** Ensayos para determinar los parámetros óptimos con sus respectivas condiciones.

Ensayo	Objetivo	Equipo	Condiciones						
			Masa [g]	V [mL]	% Sólido	Aire [L/min]	Agua [L/min]	Diesel [g/t]	MIBC [g/t]
1.1	Probar alimentación en seco	CH	150.0	7647	-	4	6	-	-
1.2	Probar alimentación en húmedo	CH	1010.4	7647	12.16	3	5	-	-
2	Adición de reactivos sin dosificación para el material húmedo	CH	1010.6	7647	12.16	3	5	80.2	32.2
3	Formar una cama de material	CH	4966.8	7647	45.56	4	4.5	15	2.5
4	Agregar los reactivos antes y acondicionamiento en Hydrofloat	CH	2503.4	7647	26.96	4 – 6	4	45	7.5
5	Flotación en celda Denver para poder acondicionar y comparar con resultados de SGS	CD	1997.7	4500	34.39	4	-	2.5	15
6	Flotación en celda Denver para poder acondicionar y comparar con resultados de SGS	CD	1999.4	4500	34.41	4	-	15	2.5
7	Preparación de material en la celda Denver para luego pasarlo a la celda Hydrofloat	CD y CH	1996.6	CD 4500 CH 7647	CD 34.38 CH 22.30	4	2.5	2.5	15
8	Preparación de material en la celda Denver para luego pasarlo a la celda Hydrofloat	CD y CH	2003.8	CD 4500 CH 7647	CD 34.47 CH 22.36	4	2.5	15	2.5
9	Preparación de material (razón de 4.67) en la celda Denver para luego pasarlo a la celda Hydrofloat	CD y CH	1910.2	CD 4500 CH 7647	CD 33.21 CH 21.47	4	2.5	15	2.5
10	Alimentación de MIBC diluyéndolo para alimentarlo continuamente al Hydrofloat	CD y CH	2002.3	CD 4500 CH 7647	CD 34.45 CH 22.35	4	3.0	2.5	25
11	Acondicionamiento del material con un aumento de colector para ver el impacto que tiene en la flotación	CD y CH	2004.8	CD 4500 CH 7647	CD 34.49 CH 22.37	4	2	25	15

### Ensayos 1 a 4

En las primeras cuatro pruebas realizadas, se variaron diversas condiciones, destacándose especialmente la masa, el flujo de aire y de agua, las cuales se detallan en la tabla anterior. Otro factor, no mencionado en la tabla, pero sin tanta relevancia, fue el porcentaje de vibración del alimentador

utilizado para introducir el material en la celda de Hydrofloat, variando entre el 51% y el 75% según el estado del material. Se aumentó este porcentaje en condiciones más húmedas y, en contraste, se disminuyó con material seco para permitir una incorporación gradual en la celda y evitar una caída rápida.

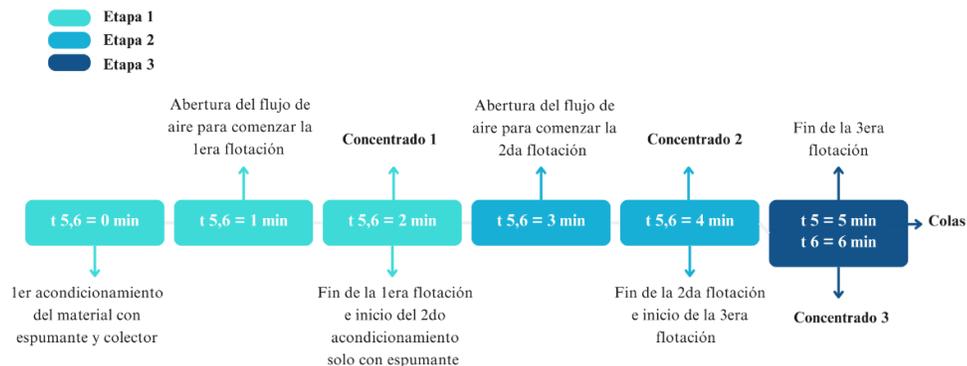
### Ensayos 5 y 6

Las pruebas 5 y 6 se llevaron a cabo en una celda de flotación Denver (Figura 31) a 1800 rpm con el propósito de acondicionar y flotar el material para posteriormente comparar los resultados obtenidos de los concentrados y colas con los de la celda Hydrofloat.



**Figura 31.** Celda Denver.

En ambas pruebas, se realizaron tres etapas, pero con la diferencia que las dosis de los reactivos se invirtieron como se puede observar en la Tabla 4. En la siguiente Figura 32, se observan las diferentes etapas con sus respectivos tiempos de flotación y productos para cada ensayo.



**Figura 32.** Etapas de flotación con sus respectivos tiempos y productos para los ensayos 5 y 6.

## Ensayos 7 y 8

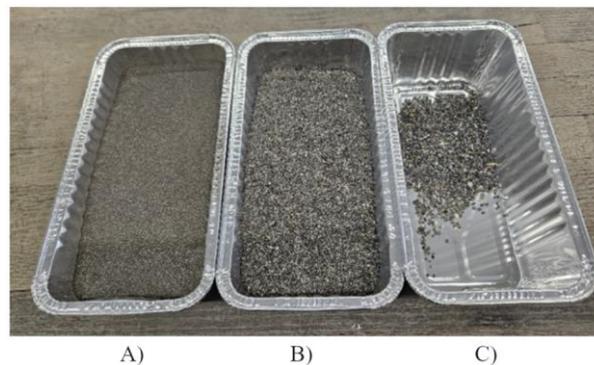
Para los ensayos 7 y 8, la pulpa se acondicionó en la misma celda Denver, pero esta vez se flotó en la celda Hydrofloat. En este caso se realizó la flotación en el Hydrofloat siguiendo 2 etapas e invirtiendo las dosis de reactivos entre estos dos ensayos de igual forma que las pruebas anteriores. Las diferentes etapas se ilustran en la Figura 33.



**Figura 33.** Etapas de flotación con sus respectivos tiempos y productos los ensayos 7 y 8.

## Ensayo 9

La particularidad de este ensayo fue trabajar con una razón de 4.67 entre las partículas más gruesas y las más finas dado que para operar la celda Hydrofloat se recomienda mantener una relación entre 4 y 6 para garantizar un funcionamiento óptimo, por experiencias previas en el manejo de la celda. Por esta razón, se preparó el material pasándolo a través de un tamiz de  $300 \mu\text{m}$  y otro de  $1.4 \text{ mm}$ , obteniendo 3 productos (Figura 34), y de los cuales solo se usó el material entre  $300 - 1400 \text{ micrones}$ .



**Figura 34.** A) Inferior a  $300 \mu\text{m}$ , B) Entre  $300 - 1400 \mu\text{m}$  y C) Superior a  $1400 \mu\text{m}$ .

Una vez preparado el material, se siguió con el procedimiento de la Figura 35.



**Figura 35.** Etapas de flotación con sus respectivos tiempos y productos para el ensayo 9.

### Ensayo 10

En este ensayo, se optó por alimentar el MIBC de forma continua mediante una bomba dosificadora. En primer lugar, se diluyeron 4 de MIBC en 750 mL de agua para alcanzar la dosis deseada, tal como se muestra en la Tabla 4. Y luego se siguió con el mismo procedimiento que para los otros ensayos, como se ilustra en la Figura 35 con la salvedad que el concentrado 2 se obtuvo a los 13 minutos de flotación.

Cabe destacar que antes de comenzar con el ensayo, se probaron 2 flujos de alimentación del MIBC con la bomba dosificadora, a 100 LPM y 170 LPM, de los cuales se optó por seguir trabajando a un flujo de alimentación de 100 LPM.

### Ensayo 11

En este último ensayo, se aplicó el mismo procedimiento utilizado en los ensayos 7 y 8, pero con una dosis de colector más elevada durante el acondicionamiento del material. En este caso los concentrados uno y dos se obtuvieron a los 9 y 11 minutos de flotación respectivamente.

#### 3.4.3 Flotación Denver: reproducibilidad del mejor ensayo (E5)

Dado el análisis de las recuperaciones y leyes que se expondrán posteriormente en el Capítulo 4, se optó por replicar el ensayo 5, ya que arrojó los mejores resultados. Se llevaron a cabo tres réplicas manteniendo las mismas condiciones operativas, es decir: utilizando la celda Denver a 1800 rpm, con un porcentaje de sólidos del 34.41, un flujo de aire de 4 L/min y, finalmente, con 2,5 g/t de Diesel y 15 g/t de MIBC. Siguiendo los mismos procedimientos ilustrados en la Figura 32.

## CAPÍTULO 4. Resultados y Discusiones

### 4.1 Análisis de muestras del material de cabeza

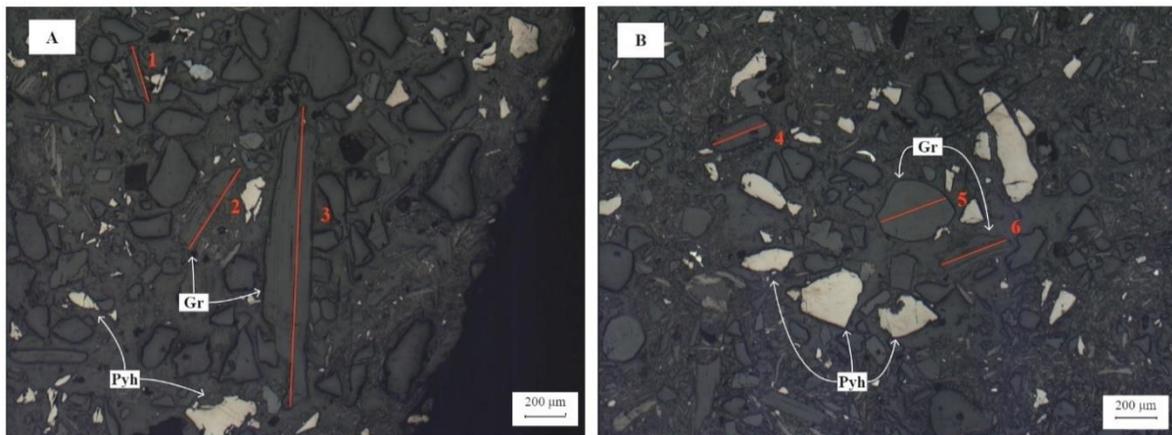
#### 4.1.1 Caracterización Mineralógica

Para los siguientes análisis se utilizaron 4 muestras del mismo material para tener una mejor representatividad.

##### Microscopio óptico

A través del análisis de microscopía óptica, se capturaron dos imágenes del mineral a una escala de 200 micrones (Figura 36). En ellas, se aprecia que el grafito se encuentra bien liberado y separado de los elementos sulfurados presentes, principalmente la pirrotita. Además, se destaca la ausencia de signos de oxidación alrededor de los sulfuros.

Al realizar una observación más detallada, se logró determinar el tamaño de los granos de grafito presentes en las muestras, lo que permitió establecer una relación de tamaño entre la partícula más pequeña y la más grande.



**Figura 36.** Microscopía óptica del material chancado y pulverizado al inicio de la investigación. Gr: Grafito y Pyh: Pirrotita. Tamaños de mineral de Gr 1) 283  $\mu\text{m}$ , 2) 450  $\mu\text{m}$ , 3) 1433  $\mu\text{m}$ , 4) 283  $\mu\text{m}$ , 5) 333 y 6) 333. Magnificación X50.

##### Difracción de Rayos X (DRX)

Mediante el análisis por difracción de rayos X, se identificaron los principales compuestos presentes en el mineral. Dichos compuestos se detallan en la Tabla 5, donde se destaca que el grafito es el componente más predominante, con un promedio del 62.93% entre las cuatro muestras.

**Tabla 5.** Composición porcentual de los elementos presentes inicialmente.

<b>Muestra</b>	<b>A</b>	<b>B</b>	<b>C</b>	<b>D</b>	<b>Promedio</b>
Quartz	14.82	16.55	14.83	16.00	15.55
Pyrrhotite-3H, syn	1.16	1.53	2.13	2.45	1.82
Muscovite-2M1	3.51	3.66	10.36	9.93	6.87
Calcite	8.79	10.27	4.15	4.46	6.92
Biotite 1M Mica	7.28	6.32	4.86	5.23	5.92
Graphite 3R	64.44	61.67	63.67	61.93	62.93

Para más detalle de los espectrogramas obtenidos para cada muestra revisar los gráficos del Anexo H.

No obstante, para validar los datos obtenidos, se llevaron a cabo análisis químicos y físicos adicionales que complementaron los resultados mineralógicos.

#### 4.1.2 Caracterización Química

##### Azufre y carbono (S/C)

Con el propósito de determinar el porcentaje inicial de carbono y azufre con el que se está trabajando, se realizaron pruebas mediante el equipo "Carbon Sulfur Determinator". Los resultados de dichas pruebas se presentan en la Tabla 6.

**Tabla 6.** Resultados % de C y S para las muestras A, B, C y D.

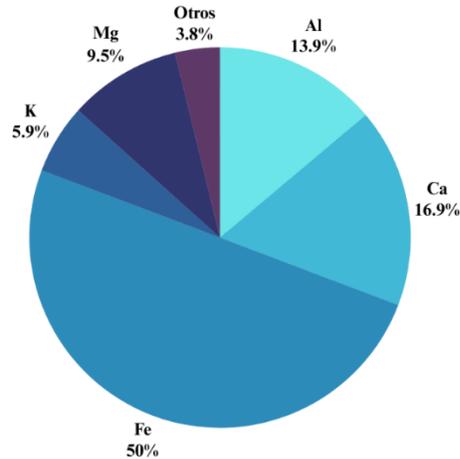
<b>Muestra</b>	<b>%C</b>	<b>%S</b>
A	16.13	5.65
B	12.53	5.71
C	14.96	5.84
D	15.02	6.57
Duplicado de B	16.25	6.19
Duplicado de D	15.41	5.93

El porcentaje de carbón promedio inicial es de 14.66, mientras que el de azufre es de 5.78, tomando en cuenta las 4 muestras.

##### Espectroscopía Plasma con Acoplamiento Inductivo (ICP)

Con el objetivo de obtener una mayor precisión sobre los elementos presentes en el material y así identificar las impurezas que acompañan al grafito, se llevó a cabo un análisis de Plasma con

Acoplamiento Inductivo. Los elementos predominantes se visualizan en el gráfico de la Figura 37, mientras que la lista completa de elementos se encuentra detallada en la tabla del Anexo I.



**Figura 37.** Resultados de principales elementos presentes inicialmente por ICP.

Este análisis confirma que la principal impureza identificada es el hierro (Fe), cuya presencia se atribuye a la pirrotita, según los análisis previos de microscopía óptica y de DRX. Además, la detección de calcio (Ca) concuerda con la presencia de calcita, mientras que la presencia de potasio (K) y aluminio (Al) se explica por la muscovita y biotita identificadas en los resultados de DRX.

#### 4.1.3 Caracterización Física

##### P80

Se llevaron a cabo cinco análisis granulométricos preliminares antes de llegar a la granulometría óptima para el proceso de flotación. Una vez alcanzada esta granulometría, se llevaron a cabo dos pruebas, cada una de las cuales se repitió utilizando muestras representativas diferentes del material para asegurar la homogeneidad del tamaño de partícula en todo el material. Los resultados de las pruebas realizadas para las sexta y séptima granulometría, donde se llevaron a cabo dos pruebas (P1 y P2) para cada una, se muestran en la Tabla 7. En estas, se observa que el p80 se sitúa entre las mallas de 841 y 595 micrones.

**Tabla 7.** Porcentajes pasantes para las granulometrías de comprobación.

Abertura Malla [ $\mu\text{m}$ ]	Abertura Malla [mm]	6 <sup>o</sup> granulometría		7 <sup>o</sup> granulometría	
		P1	P2	P1	P2
2362	2.362	100.00	100.00	100.00	100.00
1851	1.851	99.79	99.78	99.77	99.76
1168	1.168	97.12	97.13	96.74	96.82
841	0.841	88.82	89.02	88.95	88.89
595	0.595	77.36	77.05	77.53	77.70
420	0.420	64.88	64.20	65.05	65.39
297	0.297	51.72	50.84	51.86	52.32

A partir de la Tabla 7, se realizó un análisis de tendencia lineal en Excel para obtener el p80, obteniendo los siguientes resultados: 652  $\mu\text{m}$ , 656  $\mu\text{m}$ , 648  $\mu\text{m}$  y 645  $\mu\text{m}$ , respectivamente. Así, se logra un promedio de p80 inicial de 650  $\mu\text{m}$ , alcanzando la meta establecida.

#### Picnometría: Densidad aparente

Para completar la caracterización integral del mineral, se llevaron a cabo, en última instancia, pruebas de densidad aparente. Los resultados correspondientes a estas pruebas se presentan en la Tabla 8, basados en la evaluación de únicamente dos muestras en este caso.

**Tabla 8.** Densidad aparente de la muestra mineral.

Muestra	Densidad, g/mL
A	2.90
B	2.89

De las muestras A y B se obtuvo un promedio de densidad aparente de 2.90 g/mL. Cabe destacar que estas muestras se obtuvieron a través de iteraciones que realizó el picnómetro, estas se observan para cada caso en el Anexo J.

## 4.2 Ensayos en celda Denver e Hydrofloat

Los ensayos del 1 al 4 se llevaron a cabo como pruebas preliminares destinadas a observar algunas de las variables operativas del Hydrofloat. Sin embargo, los resultados obtenidos en estos ensayos no se consideraron como el resultado de una flotación, por lo que no se realizaron balances de masa ni análisis de Azufre-Carbono. De estas pruebas, se pudo concluir que no había una gran diferencia entre una alimentación en seco y como pulpa.

Por otro lado, las pruebas 5 y 6 fueron las primeras pruebas de flotación. Al obtener buenos resultados en la celda Denver, se tomó la decisión de recrear las pruebas, pero esta vez en la celda Hydrofloat. Sin embargo, en las pruebas 7 y 8, al intentar replicar las flotaciones de la celda Denver de los ensayos 5 y 6 con las mismas dosis de reactivos respectivamente, los resultados obtenidos difirieron de los obtenidos en la celda Denver. Esto llevó a ajustar ciertos parámetros para explicar esta discrepancia.

Dado que ya se habían variado las dosis de reactivos en pruebas anteriores, en el ensayo E9 se tomó la decisión de modificar la granulometría del material, tamizándolo para eliminar los finos y evitar así una sedimentación de estos en la celda.

En cuanto al ensayo 10, se realizaron 2 pruebas preliminares con agua y MIBC, utilizando 2 flujos de alimentación de MIBC con la bomba dosificadora para observar el tamaño de burbuja generado. Cada una tuvo una duración de 5 minutos manteniendo la misma concentración en ambas.

La primera prueba se llevó a cabo con una alimentación de 100 LPM, donde se observaron pequeñas burbujas estables de aproximadamente 3 mm que alcanzaban el borde del Hydrofloat antes de explotar. Por el contrario, con una alimentación más alta de 170 LPM, se observaron aglomerados de burbujas de diferentes tamaños y menor estabilidad, explotando antes de llegar al borde de la salida del concentrado.

Al haber ya variado la dosis de espumante, también se quiso modificar la del colector para evaluar su impacto en el proceso. Dado que ya se había utilizado una dosis baja, en el ensayo 11 se decidió probar con una dosis más elevada. A simple vista, se pudo observar un mayor material flotando en la superficie.

Dado que estos resultados se basan en observaciones, en los siguientes puntos se analizarán y comentarán los resultados obtenidos de análisis tangibles.

### **4.3 Balance de masa**

Después de los procesos de flotación, se procedió a pesar los concentrados y las colas para cada ensayo. Estos resultados se presentan en la siguiente tabla, junto con los porcentajes de pérdida, los cuales se encuentran dentro de los rangos esperado y además se encuentran dentro del margen permitido para considerar válido cada ensayo, ya que son inferiores al 5% de pérdida. Estas pérdidas

son atribuibles a los inconvenientes experimentados durante la filtración del material y a las transferencias de masa desde un recipiente a otro una vez que el material se encontraba seco.

**Tabla 9.** Balance de masa de los todos los ensayos.

<b>Ensayos</b>	<b>Conc. , g</b>	<b>Colas, g</b>	<b>Alim.Calculada, g</b>	<b>Alim. , g</b>	<b>Pérdidas, %</b>
<b>E5</b>	260.9	1712.8	1973.7	1997.7	1.2
<b>E6</b>	286.8	1651.8	1938.6	1999.4	3.0
<b>E7</b>	139.8	1831.9	1971.7	1996.6	1.3
<b>E8</b>	170.9	1769.9	1940.8	2003.8	3.1
<b>E9</b>	67.9	1795.8	1863.7	1910.2	2.4
<b>E10</b>	73.8	1858.5	1940.4	2002.3	3.1
<b>E11</b>	229.1	1759.0	1988.1	2004.8	0.8
<b>E5.1</b>	265.0	1726.4	1991.4	2010.4	0.9
<b>E5.2</b>	310.9	1670.0	1980.9	2014.2	1.7
<b>E5.3</b>	282.7	1709.4	1992.1	2004.0	0.6

#### **4.4 Análisis Azufre - Carbono**

En relación con los análisis de porcentaje de carbono y azufre, se destaca en la Tabla 10, que los ensayos 5 y 6, realizados con la celda Denver, muestran los mejores porcentajes de carbono en el concentrado. Por el contrario, en los ensayos 7 y 8, correspondientes a la flotación en la celda Hydrofloat, se observa una concentración considerablemente menor en comparación con las celdas Denver.

**Tabla 10.** Porcentajes de carbón y azufre en los concentrados.

<b>Ensayos</b>	<b>C, %</b>	<b>S, %</b>
<b>E3</b>	28.91	2.62
<b>E4</b>	26.81	2.97
<b>E5 – C1</b>	96.14	2.76
<b>E5 – C2</b>	95.81	2.62
<b>E5 – C3</b>	94.00	3.28
<b>E6 – C1</b>	89.83	2.98
<b>E6 – C2</b>	82.31	3.56
<b>E6 – C3</b>	74.21	3.55
<b>E7 – C1</b>	31.74	3.27
<b>E7 – C2</b>	28.62	2.95
<b>E8 – C1</b>	38.18	2.83
<b>E8 – C2</b>	34.10	3.57
<b>E9</b>	35.67	4.58
<b>E10 – C1</b>	22.62	2.99
<b>E10 – C2</b>	24.20	2.95

<b>E11 – C1</b>	30.80	2.61
<b>E11 – C2</b>	25.09	2.47

Luego, al analizar estos mismos porcentajes, pero ahora en las colas (Tabla 11), se observa que en los ensayos 5 y 6 se obtienen los menores valores de carbono, lo cual es positivo, ya que indica una buena concentración que se transfirió al concentrado. En cambio, en el resto de los resultados, correspondientes a la celda Hydrofloat, estos valores superan el 10%, llegando incluso hasta un 32%, lo cual es coherente con los resultados obtenidos en la Tabla 10 e indica una concentración deficiente del grafito.

**Tabla 11.** Porcentajes de carbón y azufre en las colas.

<b>Ensayos</b>	<b>C, %</b>	<b>S, %</b>
<b>E5</b>	4.17	7.16
<b>E6</b>	4.80	7.27
<b>E7 – T1</b>	12.70	7.14
<b>E7 – T2</b>	32.38	3.84
<b>E8</b>	13.68	6.71
<b>E9</b>	11.14	5.32
<b>E10</b>	13.45	6.46
<b>E11</b>	11.41	6.54

Dado que los porcentajes de carbono más alto se obtuvieron en el ensayo 5, se llevaron a cabo 3 flotaciones más bajo las mismas condiciones de este, y se realizaron los mismos análisis para estos ensayos, denominados como 5.1, 5.2 y 5.3, tanto para los concentrados como para las colas obtenidas. Estos resultados se muestran en la Tabla 12 y Tabla 13 respectivamente.

En la Tabla 12, se observa que no hay una gran diferencia entre los concentrados 1, 2 y 3 de los tres ensayos, lo cual valida el ensayo 5. En los tres casos, se observa una disminución en el segundo concentrado obtenido, y ya en el tercero, un aumento, que se explica porque en la segunda etapa de flotación se agregó la segunda dosis de MIBC.

**Tabla 12.** Porcentajes de carbón y azufre en los concentrados de los ensayos de reproducción.

Concentrado	E 5.1		E 5.2		E 5.3	
	C, %	S, %	C, %	S, %	C, %	S, %
<b>C1</b>	80.71	2.99	85.27	2.72	83.04	2.95
<b>C2</b>	73.34	3.16	75.53	2.99	76.31	2.97
<b>C3</b>	81.04	2.21	76.91	2.68	81.54	2.75

En la Tabla 13, para el caso de las colas, se obtuvieron bajos concentrados de carbono, siendo estos en los tres casos inferiores a 10%.

**Tabla 13.** Porcentajes de carbón y azufre en las colas de los ensayos de reproducción.

Ensayos	C, %	S, %
<b>E 5.1</b>	6.17	6.63
<b>E 5.2</b>	3.83	7.33
<b>E 5.3</b>	5.23	6.87

Finalmente, para complementar los resultados con evidencia visual, se invita a revisar el Anexo K, donde se presentan imágenes de los concentrados y colas obtenidos de todos los ensayos realizados y para el caso de las reproducciones revisar el Anexo L.

#### 4.5 Análisis de recuperación

La recuperación de cada prueba se calculó en base a la ecuación (1) de recuperación de finos mencionada en los antecedentes. Los resultados obtenidos se presentan en la Tabla 14, junto con las respectivas dosis de reactivos utilizadas en cada caso.

Nuevamente, al igual que en los análisis de carbono y azufre, se observa que las mejores recuperaciones se obtuvieron en los ensayos realizados con la celda Denver. Específicamente, se lograron recuperaciones del 78% y 76%, con leyes de 96% y 86%, respectivamente, en los ensayos 5 y 6.

En cuanto a la celda Hydrofloat, a pesar de la variación de parámetros como el flujo de aire, agua y dosis de reactivos, las mayores recuperaciones obtenidas fueron del 26% en el ensayo 11, con una ley del 30%. Sin embargo, en el ensayo 8, se registró una recuperación más baja del 21%, pero con una ley mayor del 37%.

**Tabla 14.** Recuperación y ley para los ensayos E5 a E12.

<b>Ensayo</b>	<b>Diésel, g/t</b>	<b>MIBC, g/t</b>	<b>Recuperación, %</b>	<b>Ley, %</b>
<b>E5</b>	2.5	15	78	96
<b>E6</b>	15	2.5	76	86
<b>E7</b>	2.5	15	14	32
<b>E8</b>	15	2.5	21	37
<b>E9</b>	15	2.5	11	36
<b>E10</b>	2.5	25	7	23
<b>E11</b>	25	15	26	30

### Reproducción de ensayo 5

Al analizar ahora por separado las reproducciones del ensayo 5, se pueden observar las recuperaciones y leyes correspondientes en la Tabla 15. Se destaca una diferencia notable en la recuperación, siendo la mayor entre el ensayo 5 y el ensayo 5.1, con una discrepancia del 12%. Esto se explica dada heterogeneidad del material en cada prueba batch y, además, podría atribuirse a la precisión del análisis de S/C.

**Tabla 15.** Recuperación y ley para los ensayos E 5.1, E 5.2 y E 5.3.

<b>Ensayo</b>	<b>Diésel, g/t</b>	<b>MIBC, g/t</b>	<b>Recuperación, %</b>	<b>Ley, %</b>
<b>E 5.1</b>	2.5	15	66	78
<b>E 5.2</b>			80	81
<b>E 5.3</b>			73	82

Respecto a las leyes, la disparidad es aún más marcada entre el ensayo 5 y nuevamente en el 5.1, con una diferencia de hasta un 18%. Estas discrepancias pueden explicarse debido a que no se mantuvo la misma turbulencia; mientras que para el ensayo 5 se emplearon 1800 rpm, para el 5.1 se redujo a 1500 rpm, debido a un descuido al regular el manómetro. No obstante, para los dos ensayos restantes se mantuvo una agitación adecuada en la celda.

A pesar de las discrepancias entre el ensayo original y sus réplicas en las recuperaciones, lo que respalda la satisfactoria y prometedora naturaleza de los resultados de las reproducciones son las leyes de estos concentrados mostrando una variación mínima como se observa en la Tabla 5.

## **CAPÍTULO 5. Observaciones y Recomendaciones**

Con base en los resultados recopilados de los once ensayos realizados, se evidencia una gran disparidad entre el desempeño de la celda Denver y la Hydrofloat. Esta diferencia en los resultados, tanto en los análisis de azufre y carbón como en las recuperaciones, se atribuye principalmente a que no se logró operar la Hydrofloat de manera óptima debido a la cantidad de parámetros operacionales que hay que vigilar.

Inicialmente, no se logró mantener un porcentaje de sólidos constante dentro de la celda Hydrofloat, lo cual se atribuye directamente a problemas para alimentar el material de forma continua. Esta falta de consistencia, junto con una alimentación de agua constante, resultó en pérdidas de material tanto en el concentrado como en las colas. Además, al realizar las pruebas en lotes (batch), se observaron pérdidas de material y reactivos.

Para contrarrestar estos problemas, se sugiere realizar el acondicionamiento en celdas más grandes con un mayor porcentaje de sólidos, de modo que al transferirlos al Hydrofloat, el porcentaje de material sea mayor. También sería beneficioso utilizar un equipo de alimentación más eficiente para mejorar la consistencia del porcentaje de sólidos y reducir las pérdidas. Para el caso de las pérdidas de reactivo se recomienda tener una alimentación continua de estos.

A pesar de estos desafíos, se logró concentrar en cierta medida el mineral. Sin embargo, mediante la realización de más pruebas preliminares y ajustando los parámetros de operación, se podría obtener una mejor comprensión y manipulación de la celda en relación con el grafito. Esto podría conducir a resultados más satisfactorios, aprovechando las propiedades únicas del material, aunque requeriría un mayor período de tiempo dedicado a la investigación y desarrollo.

## **CAPÍTULO 6. Conclusiones**

Basándose en los resultados obtenidos por SGS, y la metodología propuesta para la flotación flash se esperaba encontrar condiciones de flotación similares entre la celda Denver y la celda Hydrofloat. Sin embargo, los resultados obtenidos demostraron que esto no funciona así, ya que las recuperaciones y leyes obtenidas en la celda Hydrofloat fueron más bajas de lo esperado, con respecto a la celda Denver, habiendo una diferencia de 52% entre las recuperaciones de concentrado de grafito más altas de cada celda y en las leyes una diferencia de 41%.

Es importante destacar que operar el Hydrofloat requiere un tiempo considerable debido a la diversidad de variables operativas que influyen en su funcionamiento. Durante el período de esta investigación, no fue posible examinar exhaustivamente el impacto de cada una de estas variables en las recuperaciones y leyes del concentrado obtenido a través de esta celda.

Por esta razón, a corto plazo se decidió continuar el tratamiento del material utilizando la celda mecánica Denver, debido a las recuperaciones satisfactorias que se lograron con este equipo y los objetivos para las siguientes etapas de esta investigación. Por otro lado, a largo plazo se espera poder utilizar la celda Hydrofloat para próximos proyectos, pero para ello hay que dedicarles tiempo a los parámetros necesarios para el tipo de material a tratar.

## REFERENCIAS

- Alquisira, J. P. (s. f.). *Elementos Químicos: El Carbono, C*.
- Awatey, B., Thanasekaran, H., Kohmuench, J. N., Skinner, W., & Zanin, M. (2013). *Optimization of operating parameters for coarse sphalerite flotation in the HydroFloat fluidised-bed separator*. 8.
- Canada. Mines Branch (1901-1936), & Spence, H. S. (Hugh S. (1920). *Graphite Canadá*. Ottawa : Thomas Mulvey. <http://archive.org/details/graphite00cana>
- Canada, R. naturelles. (2023, noviembre 29). *Exploration-minerale-canadienne*. Ressources naturelles Canada. <https://ressources-naturelles.canada.ca/nos-ressources-naturelles/mines-materiaux/mines/exploration-minerale-canadienne/8291>
- Chelgani, S. C. (2015). *A Review of Graphite Beneficiation Techniques*.
- Chung, D. D. L. (2002). Review Graphite. *Journal of Materials Science*, 37(8), 1475-1489. <https://doi.org/10.1023/A:1014915307738>
- Clarke. (1977). *Groupe de Gagnon*. <https://gq.mines.gouv.qc.ca/lexique-stratigraphique/province-de-grenville/groupe-de-gagnon/>
- Damm, S. Zhou. (2020). *Supply and Demand of Natural Graphite -DERA*. German Mineral Resources Agency (DERA) at the Federal Institute for Geosciences and Natural Resources (BGR) Wilhelmstrasse 25 – 30 13593 Berlin, Germany. [https://www.deutsche-rohstoffagentur.de/DERA/DE/Downloads/Studie%20Graphite%20eng%202020.pdf?\\_\\_blob=publicationFile&v=3](https://www.deutsche-rohstoffagentur.de/DERA/DE/Downloads/Studie%20Graphite%20eng%202020.pdf?__blob=publicationFile&v=3)
- Demir, H. K., Morrison, A., Runge, K., Evans, C., & Kohmuench, J. (2022, agosto 22). *The effects of operational parameters on HydroFloat® performance in a metalliferous application*. IMPC ASIA PACIFIC 2022, Melbourne, Australia.

DNI Metals Inc. (2014). *Traditional and Emerging Market Applications – Graphite Industry*.

<http://www.dnimetals.com/properties/graphite.htm>

Eriez Flotation. (2022). *Manuel d'opération de l'hydrofloat*.

Gouvernement du Québec. (2020). *Les minéraux critiques et stratégiques*.

<https://www.quebec.ca/gouvernement/politiques-orientations/plan-quebecois-valorisation-mineraux-critiques-strategiques>

Gouvernement du Québec MNRF. (2023). *Le Québec est riche en minéraux et en occasions d'affaires*. Ministère des Ressources naturelles et des Forêts.

<https://mrnf.gouv.qc.ca/mines/choisir-secteur-minier/>

*Grafito: Principales países productores 2022*. (2022a). Statista.

<https://es.statista.com/estadisticas/600161/paises-lideres-en-la-produccion-de-grafito-a-nivel-mundial/>

*Grafito: Reservas mundiales por países en 2022*. (2022b). Statista.

<https://es.statista.com/estadisticas/600162/reservas-mundiales-de-grafito-por-paises/>

*Institut de recherche en mines et en environnement*. (s. f.). Recuperado 9 de diciembre de 2023, de

<http://www.uqat.ca/uqat/departements/irme/>

Jara, Amha Betemariam, Girma Woldetinsae, & Jung Yong Kim. (2019). Purification, application and current market trend of natural graphite: A review. *Published by Elsevier B.V. on behalf of China University of Mining & Technology*, 19.

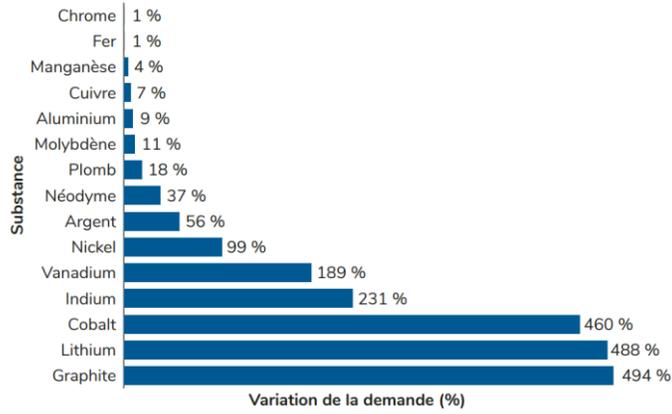
Merino, Á. (2021, diciembre 28). *El mapa de la producción de grafito en el mundo*. El Orden

Mundial - EOM. <https://elordenmundial.com/mapas-y-graficos/mapa-produccion-grafito-mundo/>

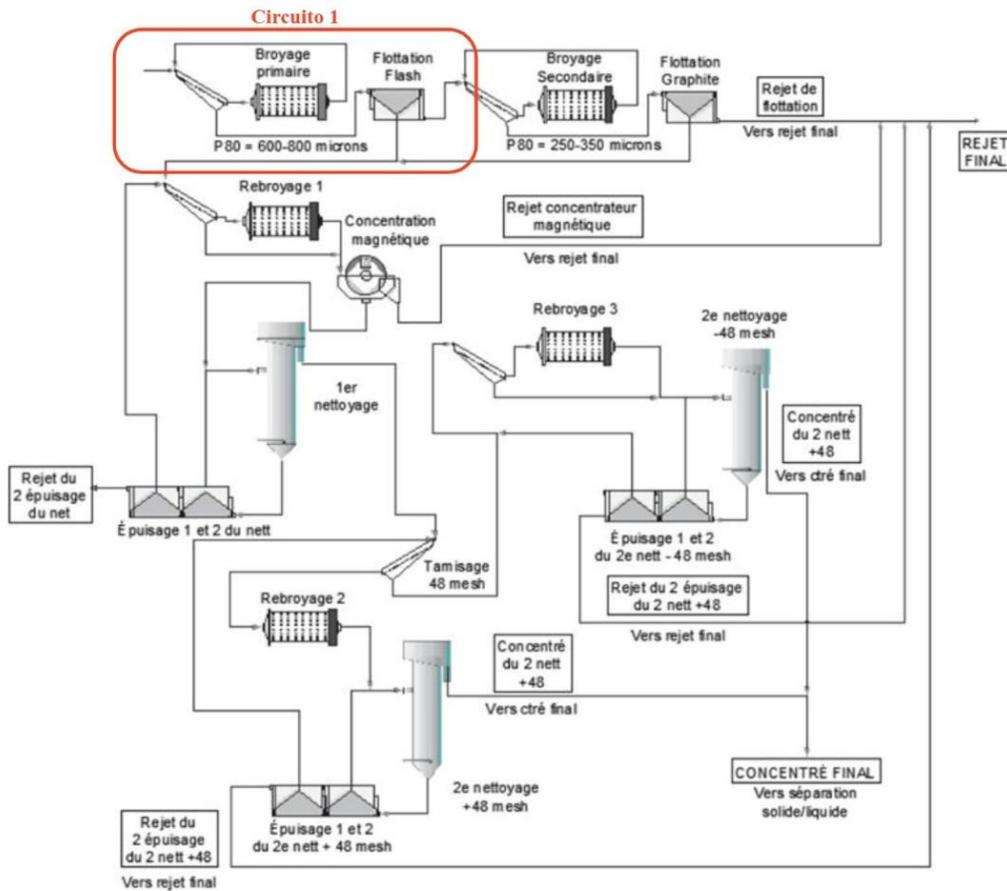
- Moore, S. (2013, julio 30). *The Natural Graphite Industry in 2012 reshaping for a hi-tech revolution*. <https://www.slideshare.net/sdmoore/industrial-minerals-data-graphite-update-december-2012>
- Mordor Intelligence. (s. f.). *Análisis de participación y tamaño del mercado de grafito: Tendencias y pronósticos de crecimiento (2023-2028)* Source: Recuperado 9 de diciembre de 2023, de <https://www.mordorintelligence.com/industry-reports/graphite-market>
- MRNF, G. du Q. (2023a). *Mines actives et en maintenance*. <https://mrnf.gouv.qc.ca/wp-content/uploads/MinesActives.pdf>
- MRNF, G. du Q. (2023b). *Projets miniers*. <https://mrnf.gouv.qc.ca/wp-content/uploads/ProjetsMiniers.pdf>
- National Minerals Information Center, U. (s. f.). *Graphite Statistics and Information* (Professional Paper) [Professional Paper]. <https://www.usgs.gov/centers/national-minerals-information-center/graphite-statistics-and-information>
- Pierson, H. O. (1993). Graphite Structure and Properties. En H. O. Pierson (Ed.), *Handbook of Carbon, Graphite, Diamonds and Fullerenes* (pp. 43-69). William Andrew Publishing. <https://doi.org/10.1016/B978-0-8155-1339-1.50008-6>
- Pochteca Chile. (2022, julio 4). *Reactivos colectores de flotación*. <https://chile.pochteca.net/reactivos-colectores-de-flotacion-que-son-y-como-se-clasifican/>
- Province de Grenville – Géologie Québec*. (2015, noviembre 30). <https://gq.mines.gouv.qc.ca/lexique-stratigraphique/province-de-grenville/>
- Segemar. (2011). *Grafito*.
- UQAT. (2023). <https://www.uqat.ca/uqat/campus-centres-points-de-service/>
- U.S. Geological Survey. (2024). *Mineral Commodity Summaries 2024*.

# ANEXOS

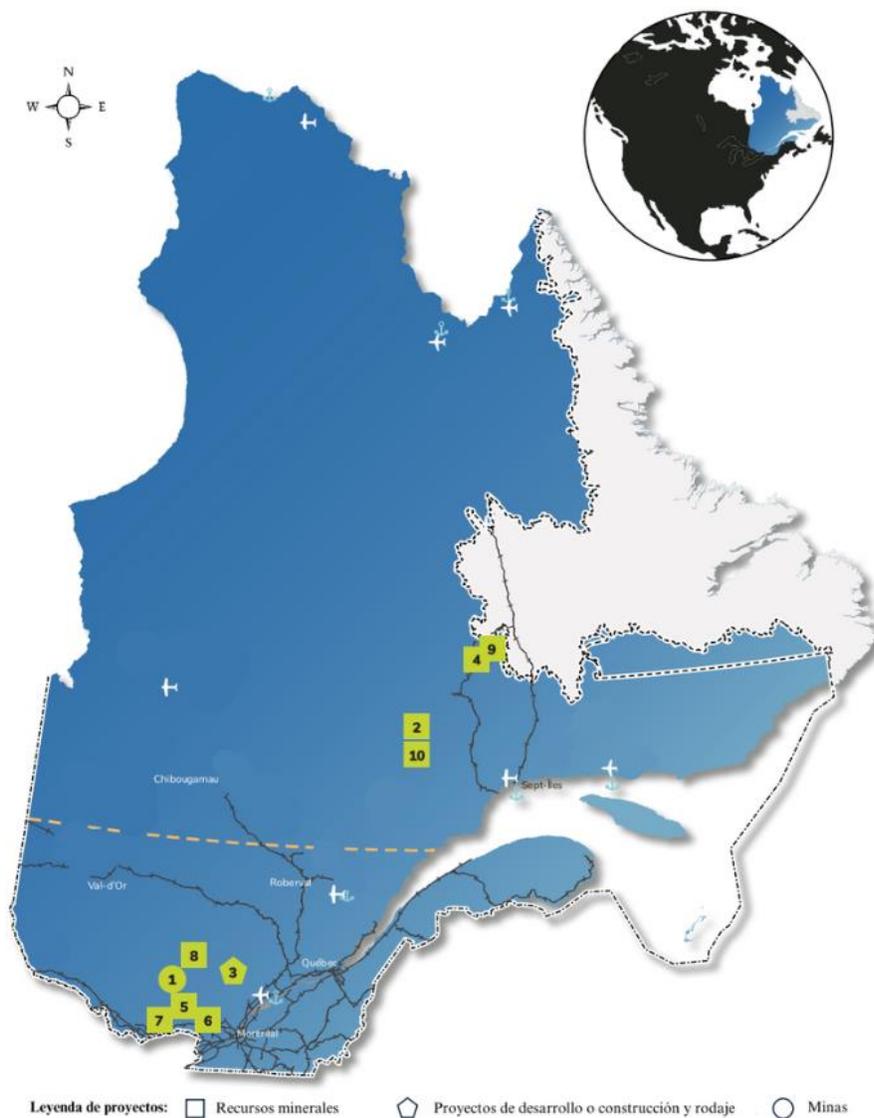
**Anexo A.** Evolución demanda de grafito entre los años 2018 y 2050 (National Minerals Information Center, s. f.).



**Anexo B.** Flowsheet global del proceso de extracción de grafito propuesto por SGS.



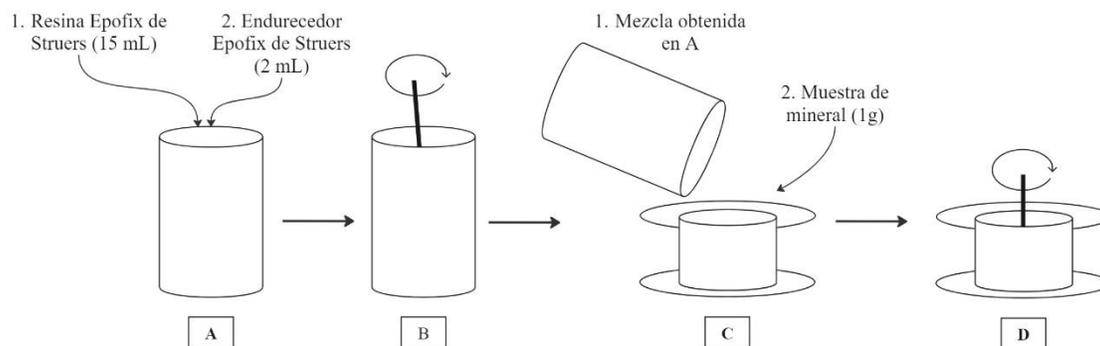
**Anexo C. Minas, proyectos mineros y recursos naturales de Grafito en Quebec (Gouvernement du Québec, 2020).**



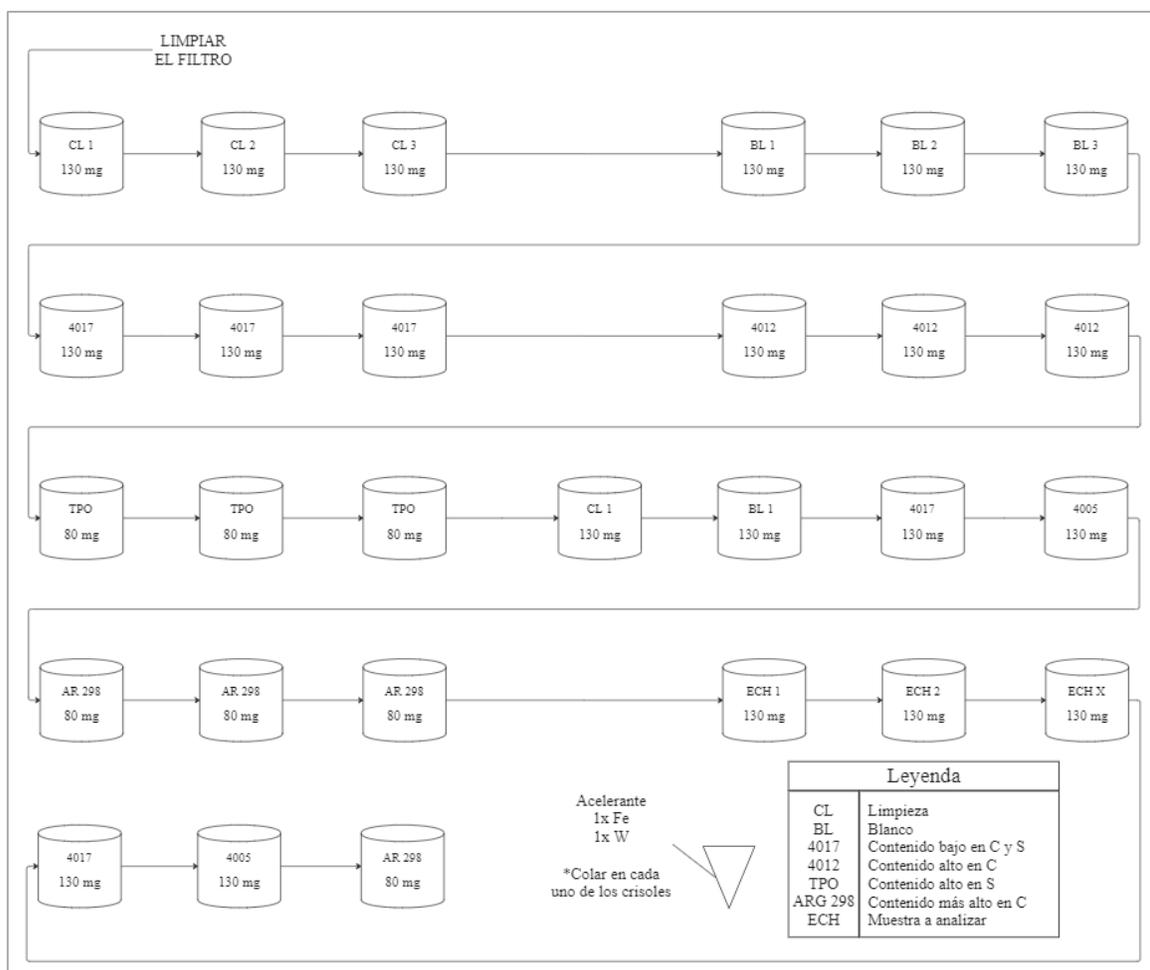
## Graphite

- 1 Lac-des-Îles**  
Imerys Graphite et Canada Carbon
- 2 Lac Guéret**  
Mason Graphite
- 3 Matawinie**  
Nouveau Monde Graphite
- 4 Lac Knife**  
Focus Graphite inc.
- 5 La Loutre**  
Lomiko Metals inc.
- 6 Miller**  
Canada Carbon
- 7 Bell Graphite**  
Saint Jean Carbon
- 8 Mousseau West**
- 9 Lac Rainy Nord**  
Metals Australia Ltd
- 10 Lac Guéret Sud**  
Berkwood Resources Ltd

**Anexo D.** Protocolo de preparación de briquetas para microscopio óptico (Adaptación de Issu de Bouzahzah).



**Anexo E.** Protocolo para la preparación de crisoles para el análisis de contenido de S/C (Adaptación de diagrama de Cathy Chouirnard).



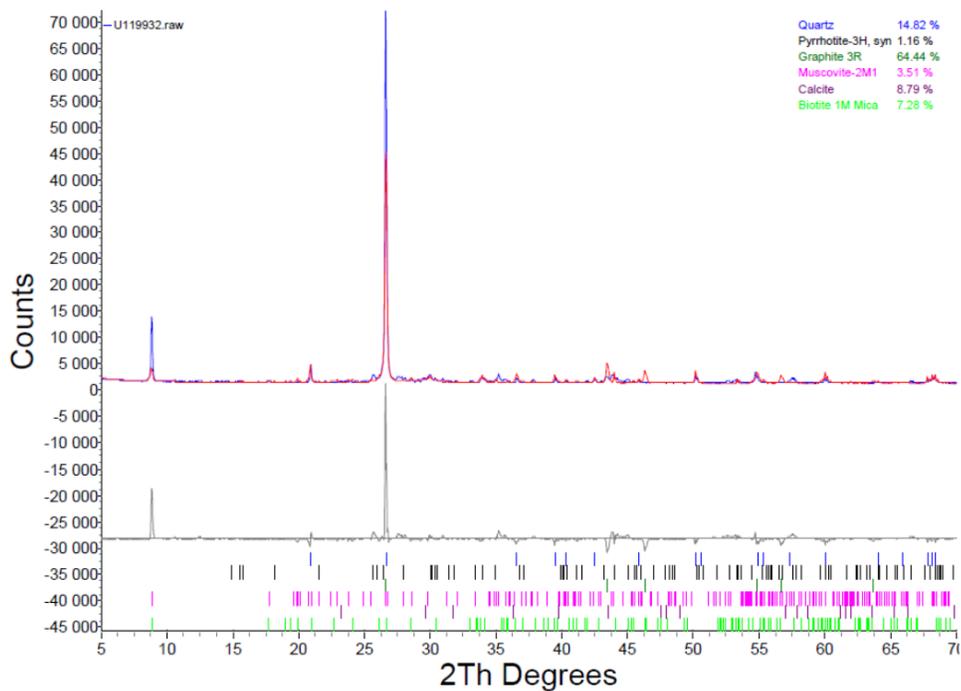
**Anexo F.** Pruebas de granulometría realizadas para corroborar la preparación del material.

<b>N° Prueba</b>	<b>P80, <math>\mu\text{m}</math></b>	<b>Tiempo, min</b>
1	973.66	15
2	731.44	20
3	911.32	15
4	871.65	30
5	905.26	30
6	651.18	50
7	646.73	50

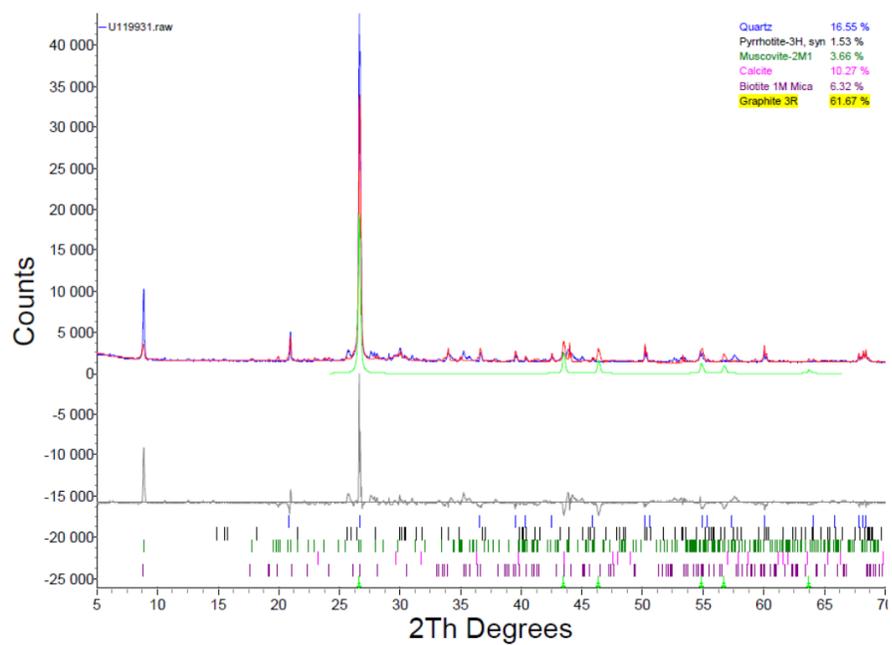
**Anexo G .** Masa de las muestras homogeneizadas guardadas en los 12 tarros.

<b>N°</b>	<b>Masa, kg</b>
1	18.2
2	17.2
3	16.0
4	17.0
5	16.8
6	17.0
7	17.0
8	16.0
9	17.2
10	17.0
11	15.8
12	18.8

**Anexo H.** Análisis obtenidos por DRX para las 4 muestras.



**Figura 38.** Espectro de DRX para la muestra A.



**Figura 39.** Espectro de DRX para la muestra B.

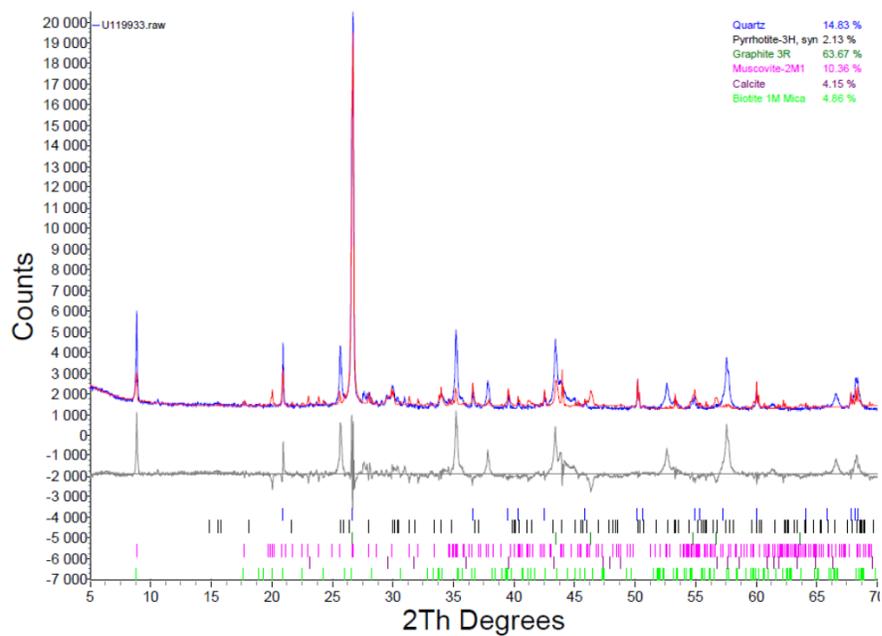


Figura 40. Espectro de DRX para la muestra C.

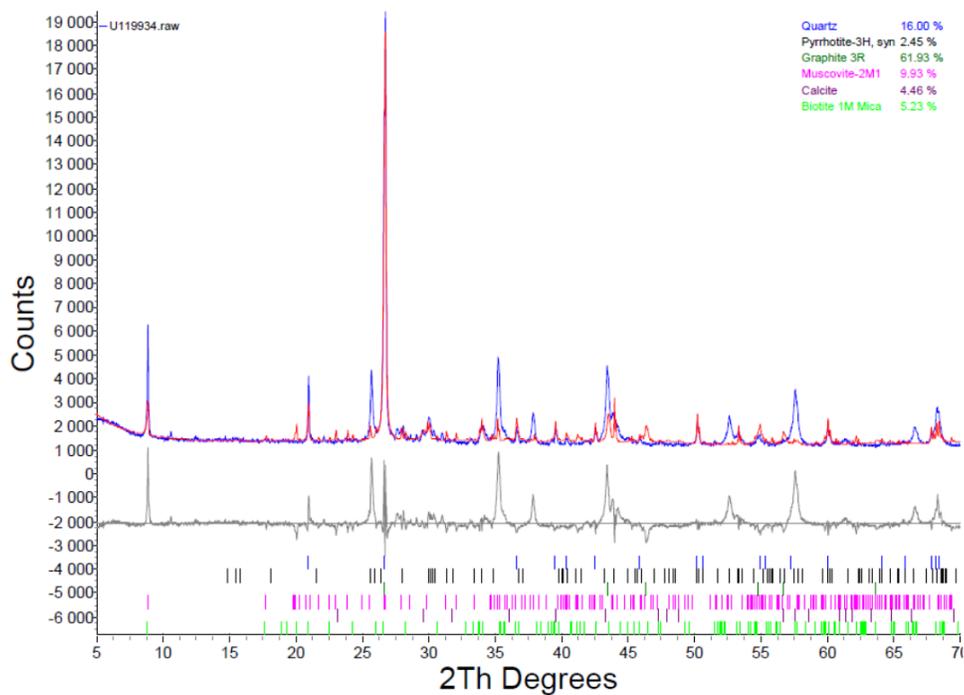


Figura 41. Espectro de DRX para la muestra D.

**Anexo I.** Resultados análisis ICP para las 4 muestras de cabeza.

<b>Elements</b>	<b>A</b>	<b>B</b>	<b>C</b>	<b>D</b>
Silver, µg/g	1.1	1.0	1.0	1.0
Aluminum, µg/g	30000	31000	31000	30000
Arsenic, µg/g	4.3	6.8	11	12
Barium, µg/g	212	220	221	199
Beryllium, µg/g	1.5	1.5	1.5	1.5
Bismuth, µg/g	1.1	1.1	1.0	1.0
Calcium, µg/g	39000	38000	35000	37000
Cadmium, µg/g	8.9	8.0	7.2	7.6
Cobalt, µg/g	27	28	38	27
Chromium, µg/g	342	1389	3558	443
Copper, µg/g	280	233	262	212
Iron, µg/g	110000	100000	120000	110000
Potassium, µg/g	13000	13000	13000	13000
Lithium, µg/g	19	19	19	18
Magnesium, µg/g	22000	21000	20000	21000
Manganese, µg/g	610	714	974	651
Molybdenum, µg/g	124	134	161	103
Nickel, µg/g	411	1000	2208	444
Lead, µg/g	18	18	19	17
Antimony, µg/g	< 0.8	< 0.8	< 0.8	< 0.8
Selenium, µg/g	10.0	9.8	8.9	9.8
Tin, µg/g	< 6	< 6	< 6	< 6
Strontium, µg/g	114	118	117	115
Titanium, µg/g	2225	2156	2016	2099
Thallium, µg/g	0.92	0.97	0.97	0.94
Uranium, µg/g	55.6	53.5	49.1	45.9
Vanadium, µg/g	950	980	920	960
Yttrium, µg/g	59.9	57.3	51.6	54.8
Zinc, µg/g	1358	1168	1102	1117

**Anexo J.** Resultados de análisis de densidad por picnometría.

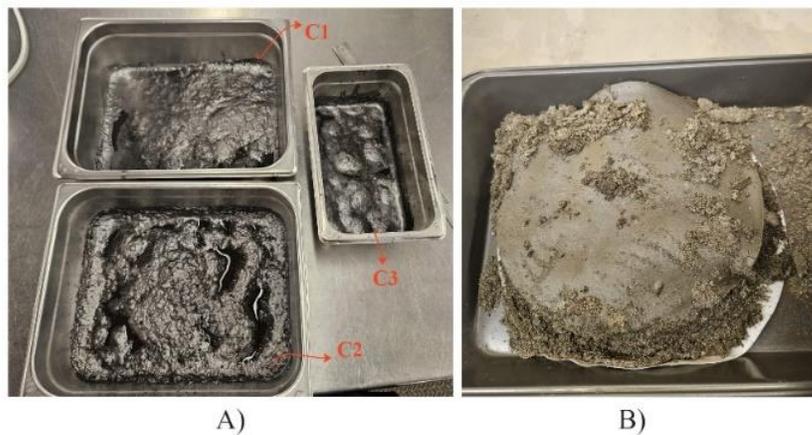
**Tabla 16.** Resultados para la muestra 1.

<b>Run</b>	<b>Volume, mL</b>	<b>Density, g/mL</b>
1	2.4518	2.8915
2	2.4506	2.8929
3	2.4507	2.8928
4	2.4520	2.8928
5	2.4495	2.8942
6	2.4493	2.8945
7	2.4499	2.8937
8	2.4475	2.8965
9	2.4476	2.8964
10	2.4471	2.8970
11	2.4475	2.8965
12	2.4475	2.8966
13	2.4468	2.8973
14	2.4464	2.8978
15	2.4473	2.8968

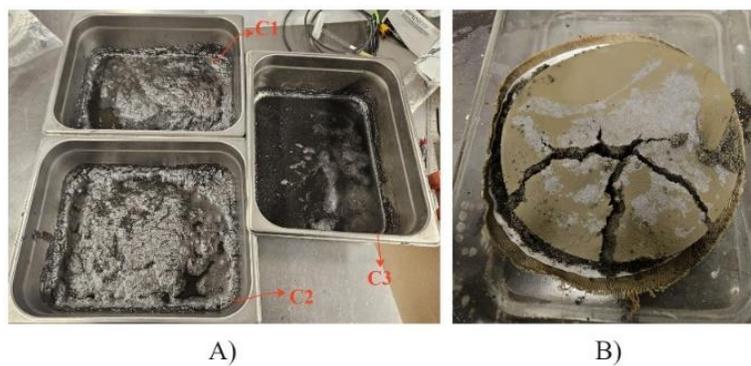
**Tabla 17.** Resultados para la muestra 2.

<b>Run</b>	<b>Volume, mL</b>	<b>Density, g/mL</b>
1	2.3254	2.8836
2	2.3260	2.8828
3	2.3251	2.8840
4	2.3258	2.8831
5	2.3248	2.8843
6	2.3254	2.8836
7	2.3243	2.8849
8	2.3241	2.8851
9	2.3214	2.8885
10	2.3224	2.8872
11	2.3234	2.8860
12	2.3210	2.8890
13	2.3238	2.8855
14	2.3245	2.8855
15	2.3238	2.8847

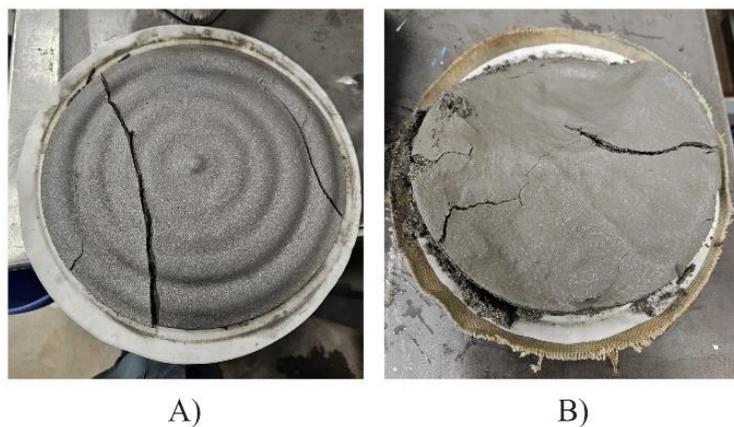
**Anexo K.** Concentrados y colas resultantes de los ensayos realizados entre E5 y E10.



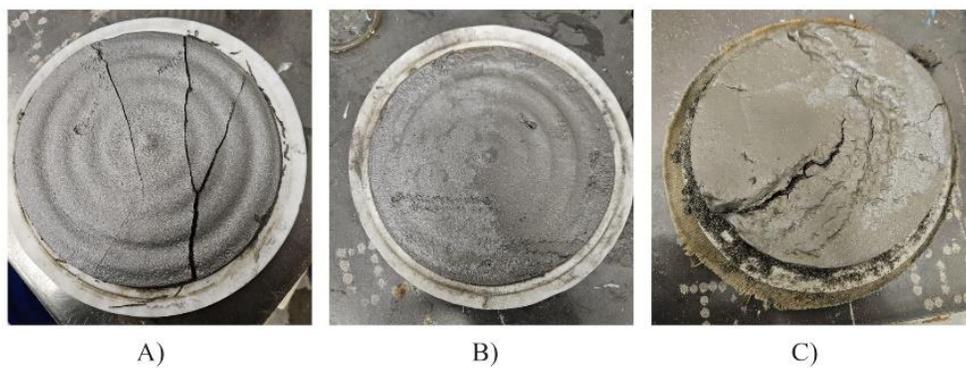
**Figura 42.** A) Concentrados y B) colas, para el ensayo 5.



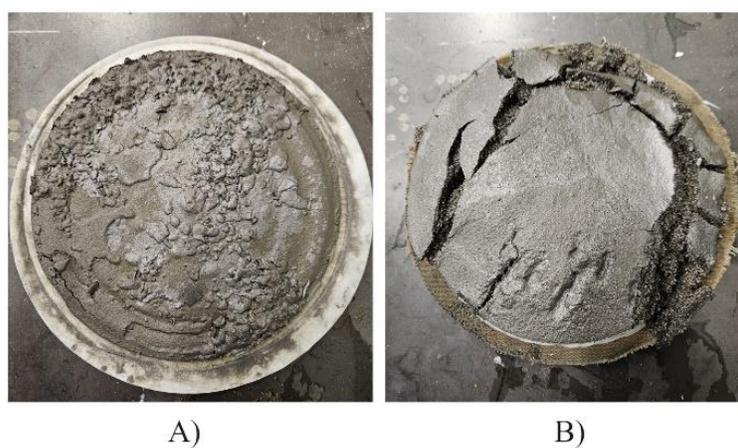
**Figura 43.** A) Concentrados y B) colas, para el ensayo 6.



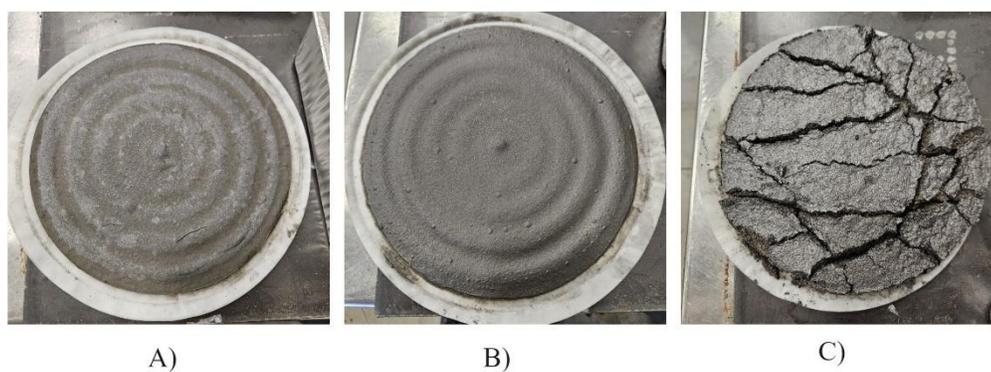
**Figura 44.** A) Concentrados y B) colas, para el ensayo 7.



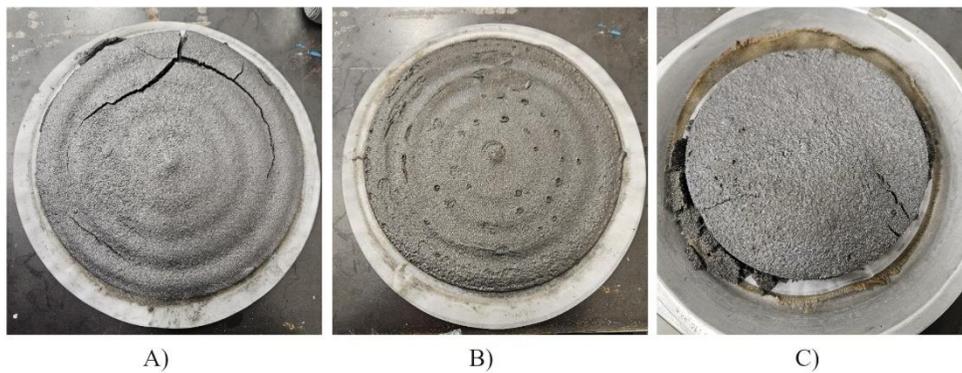
**Figura 45.** A) Concentrado 1, B) concentrado 2 y C) colas, para el ensayo 8.



**Figura 46.** A) Concentrados y B) colas, para el ensayo 9.

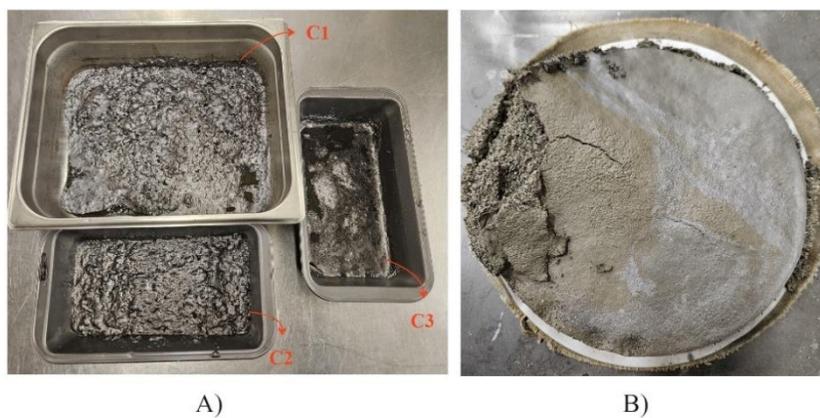


**Figura 47.** A) Concentrado 1, B) concentrado 2 y C) colas, para el ensayo 10.

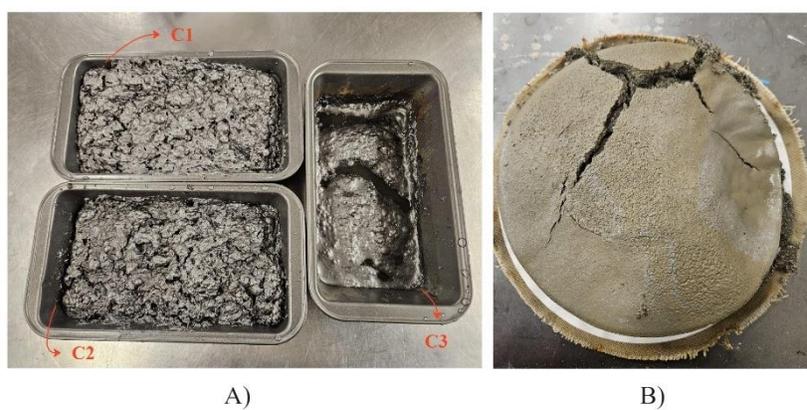


**Figura 48.** A) Concentrado 1, B) concentrado 2 y C) colas, para el ensayo 11.

**Anexo L.** Concentrados y colas resultantes de ensayos replicados del ensayo 5.



**Figura 49.** A) Concentrados y B) colas, para el ensayo E 5.1.



**Figura 50.** A) Concentrados y B) colas, para el ensayo E 5.2.



A)

B)

**Figura 51.** A) Concentrados y B) colas, para el ensayo E 5.3.

**UNIVERSIDAD DE CONCEPCIÓN – FACULTAD DE INGENIERÍA**  
**Departamento de Ingeniería Metalúrgica**  
 Hoja Resumen Memoria de Título

<b>Título:</b> Optimización del proceso de flotación para la producción de concentrado de Grafito: Evaluación de Celda Denver e Hydrofloat en minerales sulfurados de una mina en Québec.
<b>Nombre Memorista:</b> Javiera Andrea Farías Viacava

<b>Modalidad</b>	Investigación	<b>Profesor(es) Patrocinante(s)</b>	
<b>Concepto</b>			
<b>Calificación</b>			
<b>Fecha</b>	28-03-2024		
Prof. <sup>a</sup> Eugenia Araneda H.		<b>Prof. Leopoldo Gutierrez</b>	<b>Prof. Isabelle Demers</b>
		<b>Ingeniero Supervisor:</b>	
		<b>Institución:</b>	

<b>Comisión (Nombre y Firma)</b>	
Prof. Andrés Ramírez	

**Resumen**

La creciente demanda de grafito ha impulsado la realización de investigaciones destinadas a optimizar su extracción. En este contexto, el presente estudio, fue realizado en la UQAT, y tuvo como objetivo evaluar las celdas Hydrofloat y Denver para optimizar el proceso de flotación flash en la producción de concentrado de grafito de la futura mina de Lac Knife.

Para poder lograr este objetivo, se realizaron en total 11 pruebas de flotación entre ambas celdas, variando los parámetros operacionales. Además, estas flotaciones se llevaron a cabo a un tamaño de partícula de P80 = 648 µm y con un porcentaje inicial de carbón de 14.7%.

Los mejores resultados se obtuvieron en las flotaciones realizadas con la celda Denver, en el ensayo n°5 (E5), en la cual se alcanzó recuperaciones de hasta un 78% con leyes de concentrado aproximadas a un 96% de carbón. Esto se logró mediante flotaciones de 4 minutos, con un flujo de aire de 4 LPM, una agitación de 1800 rpm, un porcentaje de solido de 34%, y con 2,5 g/ton de Diesel y 15 g/ton de MIBC, alimentando este último reactivo, en 2 etapas: en  $t_0 = 0$  min y  $t_1 = 2$  min. Dado los resultados de esta prueba, se replicaron 3 pruebas en las mismas condiciones para validar los resultados.

Por el contrario, en el caso del Hydrofloat, la recuperación más alta alcanzada fue del 26% en la prueba n° 11(E11), y la mayor ley se obtuvo en la prueba n°8 (E8) con un 37%. En la prueba E8, la dosis de colector fue menor que en la prueba E11, siendo de 15 g/ton y 25 g/ton respectivamente, y en cuanto al MIBC, se emplearon 2,5 g/ton para la prueba E8 y 15 g/ton para la prueba E11. Además, en ambos casos se operó durante aproximadamente 12 minutos con un flujo de aire de 4 LMP, un flujo de agua de 2.5 LPM, y un contenido de sólidos del 22% en el Hydrofloat.

Finalmente, dado a los resultados presentados y la dificultad de operar el Hydrofloat de manera óptima debido a diversos factores operacionales, tales como mantener un porcentaje de sólido constante y flujos de alimentación del material continuos, se optó a un corto plazo por continuar el tratamiento del material con la celda mecánica y a un largo plazo estudiar en detalle las variables operacionales del Hydrofloat.