



**Universidad Nacional Mayor de San Marcos**  
**Universidad del Perú. Decana de América**  
Facultad de Ingeniería Geológica, Minera, Metalúrgica y Geográfica  
Escuela Profesional de Ingeniería Metalúrgica

**Evaluación de la temperatura que influye en la  
recuperación de molibdeno en el proceso de flotación  
para un concentrado bulk del distrito de Ilabaya**

**TESIS**

Para optar el Título Profesional de Ingeniero Metalúrgico

**AUTORES**

Erick Agustin OBREGÓN YAURICASA

Xavier Kevin PEÑA LAVADO

**ASESOR**

Dr. Vidal Sixto ARAMBURÚ ROJAS

Lima, Perú

2022



Reconocimiento - No Comercial - Compartir Igual - Sin restricciones adicionales

<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/>

Usted puede distribuir, remezclar, retocar, y crear a partir del documento original de modo no comercial, siempre y cuando se dé crédito al autor del documento y se licencien las nuevas creaciones bajo las mismas condiciones. No se permite aplicar términos legales o medidas tecnológicas que restrinjan legalmente a otros a hacer cualquier cosa que permita esta licencia.

## Referencia bibliográfica

---

Obregón, E. & Peña, X. (2022). *Evaluación de la temperatura que influye en la recuperación de molibdeno en el proceso de flotación para un concentrado bulk del distrito de Ilabaya*. [Tesis de pregrado, Universidad Nacional Mayor de San Marcos, Facultad de Ingeniería Geológica, Minera, Metalúrgica y Geográfica, Escuela Profesional de Ingeniería Metalúrgica]. Repositorio institucional Cybertesis UNMSM.

---

## Metadatos complementarios

| <b>Datos de autor 1</b>          |   |
|----------------------------------|---|
| Nombres y apellidos              | Erick Agustin Obregón Yauricasa   |
| Tipo de documento de identidad   | DNI   |
| Número de documento de identidad | 71043765  |
| URL de ORCID                     | No Aplica   |
| <b>Datos de autor 2</b>          |   |
| Nombres y apellidos              | Xavier Kevin Peña Lavado  |
| Tipo de documento de identidad   | DNI   |
| Número de documento de identidad | 70451042  |
| URL de ORCID                     | No Aplica   |
| <b>Datos de asesor</b>           |   |
| Nombres y apellidos              | Vidal Sixto Aramburú Rojas  |
| Tipo de documento de identidad   | DNI   |
| Número de documento de identidad | 08608364  |
| URL de ORCID                     | <a href="https://orcid.org/0000-0001-7411-3866">https://orcid.org/0000-0001-7411-3866</a> |
| <b>Datos del jurado</b>          |   |
| <b>Presidente del jurado</b>     |   |
| Nombres y apellidos              | Daniel Florencio Lovera Dávila  |
| Tipo de documento                | DNI   |
| Número de documento de identidad | 06450640  |
| <b>Miembro del jurado 1</b>      |   |
| Nombres y apellidos              | Manuel Prudencio Caballero Rios   |

|  |  |
|--|--|
| Tipo de documento                                      | DNI  |
| Número de documento de identidad                       | 09136425   |
| <b>Miembro del jurado 2</b>                            |  |
| Nombres y apellidos                                    | Jorge Luis Ventosilla Shaw   |
| Tipo de documento                                      | DNI  |
| Número de documento de identidad                       | 08386770   |
| <b>Datos de investigación</b>                          |  |
| Línea de investigación                                 | C.0.4.17. Flotación de Minerales   |
| Grupo de investigación                                 | No aplica  |
| Agencia de financiamiento                              | Sin Financiamiento.  |
| Ubicación geográfica de la investigación               | Universidad Nacional Mayor de San Marcos<br>Latitud: 12°03'30" S<br>Longitud: 77°05'00" O  |
| Año o rango de años en que se realizó la investigación | 2019 - 2021  |
| URL de disciplinas OCDE                                | Minería, Procesamiento de minerales<br><a href="https://purl.org/pe-repo/ocde/ford#2.07.05">https://purl.org/pe-repo/ocde/ford#2.07.05</a> |



«Año del Bicentenario del Perú: 200 años de Independencia»

**ACTA DE SUSTENTACIÓN DE TESIS MANCOMUNADA PARA OPTAR TÍTULO  
PROFESIONAL DE INGENIERO METALÚRGICO**

Mediante la plataforma virtual de Google Meet la Escuela Profesional de Ingeniería Metalúrgica de la Facultad de Ingeniería Geológica, Minera, Metalúrgica y Geográfica de la Universidad Nacional Mayor de San Marcos, el miércoles 10, del mes de Agosto del 2022 siendo las 20:03 horas, en presencia de los Señores Docentes designados como Miembros del Jurado Calificador:

|                                       |                     |
|---------------------------------------|---------------------|
| Mg. DANIEL FLORENCIO, Lovera Dávila   | <b>(PRESIDENTE)</b> |
| Ing. MANUEL PRUDENCIO, Caballero Rios | <b>(MIEMBRO)</b>    |
| Ing. JORGE LUIS, Ventosilla Shaw      | <b>(MIEMBRO)</b>    |

Reunidos virtualmente para el Acto Académico Público de la Sustentación de la TESIS MANCOMUNADA de Don: ERICK AGUSTIN OBREGÓN YAURICASA Bachiller en Ingeniería Metalúrgica, quien sustentó la Tesis Mancomunada Titulada: «**EVALUACIÓN DE LA TEMPERATURA QUE INFLUYE EN LA RECUPERACIÓN DE MOLIBDENO EN EL PROCESO DE FLOTACIÓN PARA UN CONCENTRADO BULK DEL DISTRITO DE ILABAYA**» para la obtención del Título Profesional de Ingeniero: **METALÚRGICO**.

Los miembros del Jurado Calificador, escuchada la sustentación respectiva, plantearon al graduando las observaciones pertinentes, que fueron absueltas a:

.....SATISFACCIÓN.....

El Jurado procedió a la calificación según el reglamento vigente, cuyo resultado fue la nota de:

.....CATORCE (14).....

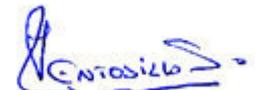
Habiendo concluido la Sustentación de la Tesis Mancomunada por el Jurado Calificador, el Miembro Presidente del Jurado, recomienda que la Facultad de Ingeniería Geológica, Minera, Metalúrgica y Geográfica, otorgue el **TÍTULO PROFESIONAL DE INGENIERO METALÚRGICO**, a Don: **Erick Agustín Obregón Yauricasa**.

Siendo las 21:30 horas, se dió por concluido el acto académico, expidiéndose cinco (5) Actas Originales de la Sustentación de Tesis.

Lima, 10 de agosto del 2022

  
Mg. DANIEL FLORENCIO LOVERA DÁVILA  
**Miembro Presidente**

  
Ing. MANUEL PRUDENCIO CABALLERO RIOS  
**Miembro**

  
Ing. JORGE LUIS VENTOSILLA SHAW  
**Miembro**



UNMSM

Firmado digitalmente por ORIHUELA  
SALAZAR Luis Alfredo FAU  
20148092282 soft  
Motivo: Soy el autor del documento  
Fecha: 22.08.2022 16:18:07 -05:00

Mg. LUIS ALFREDO ORIHUELA SALAZAR  
**DIRECTOR**  
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA METALÚRGICA

**Datos de la plataforma virtual institucional del acto de sustentación:**

<https://meet.google.com/yfz-ddhc-ado>

Grabación archivada en: [https://drive.google.com/file/d/1sgqxK08wPi7EuhQCpk\\_SDZIxK\\_aVA0Nd/view?usp=sharing](https://drive.google.com/file/d/1sgqxK08wPi7EuhQCpk_SDZIxK_aVA0Nd/view?usp=sharing)



«Año del Bicentenario del Perú: 200 años de Independencia»

**ACTA DE SUSTENTACIÓN DE TESIS MANCOMUNADA PARA OPTAR TÍTULO  
PROFESIONAL DE INGENIERO METALÚRGICO**

Mediante la plataforma virtual de Google Meet la Escuela Profesional de Ingeniería Metalúrgica de la Facultad de Ingeniería Geológica, Minera, Metalúrgica y Geográfica de la Universidad Nacional Mayor de San Marcos, el miércoles 10, del mes de Agosto del 2022 siendo las 20:03 horas, en presencia de los Señores Docentes designados como Miembros del Jurado Calificador:

|                                       |                     |
|---------------------------------------|---------------------|
| Mg. DANIEL FLORENCIO, Lovera Dávila   | <b>(PRESIDENTE)</b> |
| Ing. MANUEL PRUDENCIO, Caballero Rios | <b>(MIEMBRO)</b>    |
| Ing. JORGE LUIS, Ventosilla Shaw      | <b>(MIEMBRO)</b>    |

Reunidos virtualmente para el Acto Académico Público de la Sustentación de la TESIS MANCOMUNADA de Don: XAVIER KEVIN PEÑA LAVADO Bachiller en Ingeniería Metalúrgica, quien sustentó la Tesis Mancomunada Titulada: «**EVALUACIÓN DE LA TEMPERATURA QUE INFLUYE EN LA RECUPERACIÓN DE MOLIBDENO EN EL PROCESO DE FLOTACIÓN PARA UN CONCENTRADO BULK DEL DISTRITO DE ILABAYA**» para la obtención del Título Profesional de Ingeniero: **METALÚRGICO**.

Los miembros del Jurado Calificador, escuchada la sustentación respectiva, plantearon al graduando las observaciones pertinentes, que fueron absueltas a:

.....SATISFACCIÓN.....

El Jurado procedió a la calificación según el reglamento vigente, cuyo resultado fue la nota de:

.....CATORCE (14).....

Habiendo concluido la Sustentación de la Tesis Mancomunada por el Jurado Calificador, el Miembro Presidente del Jurado, recomienda que la Facultad de Ingeniería Geológica, Minera, Metalúrgica y Geográfica, otorgue el **TÍTULO PROFESIONAL DE INGENIERO METALÚRGICO**, a Don: **Xavier Kevin Peña Lavado**.

Siendo las 21:30 horas, se dió por concluido el acto académico, expidiéndose cinco (5) Actas Originales de la Sustentación de Tesis.

Lima, 10 de agosto del 2022

  
Mg. DANIEL FLORENCIO LOVERA DÁVILA  
**Miembro Presidente**

  
Ing. MANUEL PRUDENCIO CABALLERO RIOS  
**Miembro**

  
Ing. JORGE LUIS VENTOSILLA SHAW  
**Miembro**



Firmado digitalmente por ORIHUELA SALAZAR Luis Alfredo FAU  
20148092282 soft  
Motivo: Soy el autor del documento  
Fecha: 22.08.2022 16:17:12 -05:00

Mg. LUIS ALFREDO ORIHUELA SALAZAR  
**DIRECTOR**  
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA METALURGICA

**Datos de la plataforma virtual institucional del acto de sustentación:**

<https://meet.google.com/yfz-ddhc-ado>

Grabación archivada en: [https://drive.google.com/file/d/1sgqxK08wPi7EuhQCpk\\_SDZIxK\\_aVA0Nd/view?usp=sharing](https://drive.google.com/file/d/1sgqxK08wPi7EuhQCpk_SDZIxK_aVA0Nd/view?usp=sharing)



**Anexo 2**  
**Informe de Evaluación de Originalidad**

1. **FACULTAD**  
Ingeniería Geológica, Minera, Metalúrgica y Geográfica
2. **ESCUELA**  
Escuela Profesional de Ingeniería Metalúrgica
3. **AUTORIDAD ACÁDEMICA QUE EMITE EL INFORME DE ORIGINALIDAD**  
Director de E.P. de Ingeniería Metalúrgica
4. **APELLIDOS y NOMBRES DE LA AUTORIDAD ACADÉMICA**  
Mg. Luis Alfredo Orihuela Salazar.
5. **OPERADOR DEL PROGRAMA INFORMÁTICO DE SIMILITUDES**  
Sra. Carolina Betsabe Carreño Ríos
6. **DOCUMENTO EVALUADO:**  
Tesis mancomunada para optar el Título Profesional de Ingeniero Metalúrgico, titulada: «EVALUACIÓN DE LA TEMPERATURA QUE INFLUYE EN LA RECUPERACIÓN DE MOLIBDENO EN EL PROCESO DE FLOTACIÓN PARA UN CONCENTRADO BULK DEL DISTRITO DE ILABAYA»
7. **AUTOR DEL DOCUMENTO:**  
Bach. Erick Agustin Obregón Yauricasa
8. **FECHA DE RECEPCIÓN DEL DOCUMENTO EN LA DIRECCIÓN EP:**  
23/06/2021
9. **FECHA DE APLICACIÓN DEL PROGRAMA INFORMÁTICO DE SIMILITUDES:**  
14/07/2021
10. **SOFTWARE UTILIZADO**  
Turnitin
11. **CONFIGURACIÓN DEL PROGRAMA DETECTOR DE SIMILITUDES**
  - ✓ Excluye textos entrecorridos
  - ✓ Excluye fuentes para buscar similitud
  - ✓ Excluye Bibliografía
  - ✓ Excluye cadenas menores a 40 palabras
12. **PORCENTAJE DE SIMILITUDES SEGÚN PROGRAMA DETECTOR DE SIMILITUDES (7%)**
13. **FUENTES ORIGINALES DE LAS SIMILITUDES ENCONTRADAS**

|                           |     |
|---------------------------|-----|
| ✓ cybertesis.unmsm.edu.pe | 2%  |
| ✓ www.minen.gob.pe        | 1%  |
| ✓ repositorio.unsa.edu.pe | 1%  |
| ✓ www.coursehero.com      | 1%  |
| ✓ es.scribd.com           | <1% |
| ✓ docshare.tips           | <1% |
| ✓ www.slideshare.net      | <1% |
| ✓ bibdigital.epn.edu.ec   | <1% |
| ✓ poquetacosa.blogia.com  | <1% |
14. **OBSERVACIONES**  
Ninguna
15. **CALIFICACIÓN DE ORIGINALIDAD**  
Documento cumple criterios de originalidad, sin observaciones
16. **FECHA DEL INFORME**  
Lima, 15 de julio de 2021



Firmado digitalmente por ORIHUELA  
SALAZAR Luis Alfredo FAU  
20148092282 soft  
Motivo: Soy el autor del documento  
Fecha: 15.07.2021 11:00:13 -05:00

**Mg. LUIS ALFREDO ORIHUELA SALAZAR**  
**DIRECTOR**  
*ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA METALURGICA*



**Anexo 2**  
**Informe de Evaluación de Originalidad**

- 1. FACULTAD**  
Ingeniería Geológica, Minera, Metalúrgica y Geográfica
- 2. ESCUELA**  
Escuela Profesional de Ingeniería Metalúrgica
- 3. AUTORIDAD ACÁDEMICA QUE EMITE EL INFORME DE ORIGINALIDAD**  
Director de E.P. de Ingeniería Metalúrgica
- 4. APELLIDOS y NOMBRES DE LA AUTORIDAD ACADÉMICA**  
Mg. Luis Alfredo Orihuela Salazar.
- 5. OPERADOR DEL PROGRAMA INFORMÁTICO DE SIMILITUDES**  
Sra. Carolina Betsabe Carreño Ríos
- 6. DOCUMENTO EVALUADO:**  
Tesis mancomunada para optar el Título Profesional de Ingeniero Metalúrgico, titulada: «EVALUACIÓN DE LA TEMPERATURA QUE INFLUYE EN LA RECUPERACIÓN DE MOLIBDENO EN EL PROCESO DE FLOTACIÓN PARA UN CONCENTRADO BULK DEL DISTRITO DE ILABAYA»
- 7. AUTOR DEL DOCUMENTO:**  
Bach. Xavier Kevin Peña Lavado
- 8. FECHA DE RECEPCIÓN DEL DOCUMENTO EN LA DIRECCIÓN EP:**  
23/06/2021
- 9. FECHA DE APLICACIÓN DEL PROGRAMA INFORMÁTICO DE SIMILITUDES:**  
14/07/2021
- 10. SOFTWARE UTILIZADO**  
Turnitin
- 11. CONFIGURACIÓN DEL PROGRAMA DETECTOR DE SIMILITUDES**
  - ✓ Excluye textos entrecorridos
  - ✓ Excluye fuentes para buscar similitud
  - ✓ Excluye Bibliografía
  - ✓ Excluye cadenas menores a 40 palabras
- 12. PORCENTAJE DE SIMILITUDES SEGÚN PROGRAMA DETECTOR DE SIMILITUDES (7%)**
- 13. FUENTES ORIGINALES DE LAS SIMILITUDES ENCONTRADAS**

|                           |     |
|---------------------------|-----|
| ✓ cybertesis.unmsm.edu.pe | 2%  |
| ✓ www.minen.gob.pe        | 1%  |
| ✓ repositorio.unsa.edu.pe | 1%  |
| ✓ www.coursehero.com      | 1%  |
| ✓ es.scribd.com           | <1% |
| ✓ docshare.tips           | <1% |
| ✓ www.slideshare.net      | <1% |
| ✓ bibdigital.epn.edu.ec   | <1% |
| ✓ poquetacosa.blogia.com  | <1% |
- 14. OBSERVACIONES**  
Ninguna
- 15. CALIFICACIÓN DE ORIGINALIDAD**  
Documento cumple criterios de originalidad, sin observaciones
- 16. FECHA DEL INFORME**  
Lima, 15 de julio de 2021



Firmado digitalmente por ORIHUELA  
SALAZAR, Luis Alfredo FAU  
20148092282 soft  
Motivo: Soy el autor del documento  
Fecha: 15.07.2021 10:59:07 -05:00

**Mg. LUIS ALFREDO ORIHUELA SALAZAR**  
**DIRECTOR**  
*ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA METALURGICA*

## TABLA DE CONTENIDO

|   |    |
|---|----|
| CAPÍTULO I. INTRODUCCIÓN .....                    | 16 |
| CAPÍTULO II. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA .....     | 17 |
| 2.1 Descripción del problema .....                | 17 |
| 2.2 El problema fundamental.....                  | 17 |
| 2.3 Justificación de la investigación.....        | 17 |
| 2.4 Justificación tecnológica.....                | 17 |
| 2.5 Objetivos .....                               | 18 |
| 2.5.1 Objetivo general .....                      | 18 |
| 2.5.2 Objetivos específicos .....                 | 18 |
| 2.6 Hipótesis y variables .....                   | 18 |
| 2.6.1 Hipótesis general .....                     | 18 |
| 2.6.2 Hipótesis específicas .....                 | 18 |
| 2.7 Identificación de variables .....             | 19 |
| CAPÍTULO III. MARCO TEÓRICO.....                  | 22 |
| 3.1 Antecedentes .....                            | 22 |
| 3.2 Estudio del molibdeno .....                   | 23 |
| 3.2.1 El papel del molibdeno en la historia.....  | 23 |
| • El molibdeno en la naturaleza .....             | 25 |
| • Depósitos tipo pórfido .....                    | 25 |
| • Depósitos tipo pórfido de molibdeno .....       | 26 |
| • Depósitos tipo pórfido de cobre .....           | 27 |
| • Depósitos tipo pórfido de cobre-molibdeno ..... | 28 |
| • Depósitos de contacto metamórfico .....         | 28 |
| • Depósitos de venas fisuradas .....              | 29 |

|  |    |
|--|----|
| • Pegmatita y diques de aplita .....                               | 29 |
| • Depósitos incrustados en rocas sedimentarias.....                | 30 |
| 3.2.3 Principales minerales de molibdeno .....                     | 30 |
| • Ferrimolibdita .....   | 31 |
| • Ilsemanita .....   | 31 |
| • Jordisita .....  | 32 |
| • Koechlinita .....  | 32 |
| • Lindgrenita .....  | 32 |
| • Molibdenita .....  | 32 |
| • Molibdita .....  | 33 |
| • Mourita.....   | 33 |
| • Powellita .....  | 33 |
| • Chilliagita .....  | 34 |
| • Umohoíta .....   | 34 |
| • Wulfenita.....   | 34 |
| 3.2.4 Propiedades físicas del molibdeno .....                      | 34 |
| 3.2.5 Propiedades químicas del molibdeno .....                     | 36 |
| 3.2.6 Propiedades mecánicas del molibdeno.....                     | 36 |
| 3.2.7 Utilidades del molibdeno.....                                | 36 |
| 3.2.7.1 Efectos del molibdeno en el acero.....                     | 37 |
| 3.2.7.2 Aceros de ingeniería .....                                 | 37 |
| 3.2.7.3 Aceros resistentes a la corrosión.....                     | 38 |
| 3.2.7.4 Aceros para servicios de alta temperatura.....             | 39 |
| 3.2.7.5 Aceros para herramientas .....                             | 39 |
| 3.2.7.6 Aceros de alta resistencia, baja aleación y fase dual..... | 40 |
| 3.2.7.7 Molibdeno en hierro fundido .....                          | 40 |
| 3.2.7.8 Industria eléctrica y electrónica .....                    | 41 |
| 3.2.7.9 Disulfuro de molibdeno .....                               | 41 |
| 3.2.7.10 Usos misceláneos .....                                    | 42 |

|        |  |    |
|--------|--|----|
| 3.3    | Producción nacional de concentrado de molibdeno .....              | 43 |
| 3.3.1  | Producción nacional de concentrado de molibdeno por regiones ..... | 43 |
| 3.3.2  | Producción nacional de concentrado de molibdeno por compañía....   | 45 |
| 3.3.3  | Exportaciones.....   | 48 |
| 3.3.4  | Cotización del molibdeno.....                                      | 50 |
| 3.4    | Flotación del molibdeno .....                                      | 52 |
| 3.4.1  | Conceptos generales.....   | 52 |
| 3.4.2  | Diseño conceptual .....  | 52 |
| 3.4.3  | Química del proceso.....   | 53 |
| 3.4.4  | Cinética del proceso .....   | 53 |
| 3.4.5  | Modelo de Agar y Barret.....                                       | 53 |
| 3.4.6  | Generalidades en la flotación de molibdenita.....                  | 54 |
| 3.4.7  | Recuperación primaria de molibdeno.....                            | 55 |
| 3.4.8  | Procedimientos especiales .....                                    | 56 |
| 3.4.9  | Estructura y flotabilidad natural.....                             | 56 |
| 3.4.10 | Separación en pórfidos de cobre-molibdeno .....                    | 58 |
| 3.4.11 | Métodos principales de separación .....                            | 60 |
|        | CAPÍTULO IV. METODOLOGÍA Y CARACTERIZACIÓN .....                   | 64 |
| 4.1    | Tipo y diseño de investigación .....                               | 64 |
| 4.2    | Unidad de análisis.....  | 64 |
| 4.3    | Población de estudio.....  | 65 |
| 4.4    | Tamaño de muestra .....  | 65 |
| 4.5    | Selección de muestra.....  | 65 |
| 4.6    | Procedimiento metodológico de la investigación .....               | 65 |
| 4.7    | Análisis químico de la investigación .....                         | 66 |

|       |  |    |
|-------|--|----|
| 4.8   | Análisis mineralógico de la investigación .....                                      | 66 |
| 4.9   | Distribución volumétrica porcentual .....  | 67 |
| 4.10  | Grados de liberación .....   | 68 |
| 4.11  | Interpretación de los grados de liberación de los principales minerales              | 69 |
|       | CAPÍTULO V. PRUEBAS EXPERIMENTALES .....   | 70 |
| 5.1   | Pruebas de flotación del concentrado bulk .....                                      | 70 |
| 5.2   | Condiciones de la prueba.....  | 70 |
| 5.3   | Resultados de la flotación para una temperatura de 23 °C .....                       | 71 |
| 5.4   | Resultados de la flotación para una temperatura de 40 °C .....                       | 71 |
| 5.5   | Resultados de la flotación para una temperatura de 55 °C .....                       | 72 |
| 5.6   | Resultados de la flotación para una temperatura de 70 °C .....                       | 73 |
| 5.7   | Resultados obtenidos y estimados mediante “Agar y Barret” .....                      | 73 |
| 5.7.1 | Resultados obtenidos y estimados a 23° C .....                                       | 73 |
| 5.7.2 | Resultados obtenidos y estimados a 40 °C .....                                       | 75 |
| 5.7.3 | Resultados obtenidos y estimados a 55 °C .....                                       | 76 |
| 5.7.4 | Resultados obtenidos y estimados a 70 °C .....                                       | 77 |
| 5.8   | Análisis de regresión con el uso del asistente de Minitab .....                      | 79 |
| 5.9   | Respuesta de optimización para las recuperaciones de molibdeno, hierro y cobre ..... | 81 |
|       | CAPÍTULO VI. INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS OBTENIDOS .....                            | 83 |
|       | CAPÍTULO VII. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES .....                                   | 89 |
| 7.1   | Conclusiones .....   | 89 |
| 7.2   | Recomendaciones .....  | 91 |
|       | CAPÍTULO VIII. REFERENCIAS.....  | 92 |
|       | CAPÍTULO IX. ANEXOS .....  | 94 |

## LISTA DE TABLAS

|   |    |
|---|----|
| Tabla 1. Operacionalización de variables .....  | 19 |
| Tabla 2. Matriz de consistencia.....  | 20 |
| Tabla 3. Coordenadas geográficas.....   | 23 |
| Tabla 4. Límites de la provincia de Jorge Basadre .....   | 24 |
| Tabla 5. Principales minerales de molibdeno .....   | 31 |
| Tabla 6. Propiedades de la molibdenita.....   | 33 |
| Tabla 7. Propiedad y valor.....   | 35 |
| Tabla 8. Principales usos del molibdeno .....   | 37 |
| Tabla 9. %Mo para aceros en herramientas con distintos fines .....  | 40 |
| Tabla 10. Producción nacional de concentrado de molibdeno por regiones.....   | 44 |
| Tabla 11. Producción nacional de concentrado de molibdeno por empresa .....   | 47 |
| Tabla 12. Producción mundial de molibdeno por país .....  | 49 |
| Tabla 13. Exportaciones del molibdeno por año .....   | 51 |
| Tabla 14. Composición de los concentrados cleaner de operaciones seleccionadas<br>.....   | 54 |
| Tabla 15. Principales depresores de sulfuros de Cu y Fe.....  | 55 |
| Tabla 16. Efecto del tipo de combustible en el grado y recuperación rougher de<br>molibdeno para adiciones de 80 g/t de combustible ..... | 59 |
| Tabla 17. Análisis químico de cabeza general de flotación.....  | 66 |
| Tabla 18. Análisis mineralógico del concentrado final.....  | 67 |
| Tabla 19. Distribución porcentual mineralógica .....  | 68 |
| Tabla 20. Grados de liberación.....   | 68 |
| Tabla 21. Condiciones de la prueba de flotación .....   | 70 |
| Tabla 22. Balance metalúrgico de flotación para una temperatura de 23 °C.....   | 71 |
| Tabla 23. Resumen de resultados obtenidos 1. <sup>a</sup> prueba .....  | 71 |
| Tabla 24. Balance metalúrgico de flotación para una temperatura de 40 °C.....   | 71 |
| Tabla 25. Resumen de resultados obtenidos 2. <sup>a</sup> prueba.....   | 72 |
| Tabla 26. Balance metalúrgico de flotación para una temperatura de 55 °C.....   | 72 |
| Tabla 27. Resumen de resultados obtenidos 3. <sup>a</sup> prueba.....   | 72 |
| Tabla 28. Balance metalúrgico de flotación para una temperatura de 70 °C.....   | 73 |
| Tabla 29. Resumen de resultados obtenidos 4. <sup>a</sup> prueba .....  | 73 |

|   |    |
|---|----|
| Tabla 30. Recuperación real y estimada de Mo a 23 °C .....  | 73 |
| Tabla 31. Resumen de datos usados para la recuperación estimada por “Agar y Barret” a 23 °C ..... | 75 |
| Tabla 32. Recuperación real y estimada de Mo a 40 °C .....  | 75 |
| Tabla 33. Resumen de datos usados para la recuperación estimada por “Agar y Barret” a 40 °C ..... | 76 |
| Tabla 34. Recuperación real y estimada de Mo a 55 °C .....  | 76 |
| Tabla 35. Resumen de datos usados para la recuperación estimada por “Agar y Barret” a 55 °C ..... | 77 |
| Tabla 36. Recuperación real y estimada de Mo a 70 °C .....  | 77 |
| Tabla 37. Resumen de datos usados para la recuperación estimada por “Agar y Barret” a 70 °C ..... | 78 |
| Tabla 38. Resumen del modelo.....   | 80 |
| Tabla 39. Parámetros para la optimización de recuperaciones Mo, Fe y Cu.....                      | 81 |
| Tabla 40. Solución para la optimización de recuperaciones Mo, Fe y Cu .....                       | 82 |
| Tabla 41. Predicción de respuesta múltiple .....  | 82 |
| Tabla 42. Resumen de datos obtenidos en balances metalúrgicos .....                               | 83 |
| Tabla 43. Resumen de errores totales por el método Agar y Barret (Recup. Real vs. estimada).....  | 83 |
| Tabla 44. Resumen de recuperaciones para cada prueba .....  | 86 |
| Tabla 45. Predominancia de HS- vs. H <sub>2</sub> S .....   | 88 |

## LISTA DE FIGURAS

|   |    |
|---|----|
| Figura 1. Diagrama general de los procesos involucrados en la investigación.....                                | 21 |
| Figura 2. Ubicación de los principales de depósitos pórfidos de molibdeno .....                                 | 27 |
| Figura 3. Comparación de paneles tipo 304 (0 % Mo) y 316 (2-3 % Mo) luego de 56 años de exposición marina ..... | 38 |
| Figura 4. Producción anual de concentrado de molibdeno por regiones (%) .....                                   | 45 |
| Figura 5. Producción nacional de concentrado de molibdeno por año (2010-2019) .....                             | 45 |
| Figura 6. Producción nacional de concentrado de molibdeno por empresa (%)....                                   | 47 |
| Figura 7. Destino de las exportaciones nacionales de concentrado de molibdeno                                   | 48 |
| Figura 8. Evolución anual de las exportaciones de molibdeno y su cotización.....                                | 51 |
| Figura 9. Ejemplo de asociación de mineral .....  | 52 |
| Figura 10. Diseño conceptual del proceso.....   | 53 |
| Figura 11. Fotografía de las burbujas de molibdeno en su recuperación primaria                                  | 56 |
| Figura 12. Estructura cristalina de la molibdenita con sus caras hidrofóbicas y bordes hidrofílicos.....        | 57 |
| Figura 13. Flotabilidad de molibdenita a diferentes tamaños en función del pH                                   | 58 |
| Figura 14. Determinación de P-Valor .....   | 79 |
| Figura 15. Determinación del R-cuad .....   | 79 |
| Figura 16. Gráfica de línea ajustada.....   | 80 |
| Figura 17. Gráfica de predicción Recuperación vs. Temperatura .....   | 81 |
| Figura 18. Gráfico de optimización .....  | 82 |
| Figura 19. Recuperación real vs. estimada de Mo (23 °C).....  | 84 |
| Figura 20. Recuperación real vs. estimada de Mo (40 °C).....  | 84 |
| Figura 21. Recuperación real vs. estimada de Mo (55 °C).....  | 85 |
| Figura 22. Recuperación real vs. estimada de Mo (70 °C).....  | 85 |
| Figura 23. Relación temperatura vs. Recuperación .....  | 86 |
| Figura 24. Gráfica de línea ajustada.....   | 87 |
| Figura 25. Curva de optimización para la recuperación de molibdeno a 50.53 °C.                                  | 87 |



## LISTA DE ANEXOS

|  |    |
|--|----|
| Anexo 1. Medición de ORP .....                           | 95 |
| Anexo 2. Flotación en laboratorio .....                  | 96 |
| Anexo 3. Planta de Molibdeno.....                        | 97 |
| Anexo 4. Reporte de laboratorio de caracterización ..... | 98 |
| Anexo 5. Ficha de seguridad del NaSH.....                | 99 |

## **DEDICATORIA**

Para empezar, dedico esta tesis a Dios, por estar siempre a mi lado, principalmente en los momentos difíciles. A mis padres, Jaime Obregón y Edhit Yauricasa, y mis hermanos, que siempre me apoyaron para cumplir mis metas. A mi novia, por acompañarme en este difícil camino. A mi hija, por ser mi mayor motivación y a mis abuelos que en paz descansan, Agustín Obregón y Alejandrina Ramírez, quienes ayudaron a forjar parte de la persona que soy en este momento.

## **DEDICATORIA**

En primer lugar, dedico esta tesis a mis padres, Marcelina y Javier, quienes han sido el pilar fundamental de mi formación académica y mi principal motivación para salir adelante. En segundo lugar, a mi abuela Amanda, quien siempre me motivó a seguir el camino del estudio. Finalmente, a mis amigos y compañeros, quienes me tuvieron paciencia y acompañaron mi recorrido en todo momento.

## **AGRADECIMIENTO**

En un primer momento, damos gracias a Dios por habernos guiado por el camino correcto en todo momento en la realización del presente estudio, y nuestra alma máter, la Universidad Nacional Mayor de San Marcos y su Escuela Profesional de Ingeniería Metalúrgica, por nuestra formación como académicos y profesionales. De igual forma, queremos manifestar nuestro agradecimiento al doctor Vidal Sixto Aramburú Rojas, profesor y asesor, por su dedicación y la ayuda brindada en la realización de esta investigación, por respetar nuestros aportes e ideas; además de la dirección y rigurosidad manifestada. Gracias por confiar en nosotros desde el momento en el que iniciamos en esta facultad. Nuestro reconocimiento a cada docente de la facultad, por sus sugerencias, por hacer realidad esta tesis de pregrado.

## RESUMEN

Esta tesis se realizó a partir de un estudio investigativo y de mejora, el cual se compone de una muestra de concentrado *bulk* cobre-molibdeno (Cu-Mo) proveniente de un yacimiento porfídico de la región sur de Perú. La ley promedio de cobre (Cu) es 0.6 % y la de molibdeno (Mo) es 0.022 %.

La caracterización de la muestra del concentrado obtenido en las pruebas realizadas se logró con el apoyo del área de Laboratorio Químico. Los resultados señalaron que las siguientes especies mineralógicas se encuentran presentes: calcopirita, calcosita, bornita (referidos a sulfuros de cobre), realgar y arsenopirita, como otros sulfuros. Además, también contiene pirita y molibdenita.

Con los resultados de la caracterización, se tiene conocimiento qué mineral se procesa y se da un enfoque especial a la molibdenita, cuya flotabilidad natural rige el proceso de flotación que se desarrolla. En ella, se emplea un sistema de calentamiento indirecto para aumentar la temperatura de la pulpa y evaluar la influencia de esta variable en la recuperación del Mo.

Se llevaron a cabo cuatro pruebas metalúrgicas de flotación, realizadas con temperaturas variadas, en las que se mantenían constantes las variables de adición de NaSH, potencial de hidrógeno (pH) y potencial de oxidación-reducción (ORP) para un tiempo de flotación de ocho minutos. La adición de NaSH se mantuvo en 6.3 ml; el pH de la pulpa, en un promedio de 9.03 y los ORP, en un valor promedio de -469.75 mv. La primera prueba se realizó a 23 °C, tomada como temperatura ambiente, y se obtuvo una recuperación de 96.38 %.

La segunda prueba, realizada a 40 °C, dio como resultado una recuperación del 97.15 %. La tercera prueba se llevó a cabo a 55 °C y el valor de la recuperación fue 96.77 %. La última prueba, ejecutada a 70 °C, dio una recuperación de 96.46 %.

Con los datos obtenidos, se hizo un análisis con las herramientas Excel y Minitab, en el cual se determinó que el proceso adecuado, según los resultados a los que se llegó, fue realizar una flotación a 50.53 °C, para obtener una recuperación del 97.01 %.

**NOMENCLATURA**

|                   |                            |
|-------------------|----------------------------|
| Ppm               | Partes por millón          |
| %                 | Porcentaje                 |
| cm <sup>2</sup>   | Centímetro cuadrado        |
| cm <sup>3</sup>   | Centímetro cúbico          |
| m <sup>3</sup> /h | Metros cúbicos por hora    |
| °C                | Grados Celsius             |
| Eh                | Potencial rédox            |
| g                 | Gramo                      |
| g/l               | Gramo por litro            |
| g/TM              | Gramo por tonelada métrica |
| Hrs               | Horas                      |
| kg                | Kilogramo                  |
| kg/h              | Kilogramos por hora        |
| m                 | Metro                      |
| min               | Minuto                     |
| ml                | Mililitro                  |
| mm                | Milímetro                  |
| mv                | Milivoltios                |
| pH                | Potencial de hidrógeno     |
| t/h               | Toneladas por hora         |
| TM                | Toneladas métricas         |

## CAPÍTULO I. INTRODUCCIÓN

La industria minerometalúrgica peruana se caracteriza por la extracción de minerales variados, los cuales son de gran importancia para el desarrollo económico del país. Dentro del territorio de Perú, principalmente en la zona sur, se encuentran yacimientos porfídicos de los que se extrae Cu como principal producto y Mo como subproducto. Este último ha sido de gran interés a través de los años debido a su demanda en la producción de aceros aleados y sus aplicaciones químicas, como catalizadores, pigmentos, inhibidores de corrosión y lubricantes.

Durante el 2019, China se mantuvo como el principal productor de Mo, con un crecimiento del 2 % por año. Por su parte, la producción de Chile, que es el segundo productor más grande de Mo a nivel mundial, disminuyó un 10 %. El aumento de producción en Estados Unidos, Perú y México, quienes son los siguientes tres productores más grandes, compensó la caída de Chile durante ese año (Roskill, 2020).

En muchas mineras productoras de Cu en Perú, la pulpa resultante de la flotación *bulk* (Cu-Mo) atraviesa un proceso en donde se deprime el Cu y se flota el Mo para aprovechar las propiedades de flotabilidad natural de este último. La pulpa de Cu pasa por un proceso de espesamiento y filtrado para obtener su concentrado, mientras que la pulpa rica en Mo pasa por un proceso de flotación, limpieza, espesamiento, filtrado y envasado en la planta de Mo para obtener un concentrado comercialmente aceptable.

En muchas plantas operativas de Mo, la pulpa obtenida de la flotación diferencial es sometida a procesos de limpieza y calentamiento de pulpa indirecto a partir de distintos equipos; puesto que es conocido el efecto de la temperatura en la pulpa, la cual permite disociar los colectores añadidos en etapas previas de la superficie del mineral. Por este motivo; la presente investigación hace posible evaluar la influencia que manifiesta la temperatura cuando se recupera Mo en el procedimiento de flotación para un concentrado *bulk* del distrito de Ilabaya, Tacna.

## **CAPÍTULO II. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA**

### **2.1 Descripción del problema**

En la flotación de Mo, se trata el concentrado *bulk* Cu-Mo con presencia de molibdenita, mediante el proceso de flotación en celdas mecánicas y celdas columnas, para luego pasar por un proceso de espesamiento, filtrado y envasado de concentrado. En algunos casos, la presencia de colectores provenientes de etapas previas en el proceso, insolubles y otros minerales no deseados (arsenopirita y realgar) dificultan el proceso de flotación. De esta manera, esta investigación surge a partir de la pertinencia que tiene evaluar el influjo que presenta la temperatura en la recuperación de Mo durante el procedimiento de flotación para un concentrado *bulk* del distrito de Ilabaya, Tacna.

### **2.2 El problema fundamental**

La problemática principal de la presente tesis se enfoca en evaluar el proceso de flotación y su acondicionamiento previo con un calentamiento para determinar su influencia en la mejora de la recuperación de Mo; de ahí la necesidad de realizar el trabajo de investigación para determinar la influencia de la variable temperatura.

### **2.3 Justificación de la investigación**

El estudio de investigación de la presente tesis se justifica al aplicar el procedimiento metalúrgico de flotación y acondicionamiento previo por calentamiento, con el objeto de evaluar la influencia de la temperatura en la recuperación de Mo para un concentrado *bulk* Cu-Mo. Además, se tiene en cuenta el aspecto medioambiental en el manejo del NaSH al aplicar las normas determinadas por el estado.

### **2.4 Justificación tecnológica**

El estudio a realizar encuentra una justificación al nivel tecnológico, puesto que, a partir de la evaluación de la influencia de la temperatura en el procedimiento de

flotación, se logra recuperar el Mo. Este proceso tecnológico sería apropiado para emplearse en otras empresas de gran minería Cu-Mo.

Debido a lo expuesto, se presenta una demostración donde se evalúa la influencia de la temperatura en la recuperación de Mo durante el procedimiento de flotación para un concentrado *bulk* del distrito de Ilabaya; como consecuencia, a partir de dicho enfoque investigativo, se justifica la ejecución del proyecto.

## **2.5 Objetivos**

Para el desarrollo de la presente tesis, se plantearon los objetivos que se enuncian a continuación:

### **2.5.1 Objetivo general**

Evaluar el efecto de la temperatura en el proceso de flotación que influye en la recuperación del Mo para un mineral sulfurado de la zona de Ilabaya, Tacna.

### **2.5.2 Objetivos específicos**

- Preparar y acondicionar el concentrado bulk Cu-Mo para las pruebas de flotación.
- Valorar la influencia de la temperatura en la mejora de la recuperación de Mo durante el proceso de flotación.

## **2.6 Hipótesis y variables**

### **2.6.1 Hipótesis general**

La temperatura influirá en la recuperación de Mo durante el proceso de flotación para un concentrado bulk Cu-Mo, en la zona de Ilabaya, Tacna.

### **2.6.2 Hipótesis específicas**

- El procedimiento adecuado de acondicionamiento por calentamiento de la pulpa influirá en la recuperación del Mo.

- La variación adecuada de la temperatura también influirá en la recuperación del Mo.

## 2.7 Identificación de variables

Las variables que se consideran durante el proceso de flotación de Mo son las siguientes:

Variable dependiente (y).

- Recuperación de Mo.

Variable independiente.

- Temperatura de pulpa.

Variables constantes.

- Consumo de NaSH.
- pH.
- ORP.

Operacionalización de variables.

Con la intención de llevar a cabo el procesamiento e identificación de las variables presentes en el procedimiento, se aplicaron balances metalúrgicos para cada una de las pruebas realizadas. La finalidad fue valorar, comprender y potenciar los vínculos existentes entre las variable independiente y dependiente en la presente investigación.

Tabla 1. Operacionalización de variables

| <b>Variable dependiente</b>   | <b>Dimensiones</b>                    | <b>Indicadores</b> | <b>Métodos</b>                                 |
|-------------------------------|---------------------------------------|--------------------|--|
| <b>Recuperación de Mo</b>     | Proporción de Mo recuperado del total | Porcentaje         | Balance metalúrgico                            |
| <b>Variable independiente</b> | <b>Dimensiones</b>                    | <b>Indicadores</b> | <b>Método</b>                                  |
| <b>Temperatura de pulpa</b>   | Calor medible                         | °C                 | Toma de temperatura con termómetro electrónico |
| <b>Variables constantes</b>   | <b>Dimensiones</b>                    | <b>Indicadores</b> | <b>Método</b>                                  |
| <b>pH</b>                     | Potencial de Hidrógeno                | Ácido/básico       | Medidor de pH                                  |
| <b>ORP</b>                    | Potencial Redox                       | Mv                 | Medidor de ORP                                 |

|                        |         |    |                     |
|------------------------|---------|----|---------------------|
| <b>Consumo de NaSH</b> | Volumen | ml | Medición en jeringa |
|------------------------|---------|----|---------------------|

Tabla 2. Matriz de consistencia

| <b>Estrategia para aumentar la recuperación del concentrado de Molibdenita aumentando la temperatura del concentrado Bulk</b> |  |  |  |   |
|---|--|--|--|---|
| <b>Problema</b>   | <b>Objetivo</b>  | <b>Hipótesis</b>   | <b>Variable</b>  | <b>Indicadores</b>  |
| General   | General  | General  | Independiente  |   |
| ¿Cómo podemos aumentar la recuperación de Molibdenita del concentrado Bulk?   | Evaluar el efecto de la temperatura en el proceso de flotación que influye en la recuperación del Mo para un concentrado bulk Cu-Mo de la zona de Ilabaya, Tacna.                  | La temperatura influirá en la recuperación de Mo durante el proceso de flotación para un concentrado bulk Cu-Mo, en la zona de Ilabaya, Tacna.   | Temperatura de pulpa<br>Dependiente<br>Recuperación de Molibdenita | % de recuperación   |
| Específico  | Específico   | Específico   | Independiente  |   |
| ¿Cuál es el procedimiento a seguir para poder aumentar la recuperación de Molibdenita en el proceso de flotación?             | Preparar y acondicionar el concentrado bulk Cu-Mo para las pruebas de flotación, Valorar la influencia de la temperatura en la recuperación de Mo durante el proceso de flotación. | El procedimiento adecuado de acondicionamiento por calentamiento de la pulpa influirá en la recuperación del Mo, la variación adecuada de la temperatura también influirá en la recuperación del Mo. | Temperatura de pulpa<br>Dependiente<br>Recuperación de Molibdenita | % de recuperación con respecto a las diferentes temperaturas de flotación |

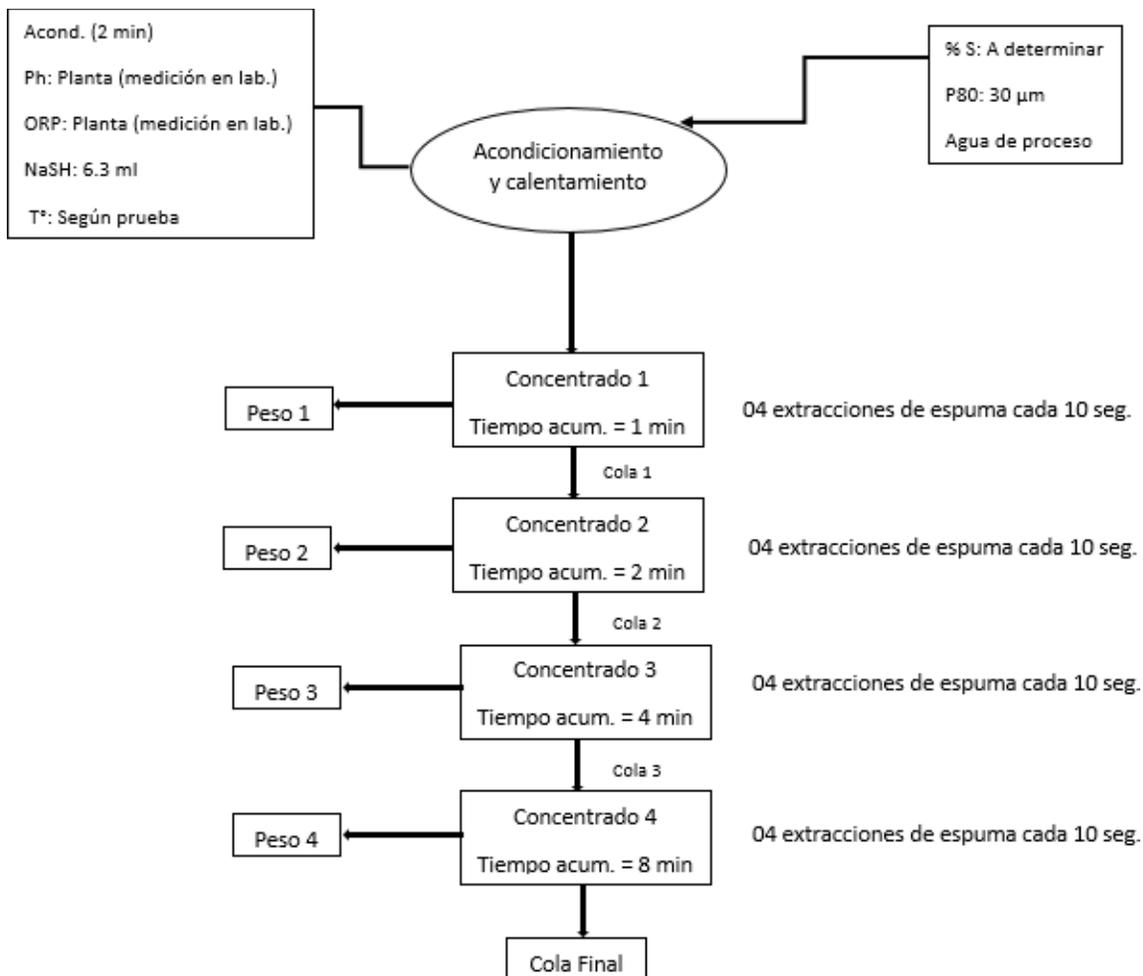


Figura 1. Diagrama general de los procesos involucrados en la investigación

Nota: las muestras Peso 1, Peso 2, Peso 3, Peso 4 y Cola final pasan a las etapas de filtrado, secado y pesado. Luego, junto con la muestra de la cabeza general de flotación, se embolsan y se envían al Laboratorio Químico para los ensayos respectivos.

Fuente: elaboración propia

## CAPÍTULO III. MARCO TEÓRICO

### 3.1 Antecedentes

El estudio de Sutulov (1965), en su libro *Metalurgia extractiva del molibdeno*, mencionó las plantas operativas existentes que producen Mo como producto secundario. En la mayoría de las plantas mencionadas, se realizó un espesamiento previo al proceso de concentración, necesario no solo para disminuir el contenido de agua, sino para eliminar el exceso de reactivos provenientes del concentrado de Cu en las etapas previas de *rougher*, *scavengery cleaner*.

En algunas operaciones, se encontró que un tratamiento de calor ayuda a la depresión de Cu, que sucede por la destrucción de los reactivos residuales de las etapas previas de flotación, operación necesaria para la concentración de Mo. Esta se lleva a cabo al introducir calor vivo dentro de la pulpa bajo presión o al usar calentamiento indirecto mediante intercambiadores de calor, según las condiciones. Si el calentamiento no es suficiente para la destrucción efectiva de reactivos de flotación, se puede emplear la tostación como método complementario.

En las operaciones de Mission en Estados Unidos, la tostación es usada como proceso de mejora en la concentración de Mo, luego de la eliminación del Cu al usar sulfuro de sodio y depresores de hidrosulfuro; el concentrado *rougher* es espesado, filtrado y tostado para ser acondicionado con aceite de combustible o pino y reflatado ocho veces para obtener un producto de alto grado.

En las operaciones de Bagdad, también en Estados Unidos, el calentamiento se da mediante un “cocinado” de concentrado previo a la recuperación de molibdenita. Este concentrado es espesado y acondicionado con ácido sulfúrico a un pH de 5.5, para ser calentado a una temperatura justo por debajo del punto de ebullición. De esta manera, se consigue la destrucción completa de los xantatos usados en las etapas de flotación previas.

En muchas plantas de Rusia, el calentamiento de los concentrados *bulk* Cu-Mo reduce de manera notable el consumo de sulfuro de sodio, puesto que, a temperaturas altas, la concentración de oxígeno en la pulpa se reduce, lo que disminuye la descomposición de sulfuro de sodio y ayuda a la desorción de reactivos de flotación usados en etapas previas (Sutulov, 1965).

Por otra parte, es pertinente mencionar que el distrito de Ilabaya se ubica en el departamento de Tacna, la provincia de Jorge Basadre. En este sentido, se localiza en la región sur del país, a 135.6 km de Tacna, y está dada por las siguientes coordenadas geográficas (ver Tabla 2).

Tabla 3. Coordenadas geográficas

| Coordenadas    | Valor   |
|----------------|---------|
| Latitud sur    | 17° 23' |
| Longitud oeste | 70° 32' |

Fuente: (Municipalidad de Ilabaya, 2019)

La provincia de Jorge Basadre tiene los siguientes límites:

Tabla 4. Límites de la provincia de Jorge Basadre

| Orientación | Lugar   |
|-------------|---|
| Norte       | Región Moquegua y distritos de Camilaca, Cairani y Huanuara |
| Sur         | Distrito Curibaya   |
| Este        | Distrito Inclán y Locumba                                   |
| Oeste       | Región Moquegua   |

Fuente: (Municipalidad de Ilabaya, 2019)

## 3.2 Estudio del molibdeno

### 3.2.1 El papel del molibdeno en la historia

El Mo es un metal que ha ganado una relevancia creciente en la industria. La historia de este metal empezó gracias a dos científicos, Carl Wilhelm Scheele y Peter Jacob Hjelm. En 1778, Scheele hizo reaccionar la molibdenita ( $\text{MoO}_2$ ) con ácido nítrico y obtuvo óxido de molibdeno ( $\text{MoO}_3$ ). Luego, en 1781, Hjelm separó

el metal al calentar el óxido con carbón vegetal en aceite de linaza. Si bien lo obtuvo impuro, pues tenía carburo de Mo, finalmente en 1817, Jons Jacob Berzelius logró separar el metal puro al reducir con hidrógeno el trióxido (Gutiérrez, 2019).

El producto resultante se empleó experimentalmente como un sustituto del tungsteno en herramientas de acero. La primera aplicación de la que se tiene registro del Mo como un elemento aleante del acero se encuentra en una placa de armadura en Francia. Posteriormente, el químico de nacionalidad francesa, Henri Mossian, fabricó con éxito un metal puro de 99.98 %, a partir de una reducción carbotérmica de óxido, con un horno eléctrico. A este químico se le atribuye el establecimiento de su peso atómico junto con otras cualidades físicas y químicas del Mo (Gupta, 1992).

La primera producción de Mo a nivel industrial sucedió en la mina Knaben, al sur de Noruega, cerca al final del siglo XVIII. Debido al poco valor comercial del metal en esos días, el producto de la mina fue insignificante hasta alrededor de 1880. Para finales del siglo XIX, algunos yacimientos de Mo en Australia y Estados Unidos empezaron a ser explotados. La Primera Guerra Mundial aumentó la demanda por el Mo, por ser sustituto del tungsteno en aceros de alta velocidad y como elemento aleante en algunos aceros para armamentos. El final de la guerra en 1918 afectó el mercado del Mo, debido a la reducción drástica en la producción de armamentos e implementos de guerra (Gupta, 1992).

De esta manera, el período comprendido entre 1912 y 1920 fue de decadencia para el Mo; por lo tanto, la producción en casi todas las minas de Mo disminuyó. Sin embargo, durante esos años, se desarrolló el proceso de flotación para recuperar molibdenita y se hizo una investigación intensiva en el desarrollo de usos pacíficos del Mo. Estos esfuerzos establecieron usos para el Mo en tiempos de paz, principalmente, como aditivo aleante en aceros y hierro (Fe) fundido. En consecuencia, su demanda aumentó y superó los registros en los años de guerra. Las minas de Mo en Estados Unidos reanudaron operaciones y, en adelante, su uso creció continuamente (Gupta, 1992).

Por su parte, la Segunda Guerra Mundial significó otro gran aumento en la demanda del Mo. Luego del período de guerra, se desarrollaron nuevas aplicaciones en tecnología para el Mo y sus aleaciones. El progreso en usos pacíficos fue un fenómeno y, con ello, su uso militar empezó a disminuir. El Mo es ahora un material estratégico e importante en el mundo económico por su amplia aplicación en la industria. La distribución y producción de Mo es bastante desigual a nivel mundial. Después de más de dos siglos desde su descubrimiento en 1778y con poco más de medio siglo de usos tecnológicos efectivos, el Mo por sí mismo ha sido establecido como un importante aditivo metal con respecto a una gran variedad de aleaciones y es muy probable que su uso en años posteriores continúe en aumento(Gupta, 1992).

- **El molibdeno en la naturaleza**

Los depósitos de Mo están ampliamente distribuidos en el mundo y se encuentran cinco tipos principales: depósitos tipo pórfido disseminados, depósitos de contacto metamórfico, depósitos de vena fisura, pegmatitas y diques de aplita, y depósitos en rocas sedimentarias. Los tres primeros son de origen hidrotermal y representan casi todos los recursos conocidos de Mo, por lo que son explotados actualmente en el mundo. Los demás tipos no representan un gran valor de Mo, pero son de importancia económica cuando están asociados con otros minerales.

- **Depósitos tipo pórfido**

Este es el principal tipo de depósito en el mundo. En estos, los sulfuros primarios de Cu o molibdenita ocurren como granos disseminados en forma de venillas, en rocas intrusivas fracturadas e hidrotermalmente granítico alteradas y en las rocas intrusivas ígneas o sedimentarias. Estos depósitos son considerados comúnmente por tener forma tubular, circular u ovalada y lados empinados. Empero, en la naturaleza, tienen formas complejas, como domal, de embudo, arqueado y anular (Gupta, 1992).

- **Depósitos tipo pórfido de molibdeno**

El principal depósito de este tipo es Clímax, el cual es extremadamente raro, pues solo existen trece depósitos conocidos en el mundo, todos ubicados en el oeste de América del Norte y formados desde el cretáceo tardío hasta el terciario. Este tipo de depósitos constan de cubiertas de cuarzo-molibdenita en vetillas *stockwork* que están por encima y alrededor de los ápices de granito calco-alcalino, altamente evolucionado y cuerpos subvolcánicos de pórfido-riolita. Su composición generalmente es de flúor (> 1 %), rubidio (> 500 ppm) y niobio-tantalio (Nb > 50 ppm). La ley de Mo es alta, alrededor de 0.1 a 0.3 %, y son depósitos con amplias reservas de aproximadamente 100 a 1000 millones de toneladas, siendo la molibdenita su principal mineral (Ludington y Plumlee, 2009).

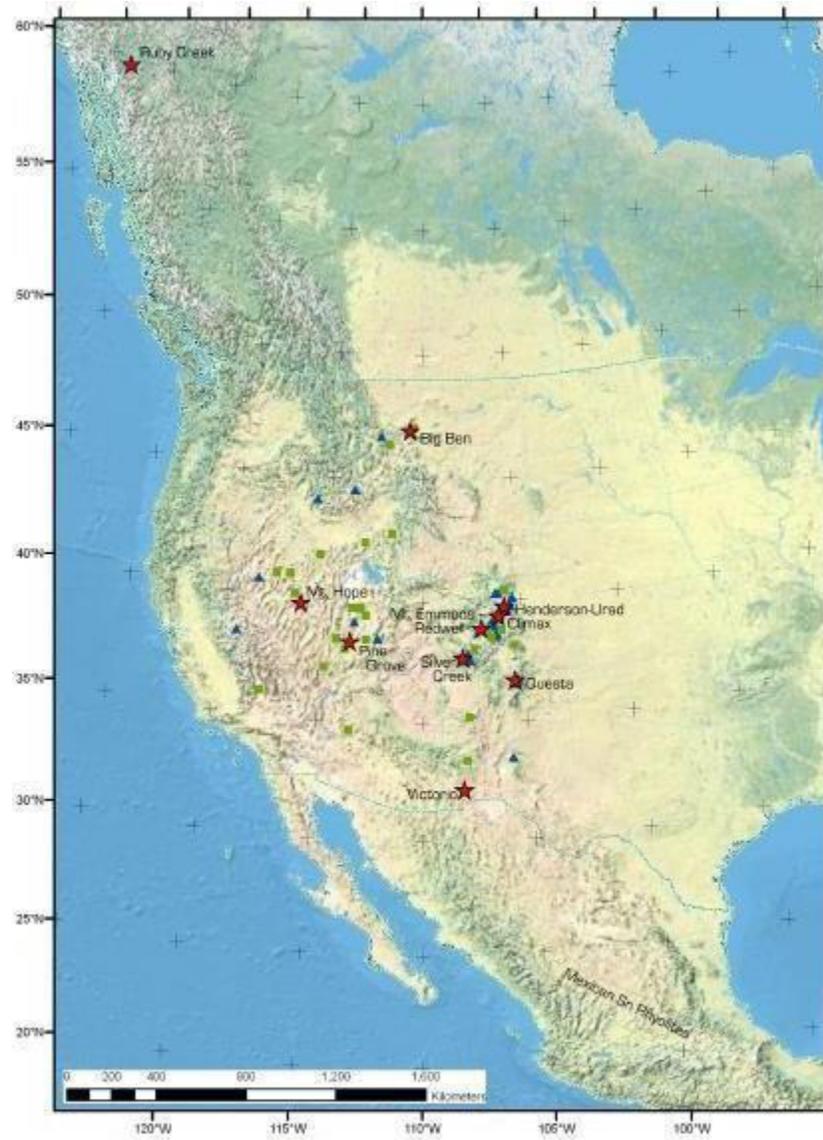


Figura 2. Ubicación de los principales de depósitos pórfidos de molibdeno

Nota: los depósitos se señalan con estrellas rojas, los depósitos prospectados con triángulos azules y los centros ígneos como cuadrados verdes

Fuente: (Ludington y Plumlee, 2009)

- **Depósitos tipo pórfido de cobre**

El término “cobre pórfido” se originó en Estados Unidos para describir grandes depósitos de Cu de bajo grado, en los cuales los minerales de Cu ocurren como granos o vetillas diseminadas. En pórfidos de cobre, el contenido de molibdenita

varía de 0.015 a 0.1 % como límite máximo. Algunos ejemplos de las principales fuentes de cobre en el mundo son: Utah, Ray, Chino y Nevada en Estados Unidos y Brenda, Lornex, Island Copper y Gibraltar en Cánada; en donde el Mo serecupera como producto secundario. Además, existen alrededor de cien depósitos porfídicos de cobre identificados y mucho más por ser descubiertos en el futuro (Gupta, 1992).

- **Depósitos tipo pórfido de cobre-molibdeno**

Estos depósitos trabajan para obtener Cu y Mo y sus operaciones son sensibles a los mercados de ambos minerales. Algunos ejemplos de este tipo de depósito son Sierrita, Arizona, Esperanza y Mineral Park en Arizona. Por su parte, Duval es el más grande productor de Mo en Estados Unidos luego de Clímax. También, comparte con CODELCO (Corporación Nacional del Cobre), Chile, el segundo lugar en el *ranking* mundial de producción de Mo. Los otros dos importantes productores de Mo como producto secundario en Arizona son San Manuel y Twin Buttes. Además de estos, hay un número de pequeños productores, como Ray, Pima, Mission e Inspiration. Recientes adiciones incluyen Pinto Valley y la planta Bagdad. De este modo, por derecho propio, Arizona ocupa un lugar importante en el campo de la producción de Mo, no solo en Estados Unidos, sino mundialmente (Gupta, 1992).

- **Depósitos de contacto metamórfico**

Estos depósitos son menos comunes. En este tipo (tactita y skarns), la molibdenita se encuentra comúnmente asociada con scheelita, bismutina o sulfuros de Cu, en zonas de caliza silicada, cerca de rocas graníticas intrusivas. La molibdenita también existe sola en este tipo de depósitos. Por otro lado, la deposición es por reemplazo y tiende a ser errático en distribución y concentración. La molibdenita puede ser tan alto como un pequeño porcentaje cerca del 1 %  $\text{MoS}_2$  en depósitos económicos.

El depósito Pine Creek, localizado en California, es un ejemplo de un lugar donde el Mo y tungsteno han sido recuperados como subproductos desde 1939. Otros

ejemplos de depósitos de contacto metamórfico con contenidos importantes de Mo se encuentran en el noreste de Caucasia de la URSS (Unión de Repúblicas Socialistas Soviéticas); en la mina Knaben, en Noruega; Ching-ho y Ai-man, en Sinkiang, China; y en Marruecos (Gupta, 1992).

- **Depósitos de venas fisuradas**

En estos depósitos, la molibdenita ocurre con cuarzo, en fracturas llenadas o adyacentes a silicio intrusivo en cinturones orogénicos. Comúnmente, la pirita se encuentra con pequeñas cantidades de sulfuros de metal básico, mientras que los minerales de ganga incluyen fluorita, calcita y rodocrosita. Los depósitos de Mo de venas fisuradas son de ocurrencia común y se encuentran en todas las provincias de Estados Unidos. La mina Questa, en Nuevo México, es un ejemplo. Esta fue explotada como una pequeña vena de cuarzo con Mo. En Colorado, se encuentran cerca a Gold Hill, Gunnison County, con cantidades reducidas de calcopirita y hübnerita. No obstante, la producción de estas ha estado limitada (Gupta, 1992).

- **Pegmatita y diques de aplita**

Los cuerpos de pegmatita y diques de aplita contienen molibdenita, junto con muchos otros constituyentes metálicos y no metálicos. La molibdenita es generalmente de un cristalino grueso, presentes como rosetas y agregados de hojuelas, los cuales están erráticamente distribuidos en la roca huésped. Muchos ejemplos de este tipo de depósitos se encuentran en Estados Unidos. Pegmatitas que contienen Mo está esporádicamente en la Western Cordillera y en la parte central y norte de Appalachia. La disponibilidad de tonelaje es pequeña y hay competencia de otros tipos de minerales. Por estas razones, estos depósitos no han producido cantidades importantes de Mo ni han sido considerados económicamente importantes, aunque producen molibdenita de un excelente grado y pureza (Gupta, 1992).

- **Depósitos incrustados en rocas sedimentarias**

Usualmente, los depósitos incrustados son fuente de menas de uranio y contienen todo tipo de minerales, empezando por carbones o lutitas, hasta fosforitas. Estos pueden contener Mo, que varía en cantidades desde pocas ppm, hasta más de 0.5 %. En Estados Unidos, el Mo está asociado en grandes cantidades con depósitos de uranio arenisca incrustados en Arizona, Wyoming, South Dakota, Nuevo México, Utah y en la Costa del Golfo de Texas. Este Mo está en los minerales jordisita e ilsemanita. Se distribuye irregularmente desde los márgenes exteriores de los cuerpos del mineral, más que dentro de ellos. La pequeña cantidad de Mo presente en este tipo de depósito es perjudicial, porque interfiere con la recuperación de uranio y debe ser segregado fuera del circuito durante el proceso de molienda. En instancias donde los depósitos de uranio son de un tamaño importante y el contenido de Mo también, existe un gran incentivo para la recuperación de Mo como un producto secundario (Gupta, 1992).

### **3.2.3 Principales minerales de molibdeno**

El Mo no aparece en la naturaleza de forma natural, puesto que se encuentra químicamente combinado con otros elementos. Su abundancia es baja, de  $1.5 \times 10^{-6}$  % en la superficie de la tierra. Sin embargo, es uno de los metales cuyo futuro suministro está asegurado por la existencia de grandes reservas.

El metal aparece en un número relativamente pequeño de especies de minerales y son de dos tipos, los sulfuros y los oxigenados. Las especies de sulfuros son la molibdenita ( $\text{MoS}_2$ ) y jordisita ( $\text{MoS}_2$  amorfo). Algunos ejemplos de los oxigenados son wulfenita ( $\text{PbMoO}_4$ ), powellita ( $\text{CaMoO}_4$ ), ferrimolibdita ( $\text{Fe}_2\text{Mo}_3\text{O}_{12} \cdot 8\text{H}_2\text{O}$ ), molibdita ( $\text{MoO}_3$ ) e ilsemanita ( $\text{Mo}_3\text{O}_8 \cdot n\text{H}_2\text{O}$ ). Entre todos estos minerales de Mo, solo cuatro son de valor industrial: la molibdenita, powellita, ferrimolibdita y wulfenita.

A excepción de la molibdenita, los demás son minerales secundarios, formados durante la meteorización del mineral primario, molibdenita. Estos minerales secundarios podrían convertirse en fuentes de mineral económicamente

importantes en el caso de un continuo ascenso en la demanda del Mo. En el caso de la wulfenita y powellita, estos fueron económicamente importantes en Estados Unidos durante el período evolucionario de la producción de Mo (Gupta, 1992).

Tabla 5. Principales minerales de molibdeno

| Nombre         | Fórmula   | Porcentaje de Mo | Dureza (escala Mohs) |
|----------------|---|------------------|----------------------|
| Ferrimolibdita | $\text{Fe}_2(\text{MoO}_4)_3 \cdot 8\text{H}_2\text{O} + n \text{FeMoO}_4\text{OH} \cdot 3\text{H}_2\text{O}$ | 39.1             | 1 a 2                |
| Ilsemanita     | $\text{Mo}_3\text{O}_8 \cdot n\text{H}_2\text{O}$   | Variable         | -                    |
| Jordisita      | $\text{MoS}_2$ (amorfo)   | 59.9             | -                    |
| Koehlinita     | $(\text{BiO})_2\text{MoO}_4$  | 15.7             | 2.5                  |
| Lindgrenita    | $\text{Cu}_3(\text{MoO}_4)_2(\text{OH})_2$  | 35.2             | 4.5                  |
| Molibdenita    | $\text{MoS}_2$  | 59.9             | 1 a 1.5              |
| Molibdita      | $\text{MoO}_3$  | 66.7             | -                    |
| Mourita        | $\text{UO}_2 \cdot 5(\text{MoO}_2(\text{OH})_2)$  | 44.4             | 3                    |
| Powellita      | $\text{CaMoO}_4 / \text{Ca}(\text{Mo.W})\text{O}_4$   | 48               | 3.5 a 4              |
| Chilligita     | $\text{Pb}(\text{Mo.W})\text{O}_4$  | 19.6             | 3.5                  |
| Umohoita       | $\text{UO}_2\text{MoO}_4 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$   | 19.1             | 2                    |
| Wulfenita      | $\text{PbMoO}_4$  | 21.1             | 2.75 a 3             |

Fuente: elaboración propia

- **Ferrimolibdita**

Su fórmula química es  $\text{Fe}_2(\text{MoO}_4)_3 \cdot 8\text{H}_2\text{O} + n \text{FeMoO}_4\text{OH} \cdot 3\text{H}_2\text{O}$ . Contiene 39.1 % de Mo y una dureza de uno a dos en la escala de Mohs. Su densidad es de tres en forma de polvo, 4.46 para cristales sintéticos y su color es amarillo canario. Tiene una estructura ortorrómbica y se deshidrata completamente bajo un calentamiento a 240 °C. Es soluble en HCl y en amonio con una precipitación de  $\text{Fe}(\text{OH})_3$  (Barthelmy, 2014).

- **Ilsemanita**

Su fórmula química es  $\text{Mo}_3\text{O}_8 \cdot n\text{H}_2\text{O}$ ; puesto que es incierta, el contenido de Mo es variable. Su color puede ser negro, negro azulado o azul. Tiene una estructura

amorfa de acuerdo con algunos autores. Es soluble en agua y cambia de color a un rosado púrpura en calcinación (Barthelmy, 2014).

- ***Jordisita***

Su fórmula química es  $\text{MoS}_2$  (amorfo) y contiene 59.9 % de Mo. Puede ser de color negro con brillo opaco y su estructura es amorfa, como un coloide de  $\text{MoS}_2$ . Es soluble en concentrado de  $\text{HNO}_3$ , ligeramente soluble en  $\text{HCl}$  e insoluble en  $\text{H}_2\text{SO}_4$  o agua (Barthelmy, 2014).

- ***Koehlinita***

Su fórmula química es  $(\text{BiO})_2\text{MoO}_4$  y contiene 15.7 % de Mo. Su dureza es de 2.5 en la escala de Mohs y su densidad de 8.26. Su color es amarillo verdoso, amarillo o blanco y su estructura es ortorrómbica. Es fácilmente soluble en  $\text{HCl}$  y menos soluble en  $\text{HNO}_3$ . Calentado en un tubo cerrado pasa a tener un color marrón, luego funde a una masa marrón oscuro y, cuando enfría, cambia a amarillo (Barthelmy, 2014).

- ***Lindgrenita***

Su fórmula química es  $\text{Cu}_3(\text{MoO}_4)_2(\text{OH})_2$  y contiene 35.2 % de Mo. Su dureza es de 4.5 en la escala de Mohs y tiene una densidad de 4.26. Su color es verde con un brillo grasiento y su estructura es monoclinica prismática. Es soluble en  $\text{HCl}$  y  $\text{HNO}_3$ , fácilmente fundible y se oscurece al ser calentado en un tubo cerrado, forma una cubierta ligeramente marrón y se derrite (Barthelmy, 2014).

- ***Molibdenita***

Su fórmula química es  $\text{MoS}_2$  y contiene 59.9 % de Mo. Su dureza en la escala de Mohs está entre 1 a 1.5 y su densidad varía entre 4.6 a 5.1. Presenta un color negro a gris plomo azulado, de brillo metálico y su estructura es hexagonal. Es exfoliable en masas o escamas, lo cual hace que sea grasoso al tacto. Una propiedad importante para su reconocimiento es que es séctil (Diéguez, 2014).

Tabla 6. Propiedades de la molibdenita

| Color                                  | Gris azulado a negro  |
|--|---|
| Gravedad específica                    | 4.8 a 5.0   |
| Dureza                                 | Baja dureza-1 en la escala de Mohs  |
| Coeficiente de fricción                | de 0.2, el bajo coeficiente de fricción es para una temperatura de -150 °C a +400 °C  |
| Estabilidad térmica                    | Se mantiene en atmósferas vacías y no oxidantes, hasta temperaturas tan altas como 1100 °C.   |
| Oxidación                              | Resistencia a la oxidación en temperatura ambiente y baja humedad, pero muestra un poco de susceptibilidad a la oxidación en aire húmedo. En aire seco, la oxidación empieza lentamente, a 400 °C e incrementa rápidamente a 550 °C |
| Magnetismo                             | Diamagnética y esencialmente pobre conductor  |
| Afinidad para las superficies de metal | Posee una afinidad por las superficies metálicas y se adhiere muy bien, esto está relacionado a la molécula bond  |

Fuente: (Gupta, 1992)

- ***Molibdita***

Su fórmula química es  $\text{MoO}_3$  y contiene 66.7 % de Mo. Su densidad es de 4.72 y presenta un ligero color verdoso amarillo, hasta casi sin color, con lustre adamantino. Su estructura es monoclinica (Barthelmy, 2014).

- ***Mourita***

Su fórmula química es  $\text{UO}_2 \cdot 5(\text{MoO}_2(\text{OH})_2)$  y contiene 44.4 % de Mo. Su dureza en la escala de Mohs es 3 y tiene una densidad de 4.225. Presenta un color violeta, violeta azulado o azul oscuro con un lustre adamantino. Es soluble en concentrado de  $\text{HNO}_3$ , soluble en calentamiento con 20 % de  $\text{NaCO}_3$  e insoluble en  $\text{H}_2\text{SO}_4$  (Barthelmy, 2014).

- ***Powellita***

Su fórmula química es  $\text{CaMoO}_4$  o  $\text{Ca}(\text{Mo.W})\text{O}_4$  y contiene 48 % de Mo. Su dureza en la escala de Mohs está entre 3.5 a 4 y tiene una densidad de 4.26. Presenta un color amarillo paja, amarillo verdoso, gris, azul pálido o azul verdoso y un lustre

adamantino a amarillo grasoso. Tiene una estructura piramidal y se descompone en HCl y HNO<sub>3</sub>, se funde fácilmente (Barthelmy, 2014).

- **Chilliagita**

Su fórmula química es Pb(Mo.W)O<sub>4</sub> y contiene 19.6 % de Mo. Su dureza es de 3.5 en la escala de Mohs y tiene una densidad de 7.5. Tiene un color amarillo con un lustre vítreo a adamantino y su estructura es tetragonal (Barthelmy, 2014).

- **Umohoíta**

Su fórmula química es UO<sub>2</sub>MoO<sub>4</sub>.4H<sub>2</sub>O y contiene 19.1 % de Mo. Su dureza en la escala de Mohs es de 2 y su densidad va entre 4.55 y 4.93. Su color es azul oscuro a negro azulado o verde oscuro y lustre submetálico brillante. Tiene una estructura variable, monoclinica u ortorrómbica (Barthelmy, 2014).

- **Wulfenita**

Su fórmula química es PbMoO<sub>4</sub> y contiene 21.1 % de Mo. Su dureza en la escala de Mohs va de 2.75 a 3 y tiene una densidad de 6.815. Su color es naranja o amarillo, marrón anaranjado o marrón rojizo, gris amarillento o marrón verdoso con un lustre resinoso a adamantino. Su estructura es tetragonal y se descompone en HNO<sub>3</sub>, y es soluble e concentrado de H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> y álcalis (Barthelmy, 2014).

### 3.2.4 Propiedades físicas del molibdeno

El número atómico del Mo es 42, mientras que su peso atómico promedio es 95.95 y pertenece al sexto grupo de la tabla periódica de elementos, ubicado en el eje vertical, entre el cromo (Cr) y tungsteno y en el horizontal, entre el niobio y tecnecio. En su estado puro, el Mo es un metal maleable con un lustre gris, capaz de ser pulido y molido sin dificultad. El Mo presenta una conductividad térmica óptima, además de un calor específico reducido, lo que le posibilita calentarse o enfriarse de forma rápida, con menores tensiones térmicas resultantes comparado con otros metales.

La conductividad eléctrica del Mo es relativamente alta, cercana a un tercio del valor del Cu, por lo que es un metal adecuado para aplicaciones eléctricas. Además, tiene un módulo de elasticidad elevado, el cual puede considerarse como uno de los más elevados que se han descubierto en metales con carácter comercial. Este módulo se afecta en poca medida por la temperatura; aun a 800 °C, su valor excede el de un acero ordinario a temperatura ambiente (Gupta, 1992).

Tabla 7. Propiedad y valor

| Propiedad                             | Valor                          | Unidad  |
|---------------------------------------|--------------------------------|---|
| Masa atómica                          | 95.94                          | uma   |
| Punto de fusión                       | 2890                           | K   |
| Punto de ebullición                   | 4885                           | K   |
| Densidad                              | 10220                          | kg/cm <sup>3</sup>                                    |
| Potencial normal de reducción         | + 0.11                         | V H <sub>2</sub> MoO <sub>4</sub>   Mo solución ácida |
| Conductividad térmica                 | 138.00                         | J/ ms °C  |
| Conductividad eléctrica               | 192.3                          | (mΩ.cm) <sup>-1</sup>                                 |
| Calor específico                      | 254.98                         | J/kg °K   |
| Calor de fusión                       | 27.6                           | kJ/mol  |
| Calor de vaporización                 | 590.0                          | kJ/mol  |
| Calor de atomización                  | 658.0                          | kJ/mol de átomos                                      |
| Estados de oxidación                  | -2, -1, +1, +2, +3, +4, +5, +6 |   |
| 1. <sup>a</sup> energía de ionización | 684.9                          | kJ/mol  |
| 2. <sup>a</sup> energía de ionización | 1588.2                         | kJ/mol  |
| 3. <sup>a</sup> energía de ionización | 2620.5                         | kJ/mol  |
| Afinidad electrónica                  | 72                             | kJ/mol  |
| Radio atómico                         | 1.39                           | Å   |
| Radio covalente                       | 1.29                           | Å   |
| Radio iónico                          | Mo <sup>3+</sup> = 0.69        | Å   |
|                                       | Mo <sup>4+</sup> = 0.64        | Å   |
|                                       | Mo <sup>6+</sup> = 0.62        | Å   |
| Volumen atómico                       | 9.4                            | cm <sup>3</sup> /mol                                  |
| Polarizabilidad                       | 12.8                           | Å <sup>3</sup>  |
| Electronegatividad (Pauling)          | 2.16                           |   |

Fuente: (Peña, 2007)

### **3.2.5 Propiedades químicas del molibdeno**

El Mo es estable en el aire a temperatura ambiente, pero una de sus debilidades es su falta de resistencia a la oxidación a temperaturas elevadas. Hay una ligera oxidación a temperaturas por encima de los 500 °C, donde se forma el trióxido de molibdeno volátil, cuyo uso no es práctico bajo estas condiciones (Peña, 2007).

Por otro lado, el Mo es inerte en su totalidad cuando se encuentra en atmósferas puras de hidrógeno, argón y helio. Por encima de los 700 °C, el metal se oxida rápidamente y produce vapor de dióxido de molibdeno. Además, el Mo exhibe relativa inercia en dióxido de carbono, amoníaco y nitrógeno en temperaturas cercanas a los 1100 °C. A temperaturas más altas, una película superficial de nitruro se podrían formar gases de amoníaco y nitrógeno en atmósferas. En atmósferas reducidas, el Mo resiste muy bien sulfuros de hidrógeno a elevadas temperaturas y forma un delgado recubrimiento de sulfuro en el metal. Empero, en una atmósfera oxidante, gases que contienen azufre (S) corroen el metal rápidamente (Gupta, 1992).

### **3.2.6 Propiedades mecánicas del molibdeno**

Las propiedades mecánicas del Mo dependen, en gran parte del trabajo en frío. Cuando están sujetos a pasos de procesamiento similares, no hay una diferencia importante en las propiedades mecánicas en la metalurgia del Mo fundido o en polvo.

### **3.2.7 Utilidades del molibdeno**

Con frecuencia, el Mo es un elemento metálico usado como aditivo aleante y aceros inoxidables. Su versatilidad no tiene comparación, debido a que mejora la resistencia, templabilidad, soldabilidad, tenacidad, resistencia a la temperatura y la corrosión. Aunque el Mo se emplea principalmente en aceros, sus propiedades únicas han hecho que su uso se amplíe en otros sistemas de aleación y en usos

químicos. Una de las propiedades que lo distingue de otros metales pesados es que se ha demostrado con estudios de laboratorio que sus componentes presentan una toxicidad baja (The International Molybdenum Association, 1998).

Tabla 8. Principales usos del molibdeno

|   |      |
|---|------|
| Aceros inoxidable y súper aleaciones      | 30 % |
| Aceros de baja aleación                   | 30 % |
| Químicos y metal Mo                       | 20 % |
| Aceros para herramientas y alta velocidad | 10 % |
| Fundición                                 | 10 % |

Fuente: (The International Molybdenum Association, 1998)

### **3.2.7.1 Efectos del molibdeno en el acero**

El contenido de Mo en el acero varía en un rango menor al 0.1 % hasta cerca del 10 % en peso. No es común que sea usado solo en adición como aleante; preferentemente, se emplea en combinación con otros aditivos. Además, el Mo contribuye de manera importante en la templabilidad de los aceros. En comparación con un acero de baja templabilidad, un acero de alta templabilidad de la misma sección puede ser templado por un enfriamiento menos drástico, como enfriamiento con aceite en lugar de usar agua o enfriamiento con aire en lugar de aceite. Con métodos de enfriamiento idénticos, un acero con alta templabilidad se puede templar en secciones más gruesas, comparado con un acero de baja templabilidad (Gupta, 1992).

### **3.2.7.2 Aceros de ingeniería**

En esencia, esta categoría de aceros consiste en aceros aleados, empleados en distintas aplicaciones, como engranajes de alto estrés, ejes, tornillos y máquinas de varios tipos, incluidos automóviles, tractores, aeronaves y herramientas de máquina. El uso extensivo del Mo en estos aceros es principalmente por su resaltante y económica contribución a la templabilidad.

El aspecto económico no solo deriva de que son requeridas pequeñas cantidades de Mo para producir grandes mejoras en la templabilidad. El factor adicional se debe a que el Mo no se pierde por oxidación en operaciones que envuelven la fusión o trasvase, su influencia en la templabilidad es bastante confiable y controlable. También, es posible recuperar Mo casi por completo desde la chatarra y esto representa un factor relevante en el incremento del uso de chatarrasaleadas en el proceso de fabricación de acero (Gupta, 1992).

### **3.2.7.3 Aceros resistentes a la corrosión**

No existen muchos elementos aleantes que tengan un uso tan amplio en aceros aleados como el Mo. Este crece de manera importante en la metalurgia del acero inoxidable. La resistencia de los metales atacados por un medio corrosivo se debe a su pasividad. El estado pasivo de algunos metales, especialmente el Cr, es muy estable y es evidente en diversos medios corrosivos.

De este modo, el Mo forma los aditivos aleantes básicos que confieren pasividad al Fe. Una adición del 12 % a 13 % de Cr transfiere la pasividad estable de este elemento al acero y se convierte en inoxidable en muchos medios corrosivos agresivos. Mientras que el Cr determina si un acero es inoxidable, el Mo mejora la resistencia a la corrosión de todos los aceros inoxidables. De este modo, tiene un efecto positivo en la resistencia a la picadura y a la corrosión por hendidura en soluciones que contienen cloro (The International Molybdenum Association, 2014).

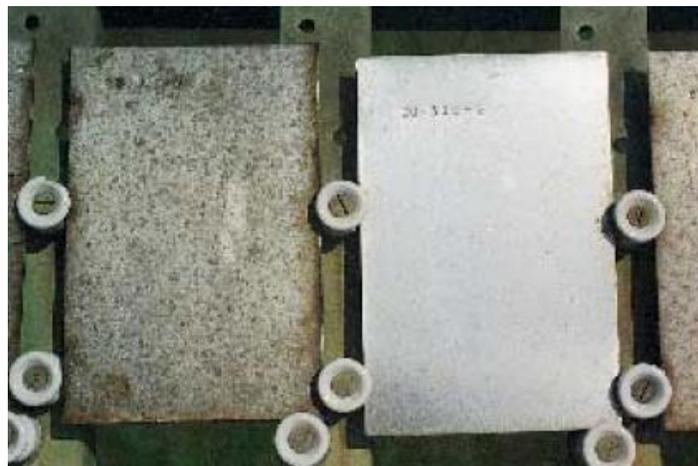


Figura 3. Comparación de paneles tipo 304 (0 % Mo) y 316 (2-3 % Mo) luego de 56 años de exposición marina

Fuente: (The International Molybdenum Association, 1998)

#### **3.2.7.4 Aceros para servicios de alta temperatura**

El Mo es un aditivo efectivo para incrementar la resistencia a la alta temperatura de todos los tipos de acero. Generalmente, estos aceros pueden ser agrupados como acero al carbono molibdeno, aceros cromo molibdeno, aceros con molibdeno “18-8”, aceros para pernos a altas temperaturas, aceros para pernos estables (usados en calderas locomotoras), aceros para rotores de turbina de vapor, aceros para válvulas de escape, aceros para resortes y aceros para turbina de gas.

Los aceros cromo-molibdeno con 1 % a 9 % de Cr han probado ser adecuados para aplicaciones donde la resistencia a la oxidación y corrosión es necesaria y debe ser mayor a la dada por un acero al carbono molibdeno, pero donde los aceros altamente aleados no son requeridos. Este tipo de aceros son ampliamente usados en plantas de vapor, refinerías de petróleo y procesos de hidrogenación. El Mo al estar presente en estos aceros en una cantidad de al menos 0.5 %, minimiza la fragilidad e incrementa la resistencia a las altas temperaturas (Gupta, 1992).

#### **3.2.7.5 Aceros para herramientas**

El Mo en las herramientas incrementa su dureza y su resistencia al desgaste. Mediante la reducción de la tasa de enfriamiento crítico, el Mo promueve la formación de una matriz martensítica óptima, incluso en moldes intrincados, donde no puede ocurrir el enfriamiento rápidamente sin distorsión o *cracking*. Además, el Mo actúa en conjunto con otros elementos, como el Cr, para producir grandes cantidades de carburos muy duros y resistentes a la abrasión. Mientras aumenta

la demanda física en las herramientas, también lo hace el contenido de Mo (The International Molybdenum Association, 2008).

Tabla 9. %Mo para aceros en herramientas con distintos fines

| Aceros para herramientas        | % Mo      |
|---------------------------------|-----------|
| Aceros para moldes de plástico  | Hasta 0.5 |
| Aceros para trabajo en frío     | 0.5-1.0   |
| Aceros para trabajo en caliente | Hasta 3.0 |

Fuente: (The International Molybdenum Association, 1998)

### **3.2.7.6 Aceros de alta resistencia, baja aleación y fase dual**

Los aceros de este tipo son conocidos como HSLA (*High-Strength Low-Alloy*), contienen de 0.1 a 0.3 % de Mo. Los aceros HSLA exhiben una alta tenacidad a bajas temperaturas, así como buena soldabilidad. Una de sus aplicaciones más importantes es en tuberías de gran diámetro, usadas en líneas de transmisión para petróleo y gas natural, en ambientes árticos y bajo el mar. La aparición de estos aceros ha hecho posible la producción de partes de vehículos más ligeros, comparados con los aceros al carbono usuales. Esto resulta en una reducción de peso y mejora la economía del combustible (Gupta, 1992).

### **3.2.7.7 Molibdeno en hierro fundido**

El Mo puede ser añadido al proceso del Fe fundido sin cambiar las características de la carga, la práctica normal de fusión o el metal base. De manera similar, la abundancia, facilidad de uso y efectividad han posibilitado un incremento en su uso en este rubro. Así, el Mo actúa como un aditivo efectivo para los Fe fundidos y mejora sus propiedades (Gupta, 1992). El Mo imparte al Fe fundido gris mejor resistencia y dureza; sin embargo, el incremento de dureza no es tanto como en la resistencia. De este modo, permite obtener mayores resistencias con menor peligro de perder maquinabilidad.

Otra de sus aplicaciones es su contribución a las resistencias altas, que suele ser acompañado por un incremento de tenacidad y resistencia a los golpes. Una aplicación típica se da en los tambores para excavadoras o grúas que requieren tener suficiente resistencia para resistir cargas y dureza para resistir el desgaste. Además, la presencia del Mo en el Fe fundido asegura que este tenga una respuesta uniforme al tratamiento térmicos, razón por la cual es empleado en la industria automotriz a gran escala. También, es conocido el uso de Fe fundido gris en revestimientos de cilindros y otras partes expuestas a contacto friccional (Gupta, 1992).

### **3.2.7.8 Industria eléctrica y electrónica**

La luz incandescente fue la primera aplicación del Mo como metal. En 1904, se empleó como filamentos de cable para su uso en lámparas. Aunque en la actualidad se cuenta con tecnologías CFL (*Compact Fluorescent Lamp*) y LED (*Light-Emitting Diode*), sus aplicaciones en la iluminación continúan como componentes, cables usados o mandriles para contraer filamentos de tungsteno (The International Molybdenum Association, 2013).

Por otro lado, el Mo cumple un papel importante en las telecomunicaciones. El cristal líquido del transistor de película delgada (TFT-LCD por su nombre en inglés) se basa en el alto punto de fusión del Mo, combinado con la baja difusividad del aluminio y Cu en él, lo hace una excelente barrera de difusión para la corriente impulsada que podría causar fallas en el dispositivo. La producción de equipos semiconductores ha usado Mo por mucho tiempo por su resistencia a altas temperaturas y su compatibilidad con procesos en ambientes agresivos (The International Molybdenum Association, 2013).

### **3.2.7.9 Disulfuro de molibdeno**

Las principales aplicaciones del disulfuro de molibdeno son en el campo de los lubricantes, semiconductores y catalizadores utilizados en variados rubros. El disulfuro de molibdeno ha probado ser un lubricante fundamental, porque trabaja en condiciones de alta temperatura y presión. Además, no es adhesiva, cuenta

con buena dispersión y se puede añadir a una amplia variedad de aceites y grasas para formar un estado coloidal no enlazado. También, es usado para reducir la fricción en bajas temperaturas o aumentarla a temperaturas altas (ChinaTungsten, 1997).

#### **3.2.7.10 Usos misceláneos**

La baja expansión, el bajo calor específico y la alta conductividad térmica combinada que imparte el Mo al metal genera una buena resistencia al choque térmico, transferencia de calor y propiedades de fatiga. Por estas razones, el Mo y sus aleaciones son ideales para aplicaciones actuales y futuras en la industria de los misiles y el componente para plantas de energía que operan a temperaturas por encima de los 100 °C.

En el campo de la energía nuclear, el Mo tiene muchos usos, incluido el fortalecimiento y la estabilización del combustible en el núcleo del reactor. Los recipientes a presión del reactor hechos de acero ASTM, 302 grado B, que contienen 0.20 % a 0.23 % de carbono, 1.15 % a 1.50 % de manganeso, 0.15 % a 0.30 % de silicio y 0.45 % a 0.60 % de Mo, han sido empleados en un gran número de instalaciones de energía nuclear en Estados Unidos.

En el campo de la química, se usa alrededor del 8 % a 9 % de la producción mundial de Mo. Entre las principales aplicaciones se encuentran: equipos para procesos químicos, catalizadores, pigmentos, inhibidores de corrosión, reactivos de laboratorio y agricultura. La aplicación en forma de molibdato de sodio como fertilizador para suelos en la agricultura ha dado buenos dividendos y ha llevado al mercado a un incremento en su producción. Frecuentemente, el Mo es añadido como parte del tratamiento de semillas; mientras que la insuficiencia de Mo puede ser la causa de distintos problemas en la cosecha (Gupta, 1992).

### **3.3 Producción nacional de concentrado de molibdeno**

#### **3.3.1 Producción nacional de concentrado de molibdeno por regiones**

A partir de reportes del Ministerio de Energía y Minas (2020), se puede afirmar que la producción de concentrado de Mo en el país tuvo un volumen equivalente a 30 441 TMF (Toneladas Métricas Finas), que representó un incremento del 8.58 % respecto al año previo. Además, se registró una mayor producción en aquellas zonas que centran el 78.24 % de la producción total de la nación, como Arequipa, Tacna y Áncash.

A nivel local, Arequipa se ha reafirmado como una región líder de la producción de Mo, pues aportó el 42.73 % de la producción nacional, con un volumen de 13 007 TMF. De esta manera, incrementó su producción en un 3.16 %. En segundo lugar, se ubica la región de Tacna, que reportó un volumen de 7277 TMF durante el 2019 (con un 23.91 % de aporte). Esta región determinó un aumento del 74.97 % comparado con el año anterior, debido a que la unidad minera en Toquepala inició operaciones en su planta de Mo, en la concentradora C2. Por su parte, la región de Áncash contribuyó en un 11.60 % y un volumen de concentrado de 3532 TMF, con lo que disminuyó su producción en un 23.68 % (Ministerio de Energía y Minas del Perú, 2020).

Tabla 10. Producción nacional de concentrado de molibdeno por regiones

| <b>2010-2019: producción nacional de concentrado de Mo<br/>por regiones (TMF)</b> |               |               |               |               |               |               |               |               |               |               |
|---|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|
| <b>Región</b>   | <b>2010</b>   | <b>2011</b>   | <b>2012</b>   | <b>2013</b>   | <b>2014</b>   | <b>2015</b>   | <b>2016</b>   | <b>2017</b>   | <b>2018</b>   | <b>2019</b>   |
| <b>Total</b>  | <b>16 963</b> | <b>19 141</b> | <b>16 790</b> | <b>18 140</b> | <b>17 018</b> | <b>20 153</b> | <b>25 757</b> | <b>28 141</b> | <b>28 034</b> | <b>30 441</b> |
| Arequipa  | 3463          | 4759          | 3982          | 5801          | 4736          | 3332          | 9580          | 12 513        | 12 609        | 13 007        |
| Tacna   | 4828          | 5363          | 4468          | 4662          | 6100          | 7924          | 6324          | 4184          | 4159          | 7277          |
| Áncash  | 3413          | 6233          | 5480          | 4544          | 1424          | 2018          | 4667          | 3968          | 4628          | 3532          |
| Moquegua  | 5259          | 2787          | 2860          | 3133          | 4001          | 4445          | 3926          | 3746          | 3099          | 3286          |
| Apurímac  | -             | -             | -             | -             | -             | -             | -             | 1,085         | 1961          | 1783          |
| Cusco   | -             | -             | -             | -             | -             | -             | 162           | 454           | 904           | 1272          |
| Junín   | -             | -             | -             | -             | 757           | 2434          | 1097          | 2190          | 672           | 284           |

Fuente: (Ministerio de Energía y Minas del Perú, 2020)

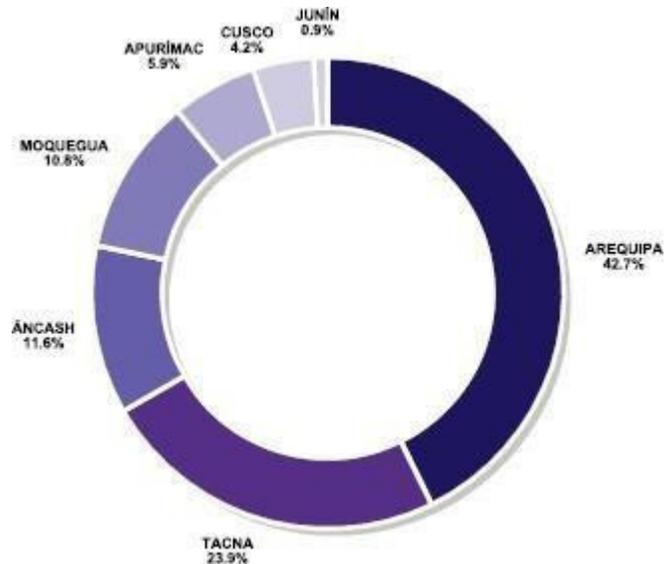


Figura 4. Producción anual de concentrado de molibdeno por regiones (%)

Fuente: (Ministerio de Energía y Minas del Perú, 2020)

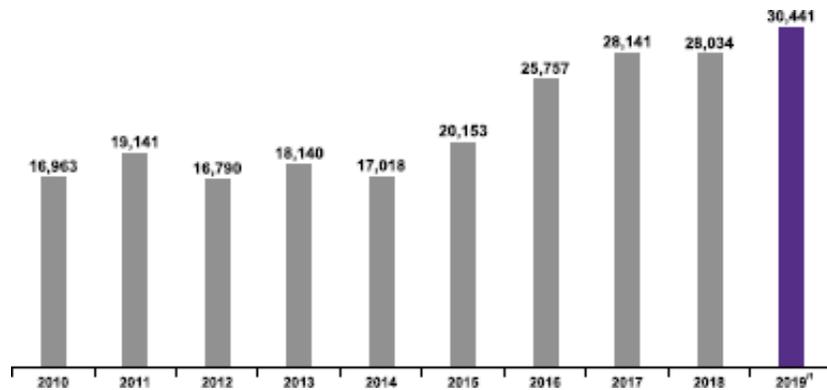


Figura 5. Producción nacional de concentrado de molibdeno por año (2010-2019)

Fuente: (Ministerio de Energía y Minas del Perú, 2020)

### 3.3.2 Producción nacional de concentrado de molibdeno por compañía

En cuanto a la producción que presentan las compañías mineras más representativas, se aprecia que las cifras del 2019 situaron a la Sociedad Minera Cerro Verde S.A.A. como el primer productor de Mo, con una participación de

13 007 TMF, que corresponden al 42.73 % del total producido; de este modo, tuvo un aumento del 3.16 % en comparación con el 2018 (Ministerio de Energía y Minas del Perú, 2020).

Por otro lado, la Southern Copper Corporation cuenta con 10 563 TMF, que representan el 34.7 % y un incremento del 45.54 % de su producción con respecto al año anterior, por el aumento de producción de su concentradora ubicada en Toquepala (Ministerio de Energía y Minas del Perú, 2020).

La tercera posición corresponde a la Compañía Minera Antamina S.A., con 3532 TMF, la cual representa el 11.60 %; disminuyó su producción en un 23.68 %. Asimismo, la Minera Las Bambas S.A. (1783 TMF) está en la cuarta ubicación con un 5.90 %, aunque presentó una disminución en su producción con respecto al año anterior. Finalmente, Hudbay Perú S.A.C. (1272 TMF) y la Minera Chinalco Perú S.A. (284 TMF) están las posiciones quinta y sexta, representando el 4.20 % y 0.90 %, respectivamente (Ministerio de Energía y Minas del Perú, 2020).

Tabla 11. Producción nacional de concentrado de molibdeno por empresa

| 2010-2019: producción nacional de concentrado de Mo<br>por empresa (TMF) |               |               |               |               |               |               |               |               |               |               |
|--|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|
| Región   | 2010          | 2011          | 2012          | 2013          | 2014          | 2015          | 2016          | 2017          | 2018          | 2019          |
| <b>Total</b>   | <b>16 963</b> | <b>19 141</b> | <b>16 790</b> | <b>18 140</b> | <b>17 018</b> | <b>20 153</b> | <b>25 757</b> | <b>28 141</b> | <b>28 034</b> | <b>30 441</b> |
| Sociedad Minera Cerro Verde S.A.A.                                       | 3463          | 4759          | 3982          | 5801          | 4736          | 3332          | 9580          | 12 513        | 12 609        | 13 007        |
| Southern Copper Corporation  | 10 087        | 8150          | 7329          | 7795          | 10 101        | 12 368        | 10 250        | 7931          | 7258          | 10 563        |
| Compañía Minera Antamina S.A.  | 3413          | 6233          | 5480          | 4544          | 1424          | 2018          | 4667          | 3968          | 4628          | 3532          |
| Minera Las Bambas S.A.   | -             | -             | -             | -             | -             | -             | -             | 1085          | 1961          | 1783          |
| Hudbay Perú S.A.C.   | -             | -             | -             | -             | -             | -             | 162           | 454           | 904           | 1272          |
| Minera Chinalco Perú S.A.  | -             | -             | -             | -             | 757           | 2434          | 1097          | 2190          | 672           | 284           |

Fuente: (Ministerio de Energía y Minas del Perú, 2020)

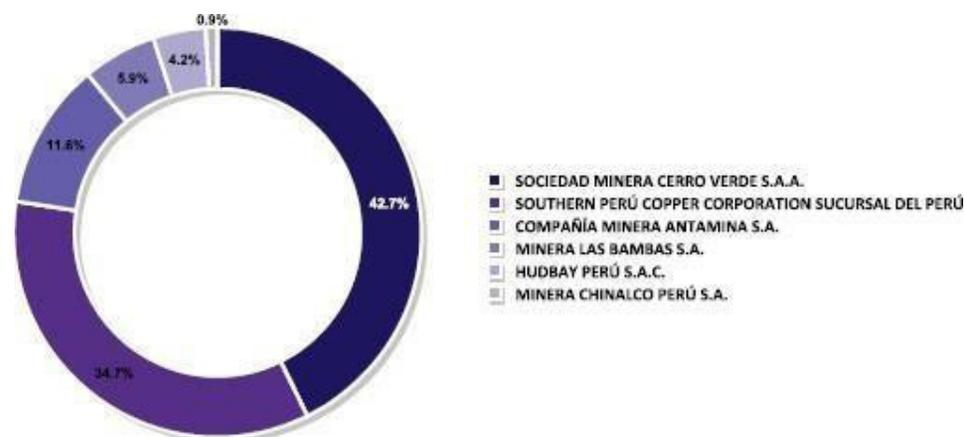


Figura 6. Producción nacional de concentrado de molibdeno por empresa (%)

Fuente: (Ministerio de Energía y Minas del Perú, 2020)

### 3.3.3 Exportaciones

En 2019, el volumen de las exportaciones aumentó en un 7.90 %, en comparación con lo obtenido en el 2018. Este aumento permitió un incremento del 4.2 % en el valor de las exportaciones, mostrando un aumento continuo desde el 2015 (Ministerio de Energía y Minas del Perú, 2020).

En cuanto a las naciones que representan los destinos primordiales para exportar Mo, en primer lugar, se encuentra Estados Unidos de América, con 322.7 millones USD, lo que representa el 50.60 %. En segundo y tercer lugar se encuentran Chile (196.9 millones USD) y los Países Bajos (39.6 millones USD), que refleja el 30.9 % y 6.2 % correspondiente a las exportaciones del país de Mo, respectivamente (Ministerio de Energía y Minas del Perú, 2020).



Figura 7. Destino de las exportaciones nacionales de concentrado de molibdeno

Fuente: (Ministerio de Energía y Minas del Perú, 2020)

Tabla 12. Producción mundial de molibdeno por país

| 2010-2019: producción mundial de molibdeno por país (TMF) |                |                |                |                |                |                |                |                |                |                |
|---|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|
| País  | 2010           | 2011           | 2012           | 2013           | 2014           | 2015           | 2016           | 2017           | 2018           | 2019           |
| <b>Total</b>  | <b>247 479</b> | <b>264 101</b> | <b>255 588</b> | <b>257,606</b> | <b>268,379</b> | <b>235 296</b> | <b>279 157</b> | <b>296 631</b> | <b>297 214</b> | <b>294 341</b> |
| China   | 96 600         | 103 000        | 105 000        | 101 000        | 92 000         | 83 000         | 130 000        | 130 000        | 133 000        | 130 000        |
| Chile   | 37 186         | 40 889         | 35 090         | 38 715         | 48 770         | 52 579         | 55 600         | 62 500         | 60 200         | 54 000         |
| Estados Unidos  | 59 400         | 63 700         | 60 400         | 61 000         | 68 200         | 47 400         | 35 800         | 40 700         | 41 400         | 44 000         |
| Perú  | 16 963         | 19 141         | 16 790         | 18 140         | 17 018         | 20 153         | 25 757         | 28 141         | 28 034         | 30 441         |
| México  | 10 849         | 10 787         | 11 366         | 12 562         | 14 370         | 11 327         | 11 900         | 14 000         | 15 100         | 16 000         |
| Armenia   | 4335           | 5745           | 6525           | 6900           | 7162           | 7200           | 6300           | 5800           | 5000           | 5400           |
| Canadá  | 8648           | 8543           | 8936           | 7956           | 9358           | 2287           | 2710           | 5290           | 4680           | 4700           |
| Irán  | 7000           | 3365           | 3516           | 3471           | 3494           | 3500           | 3500           | 3500           | 3500           | 3500           |
| Rusia   | 3800           | 6014           | 4939           | 4753           | 4658           | 4500           | 3000           | 3100           | 2800           | 2800           |
| Mongolia  | 2198           | 1960           | 1904           | 1819           | 1999           | 2000           | 2440           | 1800           | 1800           | 1800           |
| Turquía   | -              | 400            | 600            | 800            | 900            | 900            | 900            | 900            | 900            | 900            |
| Argentina   | -              | -              | -              | -              | -              | -              | 800            | 450            | 600            | 600            |
| Uzbekistán  | 500            | 557            | 522            | 490            | 450            | 450            | 450            | 450            | 200            | 200            |

Fuente: (Ministerio de Energía y Minas del Perú, 2020)

### **3.3.4 Cotización del molibdeno**

Por su parte, a la hora de cotizar el Mo, se aprecia un incremento del comportamiento en la primera mitad del 2019, de modo que su cotización más elevada fue tercer mes del año, con 12.4 USD/lb. Más adelante, en últimos tres meses de ese año, la cotización disminuyó hasta 8.9 USD/lb en noviembre. En conclusión, al promediar las cotizaciones de 2019, se llegó a 11.4 USD/lb, con lo que se reporta una reducción del 4.6 % en contraste con la cotización del 2018 (11.9 USD/lb) (Ministerio de Energía y Minas del Perú, 2020).

Tabla 13. Exportaciones del molibdeno por año

|            |             | 2010-2019: exportaciones de Mo |       |       |       |       |      |      |      |       |       |
|------------|-------------|--------------------------------|-------|-------|-------|-------|------|------|------|-------|-------|
| Mo         |             | 2010                           | 2011  | 2012  | 2013  | 2014  | 2015 | 2016 | 2017 | 2018  | 2019  |
| Valor      | (USDMM)     | 492                            | 564   | 428   | 356   | 360   | 220  | 273  | 368  | 612   | 638   |
| Volumen    | (MILES TM.) | 16.7                           | 19.5  | 17.9  | 18.4  | 16.5  | 17.8 | 24.4 | 25.4 | 27.2  | 29.3  |
| Cotización | (USD/lb)    | 15.8                           | 15.45 | 12.74 | 10.32 | 11.39 | 6.65 | 6.48 | 8.21 | 11.94 | 11.35 |

Fuente: (Ministerio de Energía y Minas del Perú, 2020)

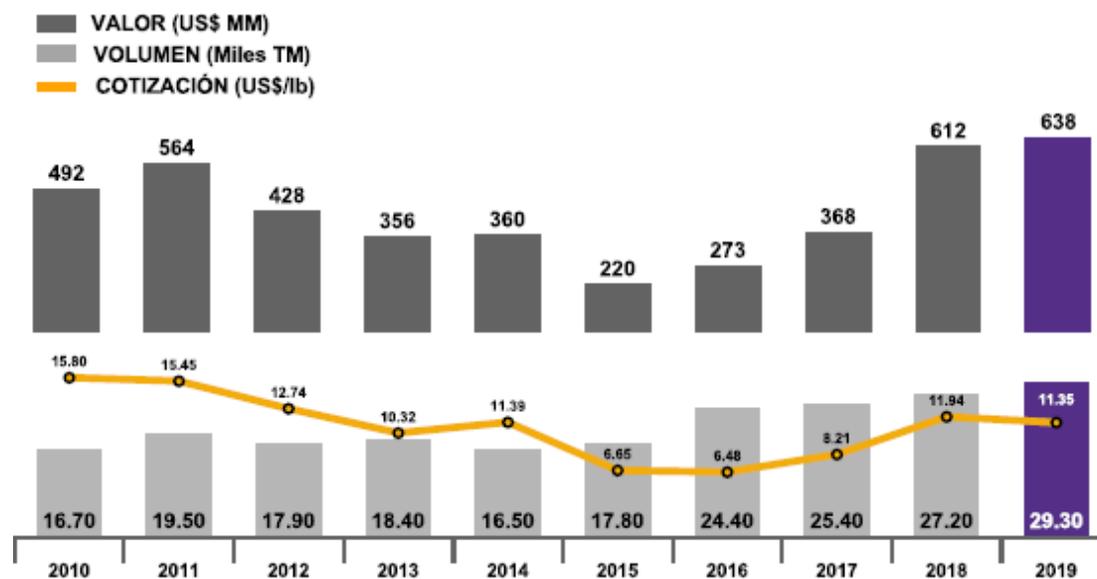


Figura 8. Evolución anual de las exportaciones de molibdeno y su cotización

Fuente: (Ministerio de Energía y Minas del Perú, 2020)

### 3.4 Flotación del molibdeno

#### 3.4.1 Conceptos generales

Según Yianatos (2005), el proceso de flotación necesita llevarse a cabo de una forma correcta, con un proceso previo de liberación adecuado que permita separar de forma efectiva el mineral valioso de la ganga. Dentro de sí, un mineral tiene material valioso que se desea obtener y ganga de la cual debe separarse, como se puede apreciar en la Figura 9. La proporción de material valioso se puede calcular al dividir la cantidad de mineral valioso entre la cantidad total de mineral (Yianatos, 2005).

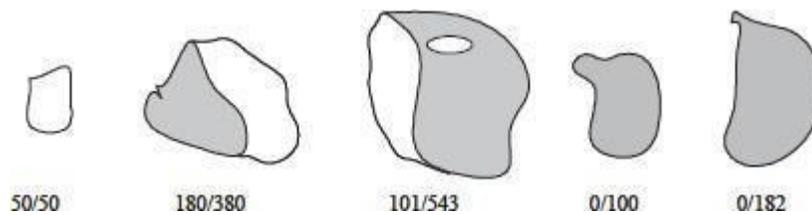


Figura 9. Ejemplo de asociación de mineral

Fuente: (Yianatos, 2005)

#### 3.4.2 Diseño conceptual

La flotación se puede entender como la secuencia de dos procesos: la reacción y separación. En la primera etapa, la pulpa reacciona dentro de un reactor con reactivos químicos y aire añadido que sirve para mantener la pulpa en suspensión. En la segunda, el mineral se concentra y sale en las espumas, mientras que la ganga sale descargada en la cola (Yianatos, 2005).

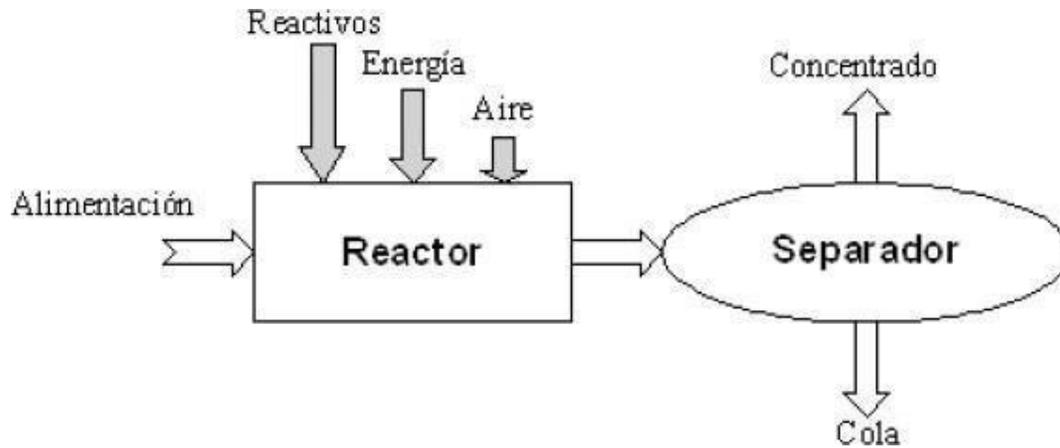


Figura 10. Diseño conceptual del proceso

Fuente: (Yianatos, 2005)

### 3.4.3 Química del proceso

La flotación busca que el proceso genere máxima recuperación en equilibrio con una buena selectividad. Esto depende de tres factores principales: la dosificación de reactivos, la química de la superficie (reacción partícula con el colector) y el nivel de liberación del mineral (Yianatos, 2005).

### 3.4.4 Cinética del proceso

La cinética de flotación estudia la velocidad con la que se lleva a cabo la flotación mediante modelos matemáticos, el cual permite obtener la variante del contenido metálico que se recupera en el concentrado, en relación con el tiempo y otros parámetros cinéticos (Vilca, 2019).

### 3.4.5 Modelo de Agar y Barret

El objetivo de este modelo radica en definir el tiempo ideal de flotación y los indicadores necesarios para conocer qué recuperación es posible alcanzar en lapso establecido (Vilca, 2019).

$$R(t) = R_{\infty} [ 1 - e^{-k(t+\theta)} ]$$

$\Theta$ : parámetro que permite que la curva ajustada pase por el origen

t: tiempo de flotación

R: recuperación límite a tiempo infinito

K: constante de cinética de flotación

R (t): recuperación estimada (%)

### 3.4.6 Generalidades en la flotación de molibdenita

La primera recuperación exitosa de molibdenita como subproducto de un yacimiento de cobre pórfido a gran escala fue realizada en Kennecott Copper Corporation, en Utah, en 1936. En los yacimientos de cobre pórfido, la molibdenitase depositó en estos cuerpos, en una época diferente a la del cobre; por lo tanto, la distribución de ambos elementos no tiene relación directa y el contenido de Mo fluctúa entre 0.01 a 0.06 % (Castro, 1979).

Tabla 14. Composición de los concentrados cleaner de operaciones seleccionadas

| Operación     | %Cu | %Mo  | %Fe | %S   | %Insol. |
|---------------|-----|------|-----|------|---------|
| Mission       | 28  | 1.0  | 27  | 30   | 7       |
| Silver Bell   | 30  | 0.45 | 24  | N.A. | 8       |
| McGill        | 19  | 0.15 | 32  | N.A. | 10      |
| Morenci       | 22  | 0.14 | 29  | 38   | 8       |
| Copper Cities | 26  | 0.28 | 27  | 32   | 12      |
| Twin Buttes   | 29  | 1.1  | 28  | N.A. | 7       |
| Pima          | 26  | 0.2  | 27  | 30   | 11      |
| Sierrita      | 25  | 2.5  | 26  | 31   | 7       |
| Chuquicamata  | 45  | 1.7  | 16  | 28   | 4       |
| El Teniente   | 42  | 0.6  | 17  | 28   | 10      |
| El Salvador   | 46  | 0.8  | 17  | 28   | 5       |

Fuente: (Sutulov, 1965)

Actualmente, se aplica la siguiente tecnología estándar en la mayoría de operaciones mineras activas alrededor del mundo:

- Chancado y molienda para la liberación metalúrgica.
- Flotación *bulk* para separación de los sulfuros de los minerales de la ganga.
- Flotación diferencial del Mo.

- Eliminación de impurezas para mejorar el grado del concentrado de Mo.

### 3.4.7 Recuperación primaria de molibdeno

La flotación se realiza en un medio alcalina que es previamente regulado con cal, la cual sirve para deprimir la pirita en la flotación primaria. El pH suele tener un valor entre 8 a 11 durante la flotación primaria, como producto se obtiene un concentrado *bulk* Cu-Mo que contiene un valor promedio de Mo que varía entre 0.2 a 1 % (Castro, 1979). Las grandes pérdidas de Mo se dan en esta etapa del proceso. Las razones se detallan a continuación:

- La falta de liberación, debido a que se hace una liberación óptima para el Cu y no para el Mo, pues no sería económicamente factible.
- Las grandes laminillas que contienen Mo pueden llegar a flotar, pero difícilmente se mantienen en las celdas columna.
- La oxidación superficial y la existencia de recubrimiento de especies oxidadas de Mo.
- El pH y el efecto depresor que presenta la cal sobre la molibdenita.
- Flotación selectiva de Mo

En la mayoría de plantas concentradoras, la separación selectiva de Cu y Mo se realiza por depresión de Cu y Fe. Existen algunas excepciones, en donde se deprime el Mo con reactivos como el almidón (Castro, 1979). Los principales depresores de los sulfuros de Cu y Fe que se emplean se detallan en la Tabla 14.

Tabla 15. Principales depresores de sulfuros de Cu y Fe

| Nombre                    | Fórmula química   |
|---------------------------|---|
| Ferricianuro              | $[\text{Fe}(\text{CN})_6]^{3-}$                           |
| Ferricianuro de sodio     | $[\text{Fe}(\text{CN})_6]^{4-}$                           |
| Reactivo de Nokes         | $\text{P}_2\text{S}_5$ disuelto en NaOH                   |
| Anamol-D o Nokes Arsénico | $\text{As}_2\text{O}_3$ disuelto en $\text{Na}_2\text{S}$ |
| Sulfuro de sodio          | $\text{Na}_2\text{S}$                                     |
| Sulfhidrato de sodio      | $\text{NaHS}$   |
| Sulfuro de amonio         | $(\text{NH}_4)_2\text{S}$                                 |
| Cianuro de sodio          | $\text{NaCN}$   |

Fuente: (Castro, 1979)



Figura 11. Fotografía de las burbujas de molibdeno en su recuperación primaria.

Fuente: (The International Molybdenum Association, 1998)

### 3.4.8 Procedimientos especiales

En algunas plantas concentradoras, se usan procedimientos adicionales para remover el colector de la superficie del mineral o alterarlo para que se vuelva inefectivo. A continuación, se mencionan algunos de los principales procedimientos especiales:

- Tratamiento con vapor de agua.
- Tostación.
- Calentamiento de la pulpa.
- Acondicionamiento con ácido y peróxido de hidrógeno.
- Acondicionamiento con hipoclorito de sodio.
- Simple envejecimiento de la pulpa (Castro, 1979).

### 3.4.9 Estructura y flotabilidad natural

La molibdenita presenta una estructura hexagonal, donde se puede reconocer la presencia de capas poliédricas junto a prismas trigonales, donde un prisma trigonal de átomos de S rodea un átomo de Mo. La estructura cristalina del  $\text{MoS}_2$  presenta enlaces covalentes entre átomos Mo-S, cuya ruptura genera la superficie

denominada “borde” y enlaces de van der Waals entre capas de S-Mo-S, cuyas rupturas generan la superficie denominada “cara” (López y Reyes, 2005).

En la publicación realizada por López y Reyes (2005), se señaló que la cara presenta características hidrofóbicas, que se dan debido al rompimiento de cristales a lo largo de las caras que crean superficies que no son polares, con una energía superficial reducida, las cuales manifiestan poca correlación con líquidos que presentan alta energía superficial como el agua. El borde presenta características hidrofílicas, puesto que la ruptura de cristales que se da en esta zona forma campos polares, los cuales, a un nivel químico, son activos con el agua y forma tiomolibdatos, como  $\text{HMoO}_4^+$  y  $\text{MoO}_4^-$ . La relación cara/borde en las partículas de  $\text{MoS}_2$  determina su flotabilidad: cuando el tamaño de la partícula es elevado, también lo es la relación entre la cara y el borde y la hidrofobicidad de esta, por ende, mayores sus probabilidades de flotar.

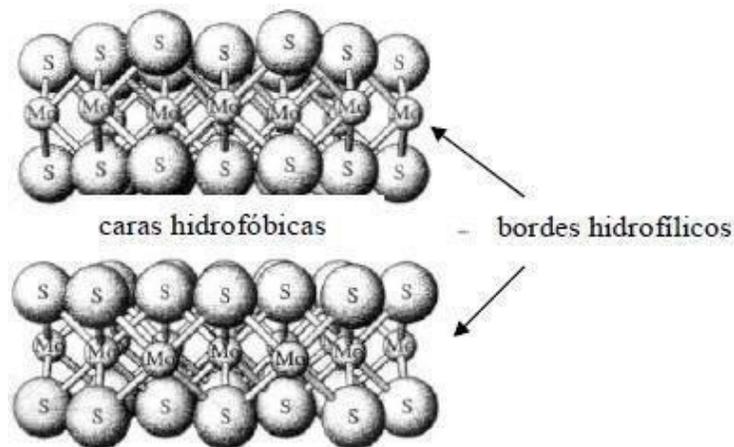


Figura 12. Estructura cristalina de la molibdenita con sus caras hidrofóbicas y bordes hidrofílicos

Fuente: (López y Reyes, 2005)

En los estudios realizados por Madrid (2005), el potencial electrocinético o potencial zeta está sujeto a la relación la cara entre el borde: mientras mayor sea el vínculo cara/borde, el potencial zeta se reduce.

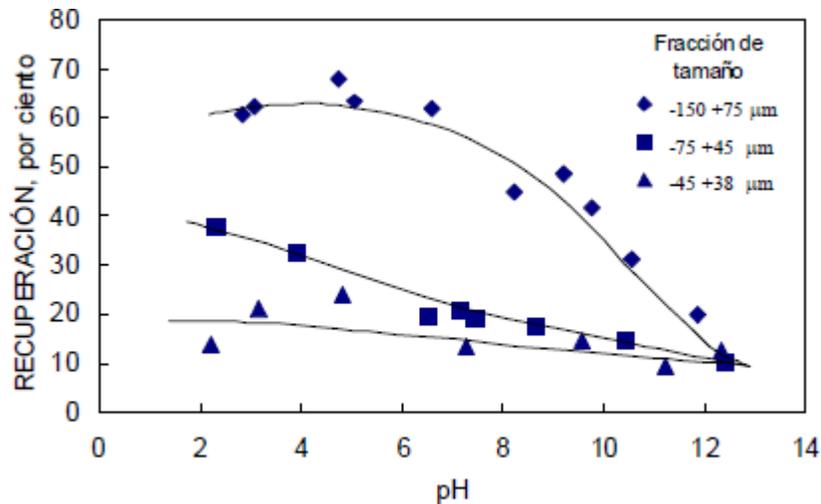


Figura 13. Flotabilidad de molibdenita a diferentes tamaños en función del pH

Fuente: (Madrid Ortega, 2005)

#### 3.4.10 Separación en pórfidos de cobre-molibdeno

Aproximadamente, el 50 % de la producción mundial de Mo viene de minas Cu- Mo, donde se obtiene como producto secundario. La flotabilidad del Mo durante la flotación de Cu depende de muchos factores, incluido el tipo de colector, espumante, pH y el aceite hidrocarburo usado. Durante la flotación primaria, se puede añadir gasolina o kerosene en la molienda para mejorar la recuperación del Mo, pero interfieren con la formación de espumas, por lo que se evita su uso. En su lugar, los aceites de hidrocarburo son añadidos usualmente en la etapa de separación Cu-Mo (Bulatovic, 2007). De esta manera, El efecto de varios hidrocarburos ha sido extensamente estudiado en la flotación *bulk* de Cu-Mo y en la separación del Cu-Mo. Algunas conclusiones de estas investigaciones se explican a continuación:

- La alta viscosidad del petróleo, como Cornea 21, aceite en vapor SunrayDX y Texaco no. 539, dieron una alta recuperación de Mo, con una recuperación ligeramente menor de MoS<sub>2</sub> comparado con los aceites de bajaviscosidad. En contraste, los aceites de baja viscosidad fueron

recuperaciones más bajas que los de alta viscosidad, pero un grado de concentrado más alto (Bulatovic, 2007).

- La recuperación de Mo, tanto en la flotación Cu-Mo como en la separación de MoS<sub>2</sub>, depende mucho del tipo de espumante usado. Los datos de plantas operativas y los estudios de laboratorio han indicado que los alcoholes aromáticos y alcoxi parafinas dan una mejor recuperación de MoS<sub>2</sub> que el alcohol puro o el glicol (Bulatovic, 2007).

Tabla 16. Efecto del tipo de combustible en el grado y recuperación rougher de molibdeno para adiciones de 80 g/t de combustible

| Tipo de combustible                   | Viscosidad a 35 °C | Ensayos de % MoS <sub>2</sub> | % recuperación MoS <sub>2</sub> |
|---------------------------------------|--------------------|-------------------------------|---------------------------------|
| Kerosene                              | 1.32               | 14.1                          | 81                              |
| Combustible almacenado                | 1.85               | 10.2                          | 84                              |
| Combustible de flotación royalite     | 1.85               | 11.3                          | 84                              |
| Solvente E407                         | 1.87               | 11.0                          | 83                              |
| Dieseline                             | 2.23               | 12.8                          | 83                              |
| Combustible ligero de horno           | 3.39               | 11.0                          | 84                              |
| CCLGO sin tratar                      | 3.39               | 10.8                          | 85                              |
| Pella 911                             | 7.23               | 11.4                          | 86                              |
| Ondina 17                             | 16.70              | 8.8                           | 89                              |
| Carnea 21                             | 22                 | 10.1                          | 87                              |
| Combustible vapor Sunray DX           | 22                 | 11.3                          | 86                              |
| Texaco no. 539                        | 22.20              | 11.1                          | 86                              |
| 100/100 <i>stock</i> de motor         | 22.30              | 11.0                          | 86                              |
| HVI pálido 100/100                    | 22.90              | 9.8                           | 87                              |
| 50:50 combustible ligera de horno     | 17.50              | 10.3                          | 87                              |
| Combustible pálido 90/210             | 17.90              | 10.5                          | 88                              |
| 50/50 mix combustible ligero de horno | 18.80              | 9.1                           | 86                              |
| L50/210 HVI bight stock               | 24.90              | 8.4                           | 91                              |

Fuente: (Bulatovic, 2007)

### 3.4.11 Métodos principales de separación

La separación Cu-Mo es considerada como un proceso relativamente complejo, puesto que se supedita a la naturaleza y la forma en la que se compone del concentrado *bulk* Cu-Mo. Algunos de los parámetros más importantes que influyen en la selección de las técnicas de separación *bulk* Cu-Mo son:

- Tipo de colector usado en la flotación *bulk* Cu-Mo. Si se usa el xantato, la desorción de este colector desde la superficie del mineral se logra, con  $\text{Na}_2\text{S}$  o  $\text{NaHS}$ . La desorción no siempre puede lograrse, así que se puede usar otra técnica alternativa.
- Tipo de mineral de Cu presente en el concentrado *bulk*. En el caso de la calcopirita, esta se presenta como mineral primario de cobre, el método de separación envuelve el uso de  $\text{Na}_2\text{S}$  o  $\text{NaHS}$ . Si el concentrado de Cu es calcocita u otros minerales como la bornita, covelita, digenita, etc., entonces, se usa otro método disponible.
- Las impurezas contenidas en el concentrado *bulk* también juegan un rol fundamental cuando se escoge una metodología adecuada para la disociación de Cu-MoS<sub>2</sub>. El concentrado *bulk* puede contener impurezas como oro, plata, zinc y ganga flotante sin sulfuro. Para expulsar estas impurezas, se emplean diferentes tipos de depresores (Bulatovic, 2007).

Existen un número de métodos de separación Cu-Mo disponibles que han sido practicados en plantas operativas alrededor del mundo. Los métodos más conocidos son los siguientes:

- Método de tostación:

La tostación oxidante del concentrado *bulk* de Cu-MoS<sub>2</sub>, a temperaturas entre 250 a 450 °C. El concentrado tostado es repulpeado y el Mo es flotado usando algún aceite y espumante. En algunos casos, la ganga silíceo es flotada delante del Mo, al emplear un colector catiónico. Este método es conocido como “El proceso Utah” (Bulatovic, 2007).

- Tratamiento de vapor:

El Cu-MoS<sub>2</sub> es espesado en un 45 a 65 % de sólidos. La pulpa espesada es acondicionada con cal a un pH que va de 11 a 11.5, por un tiempo alrededor de treinta minutos a una hora, seguido de un tratamiento de vapor por una a cuatro horas. La temperatura de la pulpa se mantiene cerca a la de ebullición. Luego del calentamiento, la pulpa es aireada (etapa de enfriamiento), hasta que la temperatura alcanza los 30 a 35 °C. Luego de la aeración, la pulpa es diluida a un porcentaje de sólidos de 15 a 25 % y el Mo es flotado usando espumante y aceite. Después, pasa por una etapa de limpieza para obtener el grado deseado. Otra variación de este procedimiento es que el concentrado *rougher* de MoS<sub>2</sub> es secado y tostado a una temperatura de 300 a 400 °C, y el MoS<sub>2</sub> es refltado (Bulatovic, 2007).

- Método de Ferrocianuro Na<sub>4</sub>Fe(CN)<sub>6</sub>:

Hay muchas variedades de este método, que ha evolucionado desde el método básico y ha sido adaptado para varias plantas. El método básico involucra una deshidratación del concentrado, acondicionándolo con reactivos oxidantes, seguido por adiciones de ferrocianuro y flotación de MoS<sub>2</sub>. El NaCN también podría ser añadido en las etapas de limpieza. Otras variaciones de este método incluyen:

- El uso de hipoclorito de sodio o H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> + Na<sub>4</sub>Fe(CN)<sub>6</sub> y ácido sulfúrico para controlar el pH. El exfoam 636 (poliglicol modificado kerosene), gasolina y espumante son parte de este esquema de reactivos.
- El uso de dicromato, Na<sub>4</sub>Fe(CN)<sub>6</sub>. En este caso, el H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> es reemplazado con Na<sub>2</sub>Cr<sub>3</sub>O<sub>7</sub>, a pH ácido. El complejo de cianuro de zinc es parte de este esquema de reactivos.
- Na<sub>4</sub>Fe(CN)<sub>6</sub> + (NH<sub>4</sub>)<sub>2</sub> es usado en casos donde está presente Cu secundario (Bulatovic, 2007).

- Método de Nokes:

El fosfato ORLR 744 se forma cuando el P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> reacciona con el NaOH. El concentrado *bulk* es deshidratado antes de acondicionar con LR744. A veces, el

$(\text{NH}_4)_2\text{S}$  es usado en el preacondicionamiento. El cianuro de sodio es usado también en las etapas finales de limpieza. En ciertos escenarios, es empleado con NaHS. El Nokes arsénico es una reacción producto de  $\text{As}_2\text{O}_3$  y  $\text{Na}_2\text{S}$ . Este depresor es usado solo o en combinación con NaCN o  $\text{Na}_4\text{Fe}(\text{CN})_6$  [Bulatovic, 2007].

- Método sulfuro:

Este método es el más ampliamente usado. Incluye la deshidratación del concentrado antes de acondicionar con  $\text{Na}_2\text{S}$  o NaHS. Otras combinaciones usadas con este depresor son:

- NaHS :  $(\text{NH}_4)_2\text{S}$  = 80:20 o 85:15
- NaHS +  $\text{Na}_2\text{Cr}_3\text{O}_7$
- NaHS +  $\text{NaZn}(\text{CN})_4$ , NaCN
- Vapor + NaHS
- Vapor +  $\text{Na}_2\text{S}$

El proceso de separación del sulfuro Cu-Mo es primariamente usado en el caso donde la calcopirita es el mineral primario. En algunos casos, en una combinación de calcopirita- bornita, el  $\text{Na}_2\text{S}$  es empleado preferentemente, en vez de NaHS. El reactivo de Nokes se usa solo en algunas plantas y ahora está siendo reemplazado por otros métodos. El fosfato Nokes es producido por la reacción de  $\text{P}_2\text{O}_5$  con NaOH:



Es preparado fácilmente, pero envuelve una operación peligrosa, pues puede producir gas de  $\text{Na}_2\text{S}$  de manera copiosa si la reacción escapa. El arsénico de Nokes (Anamol D) es preparado por la reacción de trióxido de arsénico con  $\text{Na}_2\text{S}$ , seguido de la siguiente reacción:



Se cree que las especies depresantes son  $\text{HS}^-$ , arseniato de sodio y una mezcla de mono-di- y tri-tioarsenato. Con el Anamol D, los iones  $\text{HS}^-$  tienen mayor importancia como depresores en comparación con los compuestos de arsénico, que pueden funcionar solo para inhibir el proceso de oxidación. En el fosfato de Nokes, hay un poco de concentración de iones  $\text{HS}^-$ , lo que manifiesta que los componentes de fósforo se responsabilizan de la depresión de sulfuros (Bulatovic, 2007). Por otro lado, se pueden encontrar depresores que también son usados durante la separación Cu-Mo. Algunos de los más conocidos son:

- El tioglicerol  $\text{HSCH}_2\text{CH}(\text{OH})\text{CH}_2\text{OH}$  es usado solo o en combinación con otros depresores.
- El xantato de cloro con la fórmula  $\text{R}_3\text{N}^+-\text{CH}_2-\text{CH}_2-\text{O}-\text{C}-\text{S}^-$  ha sido usado en varias plantas por períodos de tiempo cortos (Bulatovic, 2007).

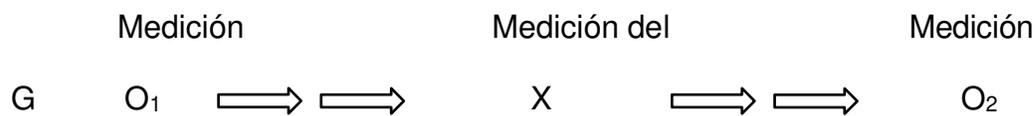
Otros procesos auxiliares en la mejora del Mo y la remoción de ganga no sulfurada incluyen la depresión del  $\text{MoS}_2$  y la flotación de ganga usando un colector catiónico. Algunos de estos depresores empleados tienen incluida la lignina sulfonato de amonio o la dextrina. La depresión selectiva del  $\text{MoS}_2$  también se logra con azul de metileno.

## CAPÍTULO IV. METODOLOGÍA Y CARACTERIZACIÓN

### 4.1 Tipo y diseño de investigación

En esta investigación, se lleva a cabo una investigación experimental, porque se aplican los experimentos y las bases que definen el método científico, dicho de otro modo, se emplean las nociones que existen del proceso de flotación, el cual es utilizado para evaluar la influencia de la temperatura, en la recuperación de Mo, en el proceso de flotación.

Por otro lado, la tesis tiene un carácter cuantitativo y deductivo, puesto que se manipularon, estudiaron e interpretaron las variables independientes y dependientes en todos los ensayos, mientras se tomó como fundamento las diversas teorías que se basan en la cuestión que es materia de estudio en esta tesis.



O<sub>1</sub>: procesos convencionales para la recuperación de Mo en el proceso de flotación.

X: aplicación del proceso en estudio de la tesis, con el fin de evaluar la influencia de la temperatura en la recuperación de Mo, en el procedimiento de flotación para un concentrado *bulk*.

O<sub>2</sub>: determinación de la influencia de la temperatura en la recuperación de Mo, en el procedimiento de flotación para un concentrado *bulk*.

### 4.2 Unidad de análisis

Esta tesis es efectuada en el distrito de Ilabaya, Tacna, debido a que es el espacio en el que se lleva a cabo y se reúnen los datos empleados en el estudio. Asimismo, se tienen en cuenta las comunidades aledañas.

### **4.3 Población de estudio**

La población que se estudia en esta tesis se compone por la muestra de concentrado *bulk*, obtenido de una planta concentradora ubicada en el distrito de Ilabaya. Los análisis del estudio y las pruebas metalúrgicas fueron ejecutados dentro de los laboratorios; mientras que la caracterización del mineral, en el laboratorio químico que lleva a cabo labores de soporte para la planta concentradora.

### **4.4 Tamaño de muestra**

En esta tesis, se evaluó una cantidad de 4459.5 g de concentrado *bulk*, con el propósito que fuese la medida para las muestras empleadas en los análisis necesarios. Con esta, fueron desarrolladas las diversas pruebas de flotación a diferentes temperaturas, las cuales hacen parte de la ejecución del estudio.

### **4.5 Selección de muestra**

Una vez obtenida la muestra representativa de 4459.5 g, fue trasladada al laboratorio, donde se homogenizó y se realizó el acondicionamiento de la muestra y la medición de los principales parámetros. Esta muestra se utilizó para las cuatro pruebas metalúrgicas en esta tesis.

### **4.6 Procedimiento metodológico de la investigación**

El método se detalla a continuación:

- Búsqueda de datos bibliográficos acerca del problema del análisis.
- Obtención de una muestra representativa del material que se estudia (concentrado *bulk* proveniente de una flotación *bulk* Cu-Mo).
- La muestra representativa en pulpa se envía al laboratorio químico para adquirir un reporte de leyes de Cu, Mo y Fe.
- Pruebas de flotación diferencial a nivel laboratorio, previo acondicionamiento y calentamiento de pulpa.

- Se envía una muestra del concentrado obtenido al laboratorio químico, para que se le apliquen ensayos de microscopía y obtener la caracterización mineralógica.
- Ejecutar los balances metalúrgicos correspondientes a cada prueba realizada.
- Con base en los hallazgos que se obtuvieron en laboratorio, proponer pruebas en planta.

#### 4.7 Análisis químico de la investigación

Se analizó una muestra correspondiente a la cabeza general de flotación, al tomar una muestra representativa del concentrado *bulk* Cu-Mo. Dicha muestra fue enviada al laboratorio químico para obtener los principales contenidos metálicos que ayudarán a llevar a cabo los balances metalúrgicos.

Tabla 17. Análisis químico de cabeza general de flotación

|              |       |
|--------------|-------|
| % Cu         | 25.47 |
| % Mo         | 2.24  |
| % Fe         | 27.20 |
| % Insolubles | 9.10  |

Fuente: elaboración propia

#### 4.8 Análisis mineralógico de la investigación

Se analizó una muestra correspondiente al concentrado final de Mo obtenido a partir de la herramienta de Microscopía Qemscan, para realizar una caracterización mineralógica y estudiar la liberación conseguida. En la Tabla 17, están expuestos los minerales que se observaron y el tipo de muestra a la que pertenecen.

Tabla 18. Análisis mineralógico del concentrado final

| Muestra               | Nombre           | Fórmula   |
|-----------------------|------------------|---|
| Sulfuros de Cu        | Calcopirita      | $\text{CuFeS}_2$  |
|                       | Calcosina        | $\text{Cu}_2\text{S}$   |
|                       | Covelita         | $\text{CuS}$  |
|                       | Bornita          | $\text{Cu}_5\text{FeS}_4$   |
| Otros minerales de Cu | Cu/Micas         | —   |
|                       | Otros            | —   |
| Sulfuros de Cu-As-Sb  | Tetraedrita      | $(\text{Cu, Fe})_{12}\text{Sb}_4\text{S}_{13}$  |
|                       | Enargita         | $\text{Cu}_3\text{AsS}_4$   |
| Pirita                | Pirita           | $\text{FeS}_2$  |
| Molibdenita           | Molibdenita      | $\text{MoS}_2$  |
| Otros sulfuro         | Arsenopirita     | $\text{FeAsS}$  |
|                       | Realgar          | $\text{As}_4\text{S}_4$   |
|                       | Galena           | $\text{PbS}$  |
|                       | Esfalerita       | $\text{ZnS}$  |
| Ganga dura            | Cuarzo           | $\text{SiO}_2$  |
|                       | K Feldespato     | $\text{KAlSi}_3\text{O}_8$  |
|                       | Plagioclasa      | $(\text{Na, Ca})(\text{Si, Al})_3\text{O}_8$  |
|                       | Turmalina        | $(\text{Na, Ca})(\text{Al, Fe, Li})(\text{Al, Mg, Mn})_6(\text{BO}_3)_3(\text{Si}_6\text{O}_{18}) \cdot (\text{OH, F})_4$ |
|                       | Óxido de Fe      | $\text{Fe}_2\text{O}_3$   |
|                       | Magnetita        | $\text{Fe}_3\text{O}_4$   |
|                       | Siderita         | $\text{FeCO}_3$   |
|                       | Ganga lodosa     | Muscovita/sericita  |
| Biotita               |                  | $\text{K}(\text{Mg, Fe})_3\text{AlSi}_3\text{O}_{10}(\text{OH, F})_2$   |
| Clorita               |                  | $(\text{Mg, Fe})_3(\text{Si, Al})_4\text{O}_{10}(\text{OH})_2 \cdot (\text{Mg, Fe})_3(\text{OH})_6$                       |
| Caolinita             |                  | $\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$   |
| Talco                 |                  | $\text{Mg}_3\text{Si}_4\text{O}_{10}(\text{OH})_2$  |
| Pirofillita           |                  | $\text{Al}_2\text{Si}_4\text{O}_{10}(\text{OH})_2$  |
| Esmectita             |                  | —   |
| Alunita               |                  | $\text{KAl}_3(\text{SO}_4)_2(\text{OH})_6$  |
| Anhidrita             |                  | $\text{CaSO}_4$   |
| Yeso                  |                  | $\text{CaSO}_4 \cdot 2(\text{H}_2\text{O})$   |
| Otros                 | Anfíbol/piroxeno | —   |
|                       | Calcita          | $\text{CaCO}_3$   |
|                       | Otros            | —   |

Fuente: elaboración propia

#### 4.9 Distribución volumétrica porcentual

La distribución porcentual de los minerales mencionados se da de la siguiente manera:

Tabla 19. Distribución porcentual mineralógica

| Muestra               | Nombre             | Volumen porcentual |
|-----------------------|--------------------|--------------------|
| Sulfuros de Cu        | Calcopirita        | 1.27               |
|                       | Calcosina          | 0.32               |
|                       | Covelita           | 0.14               |
|                       | Bornita            | < 0.1              |
| Otros minerales de Cu | Cu/Micas           | < 0.1              |
|                       | Otros              | 0.84               |
| Sulfuros de Cu-As-Sb  | Tetraedrita        | < 0.1              |
|                       | Enargita           | < 0.1              |
| Pirita                | Pirita             | 2.24               |
| Molibdenita           | Molibdenita        | 88.89              |
| Otros sulfuros        | Arsenopirita       | < 0.1              |
|                       | Realgar            | 0.24               |
|                       | Galena             | < 0.1              |
| Ganga dura            | Esfalerita         | 0.60               |
|                       | Cuarzo             | 1.49               |
|                       | K Feldespato       | < 0.1              |
|                       | Plagioclasa        | < 0.1              |
|                       | Turmalina          | < 0.1              |
|                       | Óxido de Fe        | < 0.1              |
|                       | Magnetita          | < 0.1              |
|                       | Siderita           | < 0.1              |
| Ganga lodosa          | Muscovita/sericita | 0.75               |
|                       | Biotita            | < 0.1              |
|                       | Clorita            | 1.46               |
|                       | Caolinita          | 0.11               |
|                       | Talco              | < 0.1              |
|                       | Pirofilita         | 0.45               |
|                       | Esmectita          | 0.22               |
|                       | Alunita            | < 0.1              |
|                       | Anhidrita          | < 0.1              |
|                       | Yeso               | 0.37               |
| Otros                 | Anfíbol/piroxeno   | < 0.1              |
|                       | Calcita            | < 0.1              |
|                       | Otros              | 0.18               |

Fuente: elaboración propia

#### 4.10 Grados de liberación

Los grados de liberación se expresan de la siguiente forma:

Tabla 20. Grados de liberación

| Concentrado Final Mo         |              |         |
|------------------------------|--------------|---------|
| Liberación de sulfuros de Cu | Liberado     | 43.58 % |
|                              | Medios       | 20.97 % |
|                              | Encapsulados | 35.45 % |
| Liberación de pirita         | Liberado     | 45.78 % |
|                              | Medios       | 30.91 % |
|                              | Encapsulados | 23.31 % |
| Liberación de molibdenita    | Liberado     | 94.96 % |

---

|              |        |
|--------------|--------|
| Medios       | 4.94 % |
| Encapsulados | 0.41 % |

---

Fuente: elaboración propia

#### **4.11 Interpretación de los grados de liberación de los principales minerales**

De las tablas 18 y 19, se puede deducir la siguiente interpretación: los sulfuros de Cu ocupan un total del 1.73 % de la muestra. De este volumen, el 43.58 % está libre, en cambio, el 20.97 % se dispone como medio y el 35.45 % está encapsulado, debido a los entrelazamientos que presentan y una remolienda insuficiente en procesos anteriores.

La pirita ocupa un 2.24 % de la muestra; de la cual, el 45.78 % se encuentra liberado, mientras que el 30.91 % se halla como medios y el 23.31 % está encapsulado, debido a los entrelazamientos que presentan y una remolienda insuficiente en procesos anteriores.

La molibdenita ocupa un 88.89 % del total de la muestra. De este volumen, el 94.96 % se encuentra liberado, mientras que el 4.94 % se presenta como medios y el 0.41 % está encapsulado, debido a que en procesos anteriores no resulta conveniente aplicar procedimientos de reducción de tamaño para liberar molibdenita hasta el tamaño adecuado, pues esto ocasionaría una molienda excesiva en los minerales de Cu y habría mucha presencia de finos.

## CAPÍTULO V. PRUEBAS EXPERIMENTALES

### 5.1 Pruebas de flotación del concentrado bulk

Las pruebas se realizaron al tener una muestra del concentrado *bulk* Cu-Mo, este concentrado alimenta la planta de separación Cu-Mo, donde se deprime cobre y se flota molibdeno por medio de una flotación diferencial. En la Tabla 20, están los valores de la operación, en promedio, para las variables constantes y en las tablas 21, 23, 25 y 27, los balances metalúrgicos para todas pruebas realizadas.

Cabe mencionar que los valores de temperatura seleccionados para las pruebas fueron usados bajo recomendación del laboratorio metalúrgico, así como la regulación de parámetros se controló constantemente con los instrumentos adecuados.

### 5.2 Condiciones de la prueba

Tabla 21. Condiciones de la prueba de flotación

| Peso de la muestra para cada prueba |                   | 1115 gr |
|-------------------------------------|-------------------|---------|
| pH                                  | 9.03              |         |
| Tiempo de acondicionamiento         | 2 min             |         |
| Tiempo de flotación                 | 8 min             |         |
| NaSH                                | 6.3 ml            |         |
| ORP                                 | - 469.75          |         |
| Temperatura                         | 23, 40, 55, 70 °C |         |
| Granulometría                       | 30 µm             |         |
| RPM                                 | 1400              |         |

Fuente: elaboración propia

### 5.3 Resultados de la flotación para una temperatura de 23 °C

Tabla 22. Balance metalúrgico de flotación para una temperatura de 23 °C

| 23 °C             |               |              |             |              |                        |                        |                        |
|-------------------|---------------|--------------|-------------|--------------|------------------------|------------------------|------------------------|
| Tiempo            | % peso        | % ley de Cu  | % ley de Mo | % ley de Fe  | % recuperación real Cu | % recuperación real Mo | % recuperación real Fe |
| Tiempo 1'         | 7.15          | 20.13        | 19.400      | 17.13        | 0.05                   | 0.63                   | 0.04                   |
| Tiempo 2'         | 2.55          | 22.35        | 15.900      | 18.39        | 0.07                   | 0.81                   | 0.06                   |
| Tiempo 4'         | 2.10          | 25.67        | 10.330      | 20.85        | 0.09                   | 0.91                   | 0.08                   |
| Tiempo 8'         | 1.83          | 28.79        | 6.030       | 23.25        | 0.11                   | 0.96                   | 0.09                   |
| Cola              | 86.38         | 27.58        | 0.081       | 29.40        |                        |                        |                        |
| <b>Cab. Calc.</b> | <b>100.00</b> | <b>26.90</b> | <b>2.19</b> | <b>27.95</b> |                        |                        |                        |

Tabla 23. Resumen de resultados obtenidos 1.<sup>a</sup> prueba

| % Cu en concentrado | % Mo en concentrado | % Fe en concentrado | Recuperación peso Cu | Recuperación peso Mo | Recuperación peso Fe |
|---------------------|---------------------|---------------------|----------------------|----------------------|----------------------|
| 22.56               | 15.55               | 18.76               | 11.43                | 96.80                | 9.14                 |

Fuente: elaboración propia

### 5.4 Resultados de la flotación para una temperatura de 40 °C

Tabla 24. Balance metalúrgico de flotación para una temperatura de 40 °C

| 40 °C             |               |              |             |              |                        |                        |                        |
|-------------------|---------------|--------------|-------------|--------------|------------------------|------------------------|------------------------|
| Tiempo            | % peso        | % ley de Cu  | % ley de Mo | % ley de Fe  | % recuperación real Cu | % recuperación real Mo | % recuperación real Fe |
| Tiempo 1'         | 3.97          | 11.58        | 35.30       | 9.71         | 0.02                   | 0.60                   | 0.01                   |
| Tiempo 2'         | 2.33          | 15.40        | 27.07       | 12.91        | 0.03                   | 0.88                   | 0.02                   |
| Tiempo 4'         | 0.91          | 21.44        | 15.32       | 18.09        | 0.04                   | 0.94                   | 0.03                   |
| Tiempo 8'         | 1.05          | 25.67        | 7.72        | 21.64        | 0.05                   | 0.97                   | 0.04                   |
| Cola              | 91.75         | 27.88        | 0.07        | 29.10        |                        |                        |                        |
| <b>Cab. Calc.</b> | <b>100.00</b> | <b>26.86</b> | <b>2.32</b> | <b>27.78</b> |                        |                        |                        |

Fuente: elaboración propia

Tabla 25. Resumen de resultados obtenidos 2.<sup>a</sup> prueba

| % Cu en concentrado | % Mo en concentrado | % Fe en concentrado | Recuperación peso Cu | Recuperación peso Mo | Recuperación peso Fe |
|---------------------|---------------------|---------------------|----------------------|----------------------|----------------------|
| 15.53               | 27.27               | 13.05               | 4.77                 | 97.15                | 3.88                 |

Fuente: elaboración propia

### 5.5 Resultados de la flotación para una temperatura de 55 °C

Tabla 26. Balance metalúrgico de flotación para una temperatura de 55 °C

| 55 °C             |               |              |             |              |                        |                        |                        |
|-------------------|---------------|--------------|-------------|--------------|------------------------|------------------------|------------------------|
| Tiempo            | % peso        | % ley de Cu  | % ley de Mo | % ley de Fe  | % recuperación real Cu | % recuperación real Mo | % recuperación real Fe |
| Tiempo 1'         | 3.25          | 9.26         | 39.55       | 7.76         | 0.01                   | 0.55                   | 0.01                   |
| Tiempo 2'         | 1.42          | 11.27        | 34.80       | 9.35         | 0.02                   | 0.76                   | 0.01                   |
| Tiempo 4'         | 1.38          | 16.00        | 25.34       | 13.38        | 0.03                   | 0.91                   | 0.02                   |
| Tiempo 8'         | 1.25          | 23.55        | 11.45       | 19.63        | 0.04                   | 0.97                   | 0.03                   |
| Cola              | 92.70         | 27.78        | 0.09        | 29.32        |                        |                        |                        |
| <b>Cab. Calc.</b> | <b>100.00</b> | <b>26.73</b> | <b>2.36</b> | <b>27.99</b> |                        |                        |                        |

Fuente: elaboración propia

Tabla 27. Resumen de resultados obtenidos 3.<sup>a</sup> prueba

| % Cu en concentrado | % Mo en concentrado | % Fe en concentrado | Recuperación peso Cu | Recuperación peso Mo | Recuperación peso Fe |
|---------------------|---------------------|---------------------|----------------------|----------------------|----------------------|
| 13.37               | 31.14               | 11.16               | 3.65                 | 96.77                | 2.91                 |

Fuente: elaboración propia

## 5.6 Resultados de la flotación para una temperatura de 70 °C

Tabla 28. Balance metalúrgico de flotación para una temperatura de 70 °C

| 70 °C             |               |              |             |              |                        |                        |                        |
|-------------------|---------------|--------------|-------------|--------------|------------------------|------------------------|------------------------|
| Tiempo            | % peso        | % ley de Cu  | % ley de Mo | % ley de Fe  | % recuperación real Cu | % recuperación real Mo | % recuperación real Fe |
| Tiempo 1'         | 3.08          | 9.26         | 39.76       | 7.66         | 0.01                   | 0.52                   | 0.01                   |
| Tiempo 2'         | 1.52          | 11.17        | 34.81       | 9.40         | 0.02                   | 0.74                   | 0.01                   |
| Tiempo 4'         | 1.34          | 15.10        | 26.50       | 12.77        | 0.02                   | 0.89                   | 0.02                   |
| Tiempo 8'         | 1.20          | 21.74        | 13.89       | 18.10        | 0.03                   | 0.96                   | 0.03                   |
| Cola              | 92.86         | 27.68        | 0.10        | 28.92        |                        |                        |                        |
| <b>Cab. Calc.</b> | <b>100.00</b> | <b>26.62</b> | <b>2.36</b> | <b>27.62</b> |                        |                        |                        |

Tabla 29. Resumen de resultados obtenidos 4.<sup>a</sup> prueba

| % Cu en concentrado | % Mo en concentrado | % Fe en concentrado | Recuperación peso Cu | Recuperación peso Mo | Recuperación peso Fe |
|---------------------|---------------------|---------------------|----------------------|----------------------|----------------------|
| 12.87               | 31.86               | 10.75               | 3.45                 | 96.46                | 2.78                 |

Fuente: elaboración propia

## 5.7 Resultados obtenidos y estimados mediante “Agar y Barret”

Mediante el uso del método de Agar y Barret, se calculó la recuperación estimada.

### 5.7.1 Resultados obtenidos y estimados a 23° C

Tabla 30. Recuperación real y estimada de Mo a 23 °C

| Tiempo | Peso (g) | % peso | % ley de Mo | Contenido metálico Mo | Contenido Metálico Mo Acumulado | % recuperación de Mo real | % recuperación de Mo estimada | Error     |
|--------|----------|--------|-------------|-----------------------|---------------------------------|---------------------------|-------------------------------|-----------|
| 1      | 80.00    | 7.15   | 19.400      | 15.520                | 15.520                          | 0.631                     | 0.636                         | 0.0000250 |
| 2      | 28.50    | 2.55   | 15.900      | 4.532                 | 20.052                          | 0.815                     | 0.811                         | 0.0000152 |
| 4      | 23.50    | 2.10   | 10.330      | 2.428                 | 22.479                          | 0.914                     | 0.930                         | 0.0002653 |
| 8      | 20.50    | 1.83   | 6.030       | 1.236                 | 23.715                          | 0.964                     | 0.961                         | 0.0000087 |

---

|       |         |        |       |       |        |       |           |
|-------|---------|--------|-------|-------|--------|-------|-----------|
| Cola  | 967.00  | 86.38  | 0.092 | 0.890 | 24.605 | 1.000 |           |
| Total | 1119.50 | 100.00 | 2.20  | 24.60 |        |       | 0.0003142 |

---

Fuente: elaboración propia

Tabla 31. Resumen de datos usados para la recuperación estimada por “Agar y Barret” a 23 °C

| Mo                   |          |
|----------------------|----------|
| Error                | 0.00031  |
| K                    | 0.76919  |
| Ra                   | 0.96239  |
| Teta                 | 0.40487  |
| Grado de concentrado | 15.55095 |
| Cabeza calculada     | 2.19784  |

Fuente: elaboración propia

### 5.7.2 Resultados obtenidos y estimados a 40 °C

Tabla 32. Recuperación real y estimada de Mo a 40 °C

| Tiempo | Peso (g) | % peso | % ley de Mo | Contenido metálico Mo | Contenido metálico Mo acumulado | % recuperación de Mo real | % recuperación de Mo estimada | Error     |
|--------|----------|--------|-------------|-----------------------|---------------------------------|---------------------------|-------------------------------|-----------|
| 1      | 43.50    | 3.97   | 35.300      | 15.356                | 15.356                          | 0.604                     | 0.623                         | 0.0003300 |
| 2      | 25.50    | 2.33   | 27.070      | 6.903                 | 22.258                          | 0.876                     | 0.845                         | 0.0009699 |
| 4      | 10.00    | 0.91   | 15.320      | 1.532                 | 23.790                          | 0.936                     | 0.953                         | 0.0002686 |
| 8      | 11.50    | 1.05   | 7.720       | 0.888                 | 24.678                          | 0.971                     | 0.968                         | 0.0000093 |
| Cola   | 1006.00  | 91.75  | 0.072       | 0.724                 | 25.423                          | 1.000                     |                               |           |
| Total  | 1096.50  | 100.00 | 2.32        | 25.40                 |                                 |                           |                               | 0.0015778 |

Fuente: elaboración propia

Tabla 33. Resumen de datos usados para la recuperación estimada por “Agar y Barret” a 40 °C

| Mo                   |          |
|----------------------|----------|
| Error                | 0.00158  |
| K                    | 1.02938  |
| Ra                   | 0.96870  |
| Teta                 | 0.00000  |
| Grado de concentrado | 27.26867 |
| Cabeza calculada     | 2.31669  |

Fuente: elaboración propia

### 5.7.3 Resultados obtenidos y estimados a 55 °C

Tabla 34. Recuperación real y estimada de Mo a 55 °C

| Tiempo | Peso (g) | % peso | % ley de Mo | Contenido metálico Mo | Contenido metálico Mo acumulado | % recuperación de Mo real | % recuperación de Mo estimada | Error     |
|--------|----------|--------|-------------|-----------------------|---------------------------------|---------------------------|-------------------------------|-----------|
| 1      | 36.50    | 3.25   | 39.550      | 14.436                | 14.436                          | 0.547                     | 0.547                         | 0.0000000 |
| 2      | 16.00    | 1.42   | 34.800      | 5.568                 | 20.004                          | 0.758                     | 0.752                         | 0.0000378 |
| 4      | 15.50    | 1.38   | 25.340      | 3.928                 | 23.931                          | 0.907                     | 0.910                         | 0.0000100 |
| 8      | 14.00    | 1.25   | 11.450      | 1.603                 | 25.534                          | 0.968                     | 0.962                         | 0.0000314 |
| Cola   | 1041.00  | 92.70  | 0.082       | 0.926                 | 26.388                          | 1.000                     |                               |           |
| Total  | 1123.00  | 100.00 | 2.35        | 26.46                 |                                 |                           |                               | 0.0000792 |

Fuente: elaboración propia

Tabla 35. Resumen de datos usados para la recuperación estimada por “Agar y Barret” a 55 °C

| Mo                   |          |
|----------------------|----------|
| Error                | 0.00006  |
| K                    | 0.67213  |
| Ra                   | 0.96584  |
| Teta                 | 0.24271  |
| Grado de concentrado | 31.13957 |
| Cabeza calculada     | 2.34978  |

Fuente: elaboración propia

#### 5.7.4 Resultados obtenidos y estimados a 70 °C

Tabla 36. Recuperación real y estimada de Mo a 70 °C

| Tiempo | Peso (g) | % peso | % ley de Mo | Contenido metálico Mo | Contenido metálico Mo acumulado | % Recuperación de Mo real | % Recuperación de Mo estimada | Error     |
|--------|----------|--------|-------------|-----------------------|---------------------------------|---------------------------|-------------------------------|-----------|
| 1      | 34.50    | 3.08   | 39.760      | 13.717                | 13.717                          | 0.519                     | 0.521                         | 0.0000018 |
| 2      | 17.00    | 1.52   | 34.810      | 5.918                 | 19.635                          | 0.743                     | 0.735                         | 0.0000734 |
| 4      | 15.00    | 1.34   | 26.500      | 3.975                 | 23.610                          | 0.894                     | 0.902                         | 0.0000640 |
| 8      | 13.50    | 1.20   | 13.890      | 1.875                 | 25.485                          | 0.965                     | 0.958                         | 0.0000479 |
| Cola   | 1040.50  | 92.86  | 0.090       | 0.936                 | 26.422                          | 1.000                     |                               |           |
| Total  | 1120.50  | 100.00 | 2.36        | 26.42                 |                                 |                           |                               | 0.0001872 |

Fuente: elaboración propia

Tabla 37. Resumen de datos usados para la recuperación estimada por “Agar y Barret” a 70 °C

|                      | Mo       |
|----------------------|----------|
| Error                | 0.00019  |
| K                    | 0.66355  |
| Ra                   | 0.96188  |
| Teta                 | 0.17404  |
| Grado de concentrado | 31.85631 |
| Cabeza calculada     | 2.35801  |

Fuente: elaboración propia

## 5.8 Análisis de regresión con el uso del asistente de Minitab

Se realizó un análisis estadístico con el programa Minitab para las pruebas realizadas, con el fin de determinar la relación entre la temperatura y el efecto en la calidad del concentrado de Mo. El nivel de significancia es de  $\alpha = 0.05$ , lo cual indica un 95 % de confianza.

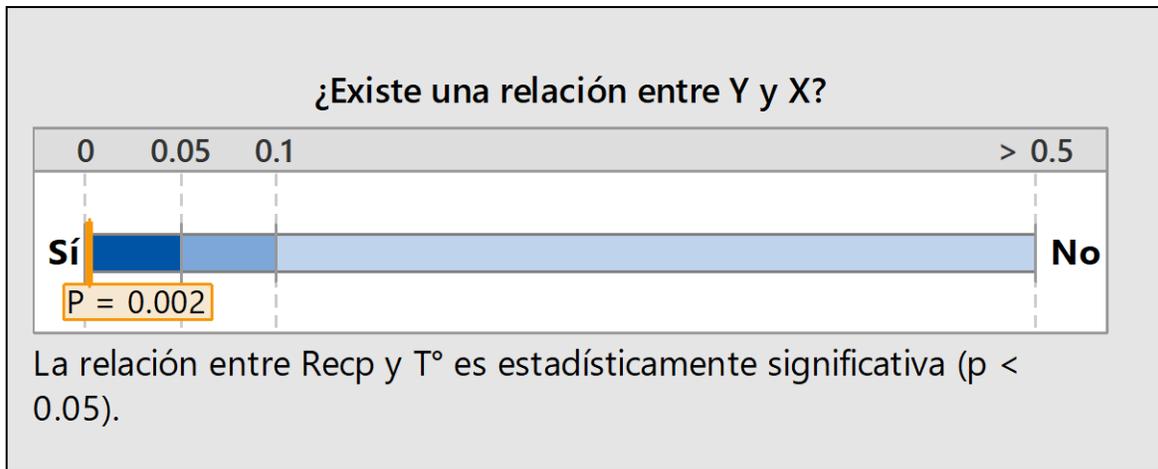


Figura 14. Determinación de P-Valor

Fuente: elaboración propia

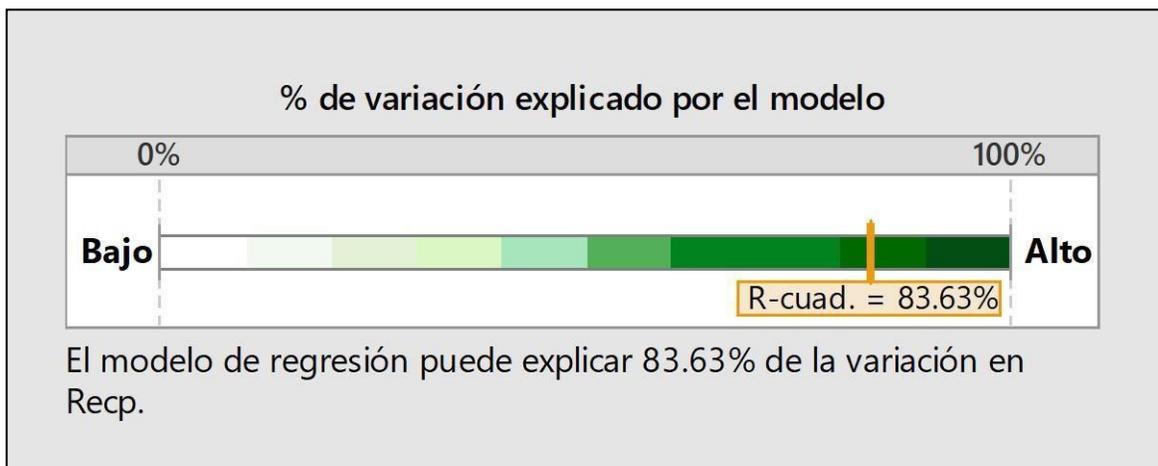


Figura 15. Determinación del R-cuad

Fuente: elaboración propia

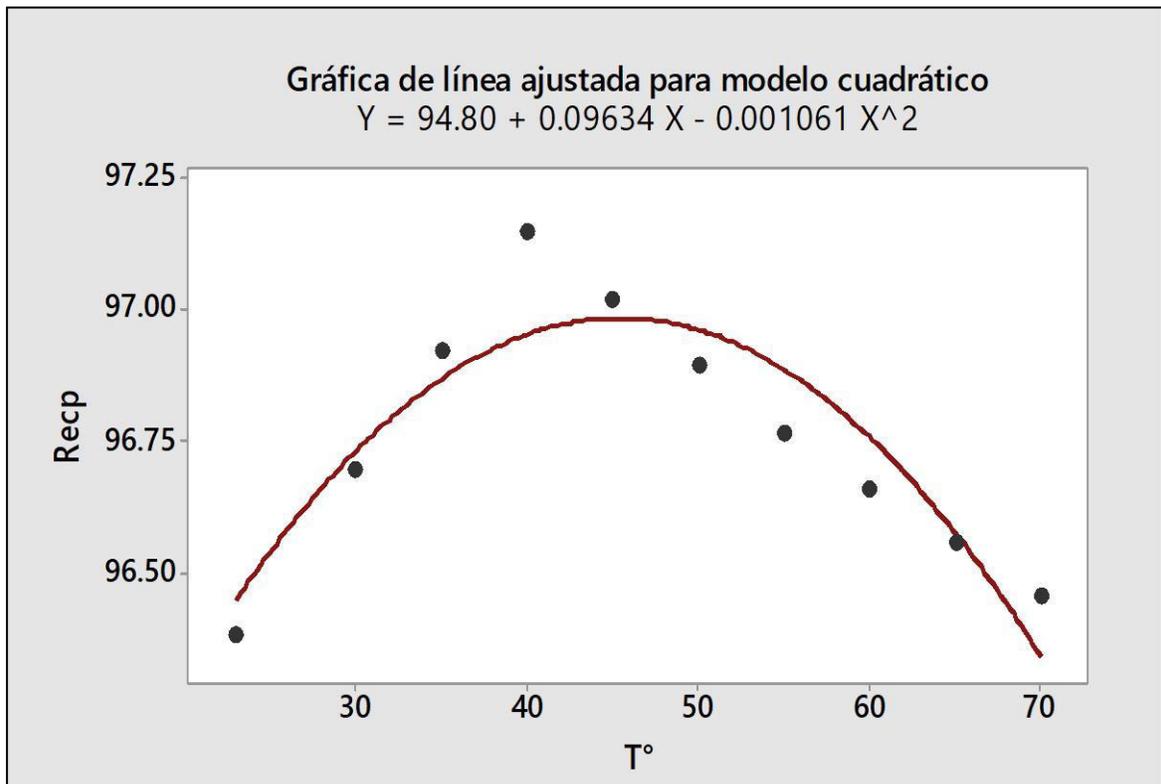


Figura 16. Gráfica de línea ajustada

Fuente: elaboración propia

Tabla 38. Resumen del modelo

| S     | R-cuadrado | R-cuadrado (adj) | P-Valor |
|-------|------------|------------------|---------|
| 0.113 | 83.63 %    | 79.00 %          | 0.002   |

Fuente: elaboración propia

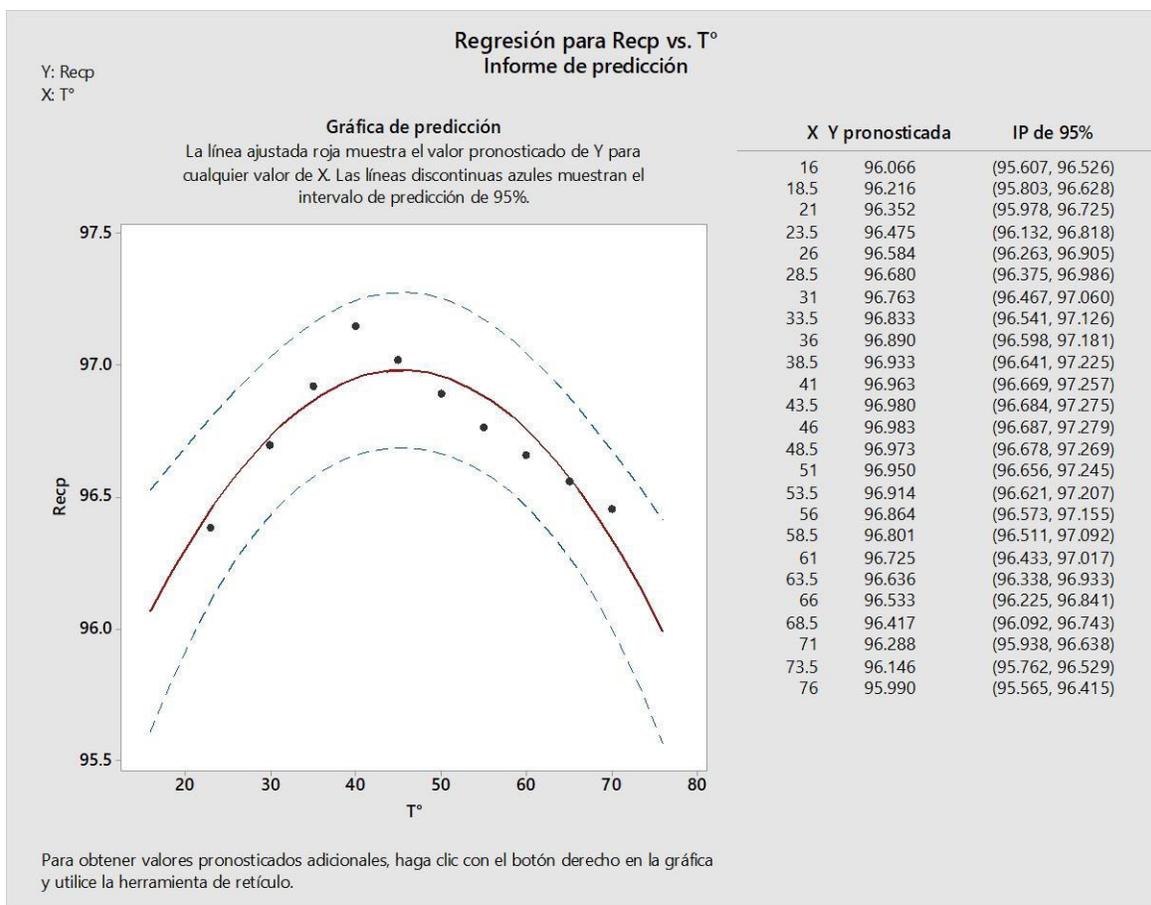


Figura 17. Gráfica de predicción Recuperación vs. Temperatura

Fuente: elaboración propia

## 5.9 Respuesta de optimización para las recuperaciones de molibdeno, hierro y cobre

En ese orden de ideas, Minitab permite determinar cuál es la temperatura óptima, en donde se pueda ubicar la temperatura en la que se tiene la mejor recuperación de Mo y las menores recuperaciones de Cu y Fe.

Tabla 39. Parámetros para la optimización de recuperaciones Mo, Fe y Cu

| Respuesta | Objetivo | Más bajo | Objetivo | Más alto | Peso | Importancia |
|-----------|----------|----------|----------|----------|------|-------------|
| Fe        | Mínimo   |          | 2.7785   | 9.1436   | 1    | 1           |
| Mo        | Máximo   | 96.3843  | 97.1499  |          | 1    | 1           |
| Cu        | Mínimo   |          | 3.4508   | 11.4269  | 1    | 1           |

Fuente: elaboración propia

Tabla 40. Solución para la optimización de recuperaciones Mo, Fe y Cu.

| Solución | Temperatura | Fe ajustado | Mo ajustado | Cu ajustado | Compuesto deseado |
|----------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------------|
| 1        | 50.5354     | 2.78461     | 97.0123     | 3.44707     | 0.935784          |

Fuente: elaboración propia

Tabla 41. Predicción de respuesta múltiple

| Respuesta | Ajuste | Ajuste SE | IC 95 %          | PI 95 %           |
|-----------|--------|-----------|------------------|-------------------|
| Fe        | 2.785  | 0.476     | (-3.268, 8.837)  | (-7.112, 12.682)  |
| Mo        | 97.012 | 0.190     | (94.600, 99.424) | (93.069, 100.956) |
| Cu        | 3.447  | 0.645     | (-4.744, 11.638) | (-9.946, 16.840)  |

Fuente: elaboración propia

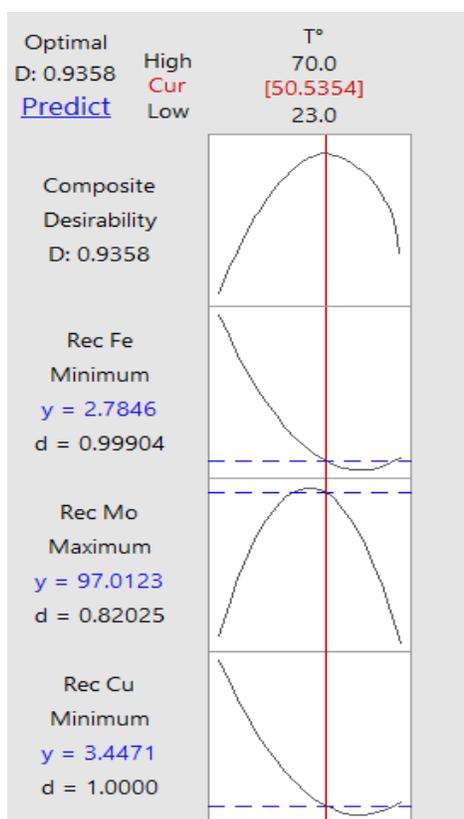


Figura 18. Gráfico de optimización

Fuente: elaboración propia

## CAPÍTULO VI. INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS OBTENIDOS

En la primera fase, se realizaron balances metalúrgicos para cada prueba llevada a cabo en el laboratorio, tomando en cuenta las diferentes temperaturas.

Tabla 42. Resumen de datos obtenidos en balances metalúrgicos

| Temperatura | % Mo en concentrado | Recuperación peso Mo |
|-------------|---------------------|----------------------|
| 23          | 15.55               | 96.38                |
| 40          | 27.28               | 97.15                |
| 55          | 31.26               | 96.78                |
| 70          | 31.92               | 96.46                |

Fuente: elaboración propia

En la Tabla 42, se observa que, en la segunda prueba, se obtuvo la recuperación más alta (97.012 %). Estos resultados obtenidos en laboratorio se contrastaron con el método de Agar y Barret, donde se observa que los resultados tienen un error total entre 0.0015735 a 0.0000589 en las cuatro situaciones.

Tabla 43. Resumen de errores totales por el método Agar y Barret (Recup. Real vs. estimada)

| Temperatura | Error total   |
|-------------|---|
|             | Recuperación laboratorio vs. Recuperación Agar y Barret |
| 23          | 0.0003142   |
| 40          | 0.0015778   |
| 55          | 0.0000792   |
| 70          | 0.0001872   |

Fuente: elaboración propia

Además, se pueden comparar las curvas reales con las estimadas para las recuperaciones en las cuatro pruebas y observar que tienen un comportamiento similar.

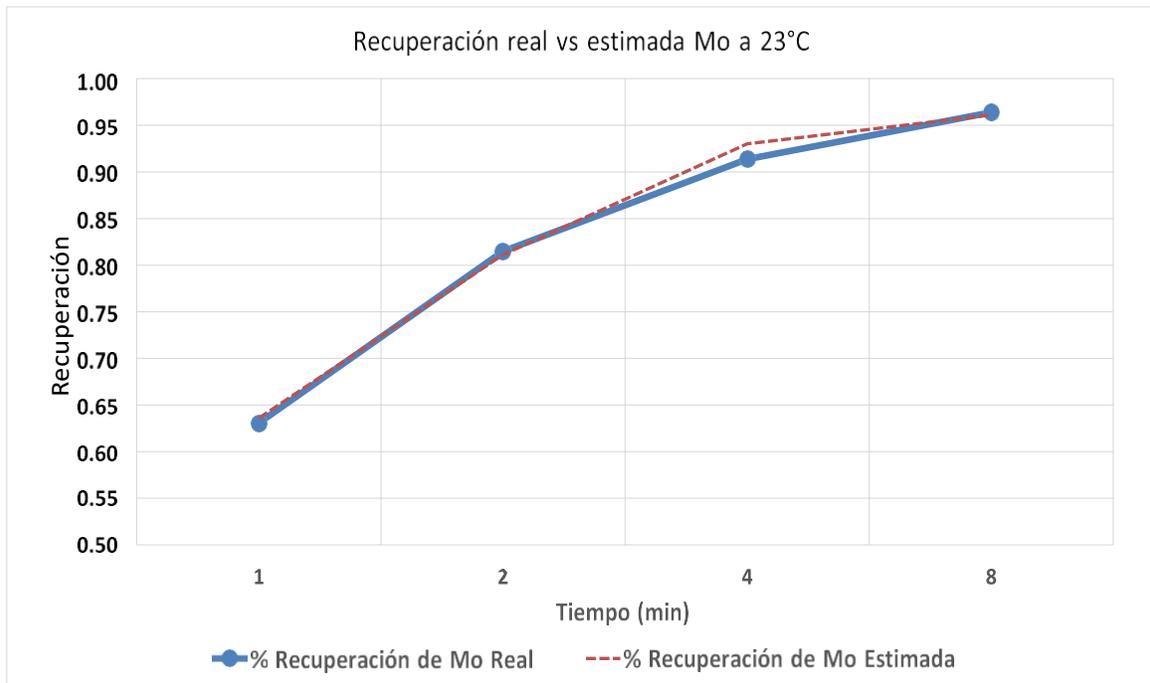


Figura 19. Recuperación real vs. estimada de Mo (23 °C)

Fuente: elaboración propia

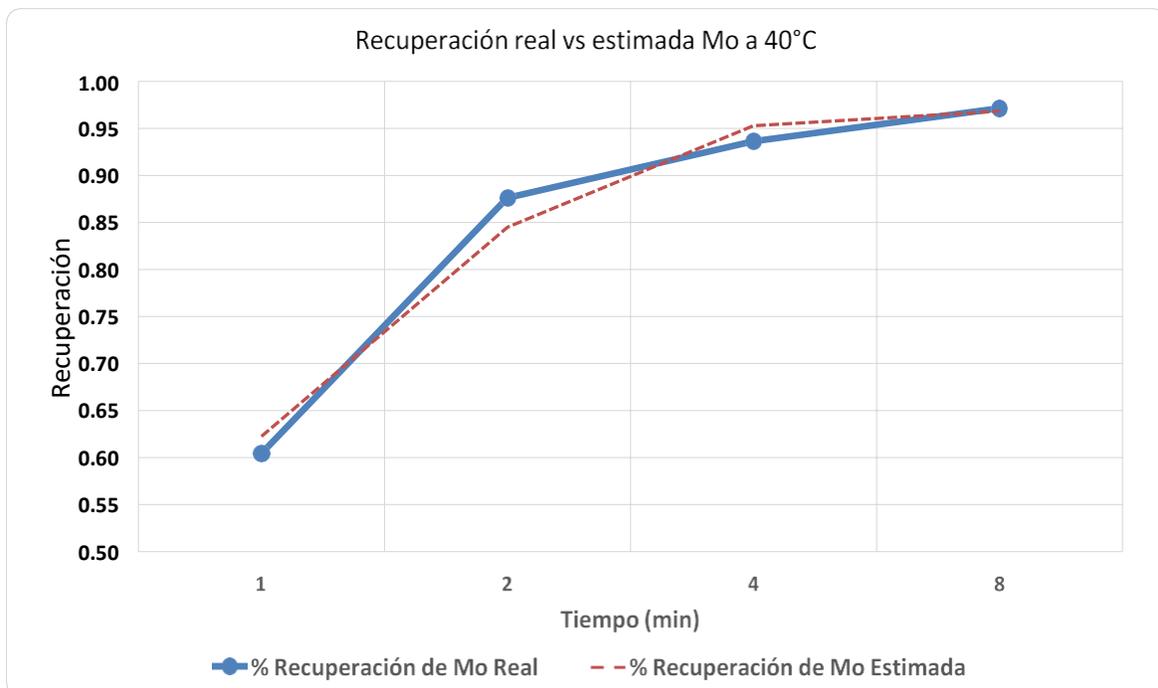


Figura 20. Recuperación real vs. estimada de Mo (40 °C)

Fuente: elaboración propia

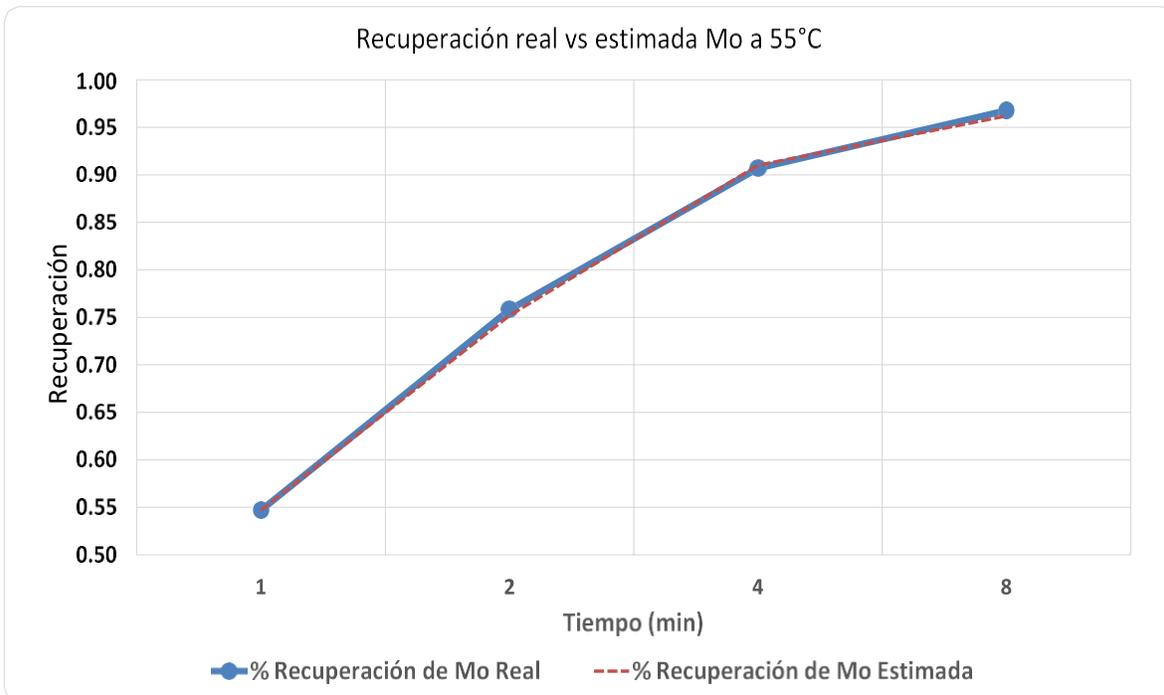


Figura 21. Recuperación real vs. estimada de Mo (55 °C)

Fuente: elaboración propia

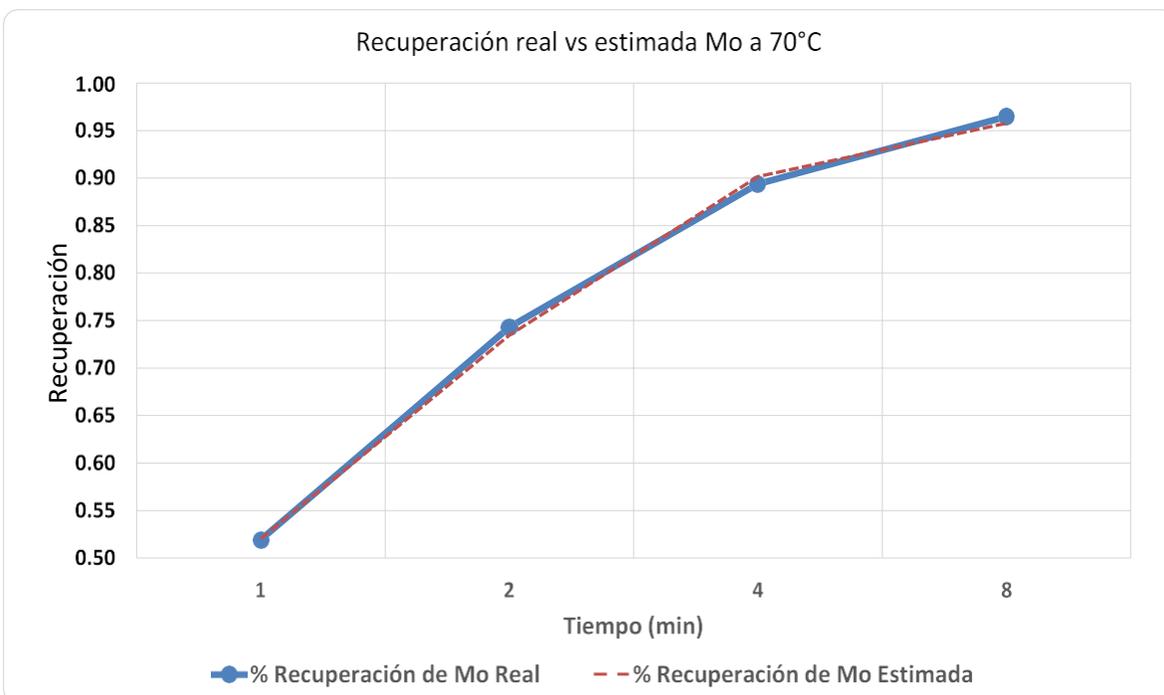


Figura 22. Recuperación real vs. estimada de Mo (70 °C)

Fuente: elaboración propia

En la Tabla 44, se observan las recuperaciones de Mo para cada temperatura, donde se aprecia que entre la segunda y la tercera prueba se encuentran las recuperaciones más altas y las más bajas para Cu.

Tabla 44. Resumen de recuperaciones para cada prueba

| Temperatura (°C) | Recuperación de Mo (%) | Recuperación de Cu (%) |
|------------------|------------------------|------------------------|
| 23               | 96.38                  | 11.43                  |
| 40               | 97.15                  | 4.77                   |
| 55               | 96.77                  | 3.65                   |
| 70               | 96.46                  | 3.45                   |

Fuente: elaboración propia

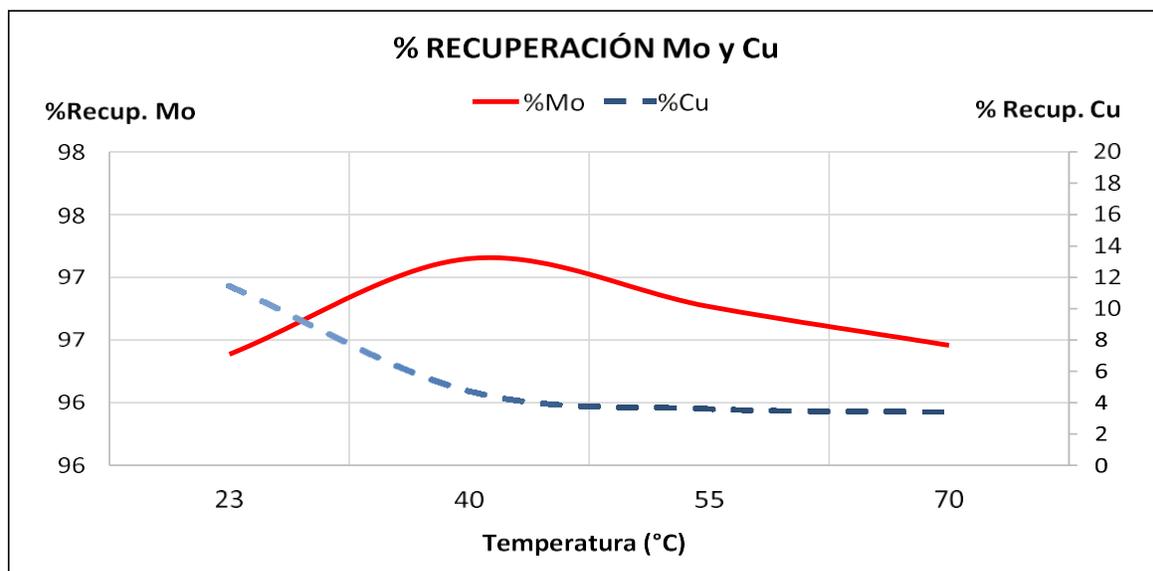


Figura 23. Relación temperatura vs. Recuperación

Fuente: elaboración propia

En la Figura 23, que proviene del análisis de regresión cuadrática, se advierte cómo a medida que se aumenta la temperatura, la recuperación tiende a disminuir. Si bien el grado mejora, debido a que son inversamente proporcionales, es beneficioso determinar un punto óptimo de recuperación, que suele ser uno de los KPI (*Key Performance Indicator*) más importante en el procesamiento de minerales.

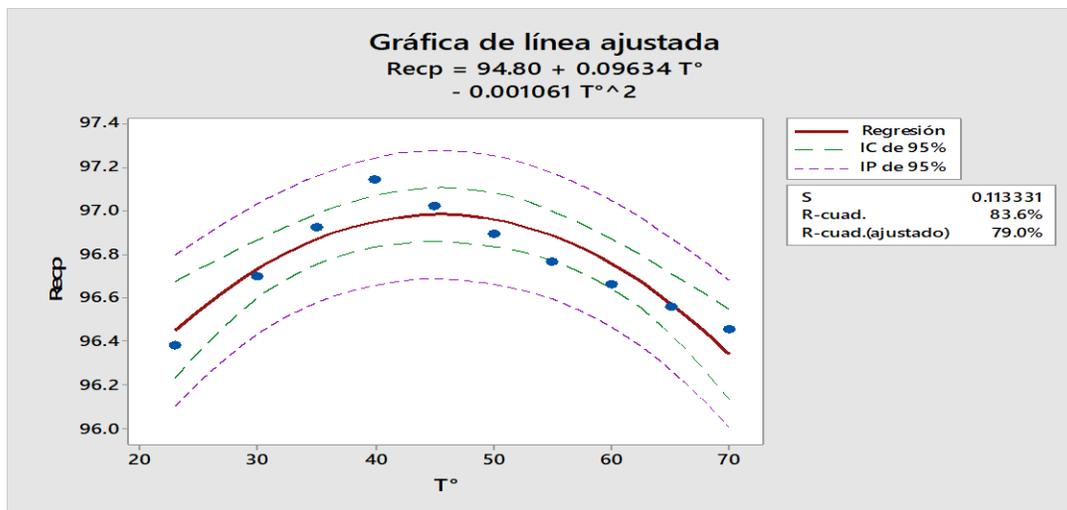


Figura 24. Gráfica de línea ajustada

Fuente: elaboración propia

La Figura 25, obtenida luego de usar la herramienta de optimización, muestra que la temperatura ideal para obtener la máxima recuperación de Mo (97.012 %), es 50.53 °C.

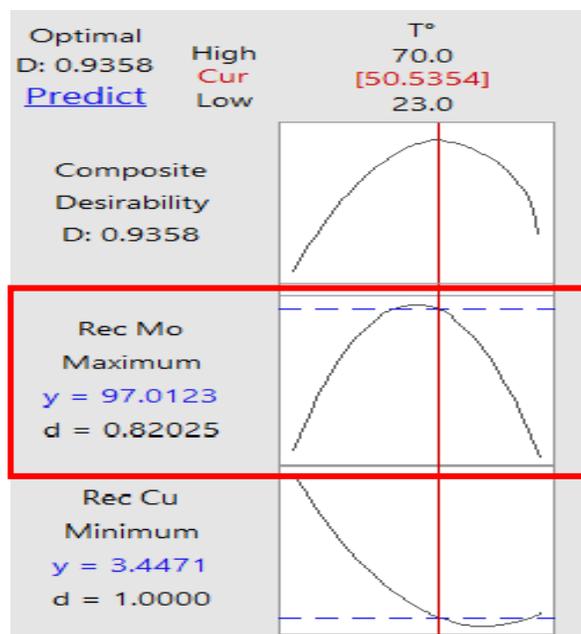


Figura 25. Curva de optimización para la recuperación de molibdeno a 50.53 °C

Fuente: elaboración propia

Los datos de la Tabla 44 y la Figura 26 demuestran cómo el porcentaje de predominancia de HS<sup>-</sup> se ve favorecido en función de la temperatura, lo que indica un mayor carácter reductor, lo que beneficia las reacciones necesarias para ayudar a deprimir más Cu, de modo que se repercute con una mejora en la calidad del concentrado de Mo.

Tabla 45. Predominancia de HS<sup>-</sup> vs. H<sub>2</sub>S

| T°    | H <sub>2</sub> S | HS <sup>-</sup> |
|-------|------------------|-----------------|
| 25 °C | 12.943           | 87.051          |
| 30 °C | 12.673           | 87.318          |
| 35 °C | 12.417           | 87.572          |
| 40 °C | 12.173           | 87.812          |
| 45 °C | 11.941           | 88.039          |
| 55 °C | 11.507           | 88.458          |
| 60 °C | 11.304           | 88.650          |
| 65 °C | 11.111           | 88.831          |
| 70 °C | 10.925           | 89.000          |

Fuente: elaboración propia

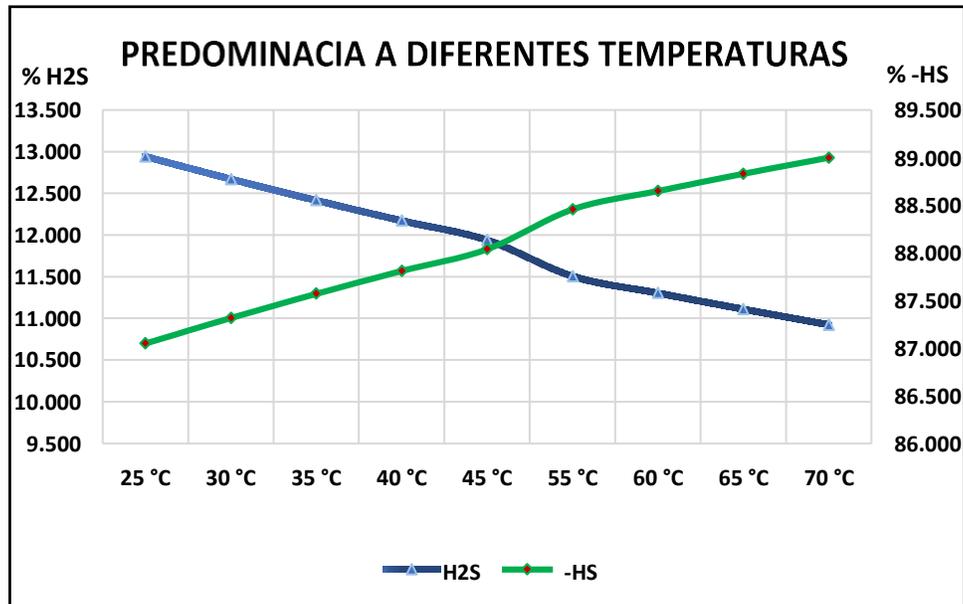


Figura 26. Gráfica predominancia de HS<sup>-</sup> vs. H<sub>2</sub>S

Fuente: elaboración propia

## CAPÍTULO VII. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

### 7.1 Conclusiones

- El efecto de la temperatura en la flotación de Mo es favorable para la recuperación de Mo de un concentrado *bulk* del distrito de Ilabaya, Tacna.
- Los hallazgos referentes al proceso de caracterizar la muestra del concentrado indican presencia de molibdenita (88.89 % del total de la muestra). De este volumen, el 94.96 % se encuentra liberado, mientras que el 4.94 % se presenta como medios y el 0.41 % está encapsulado. Igualmente, se pudo apreciar que estaban presentes algunas especies mineralógicas, por ejemplo, sulfuros de Cu (1.73 %) y pirita (2.24 %).
- La mejor prueba de flotación realizada a nivel laboratorio se logró a la temperatura de 40 °C, como variable independiente; de modo que se obtiene una recuperación de Mo del 97.149 %, como variable dependiente. Además, las recuperaciones estimadas mediante el método de Agar y Barret, para todas pruebas que se ejecutaron en el laboratorio, muestran un error total entre 0.0015778 a 0.0000792, en las cuatro situaciones. Esto indica que las pruebas ejecutadas se asemejan bastante a la teoría.
- De acuerdo con los hallazgos, en el caso del Mo, los factores metalúrgicos indican un mejor comportamiento en la flotación con el aumento de la temperatura, mientras que, para el Cu, pasa lo contrario; en otras palabras, hay mayor cobre deprimido. Por lo tanto, los datos estadísticos como el P-Valor sugieren que hay una relación significativa entre la recuperación y la temperatura.
- De esta manera, según los resultados de la tesis, para evaluar la temperatura que influye en la recuperación de Mo en el procedimiento de flotación para un concentrado *bulk* del distrito de Ilabaya, la temperatura adecuada se obtiene en función de los resultados mediante la herramienta estadística Minitab, en donde se maximiza la recuperación de Mo y minimiza la de Cu. Así, se determina que la temperatura óptima es de 50.530 °C, con una recuperación del 97.012 % de Mo y el 3.447 % de Cu.

- En función al diagrama de predominancia, se infiere que, a mayor temperatura, hay una mayor predominancia del ion sulfhidrato ( $\text{HS}^-$ ). Esta condición aumenta el carácter reductor y favorece la depresión de Cu, por lo que esto podría ser la respuesta ante los mejores resultados. Cabe añadir que las pruebas se realizaron con el mismo consumo de NaSH (6.3 ml) y que el aumento de temperatura demostró resultados favorables con respecto a la recuperación y el grado. Esto significa que no se requiere mayor consumo de este reactivo para favorecer la calidad del concentrado, si se considera que este reactivo es el de mayor consumo y el más caro en las plantas de Mo.

## 7.2 Recomendaciones

- Es pertinente sugerir que el procedimiento metalúrgico analizado se empleado con el objeto de obtener una recuperación aceptable de Mo, con el proceso de flotación influenciado por la temperatura, para un concentrado *bulk* del distrito de Ilabaya, Tacna. De esta manera, se pueden promover alternativas que actualmente se están dejando de lado, dado que los resultados son alentadores.
- De igual forma, se sugiere llevar a cabo pruebas piloto, a partir de los hallazgos a los que se llegó en el presente estudio; para lo cual, se es apropiado llevar a cabo un escalamiento adecuado de las variables, de modo que se garantice un proceso constante. De esta manera, estudiar alternativas de generación de calor y la consecuente influencia de la temperatura, que sean económicas, seguras y medioambientalmente viables a nivel industrial.
- Por otra parte, se aconseja analizar las diferentes granulometrías, al considerar que el subproducto de concentrado *bulk* se libera hasta donde sea adecuado para el Cu, puesto que el Mo es un subproducto. Asimismo, estudiar de manera fisicoquímicas el efecto de la temperatura en la flotación de Mo puede abrir una puerta a una investigación más compleja y científica.
- Finalmente, se recomienda aplicar el aumento de temperatura antes de, por lo menos, los dos últimos ciclos de limpieza. Esto debido a que, si bien hay una mayor depresión de Cu, lo que ayuda a aumentar el grado de Mo, se podría dar un incremento de insolubles que pueden ser disminuidos en etapas posteriores mediante el lavado por duchas de las celdas columnas.

## CAPÍTULO VIII. REFERENCIAS

- Barthelmy, D. (2014). *Mineralogy database*. <https://www.webmineral.com>
- Bulatovic, S. (2007). Molybdenum flotation and separation from porphyry copper molybdenum ores. En S. Bulatovic, *Handbook of flotation reagents* (pp. 253-256). Elsevier Science & Technology Books.
- Castro, S. (1979). Flotación de molibdenita. *Seminario Internacional sobre procesos especiales de la metalurgia extractiva del cobre* (pp. 1-4). Universidad de Concepción.
- ChinaTungsten. (1997). *Aplicaciones de disulfuro de molibdeno*. <http://www.molybdenum.com.cn/Spanish/molybdenum-disulfide-applications.html>
- Climax Molybdenum. (2014). *Brochure climax molybdenum*. Climax Molybdenum a Freeport McMoran Company.
- Gupta, C. (1992). *Extractive metallurgy of molybdenum*. CRC Press.
- Gutiérrez, J. (2019). El molibdeno, un elemento versátil como vital. *Revista de Química*, 33, 12-13. DOI: <http://revistas.pucp.edu.pe/index.php/quimica/article/view/21433>.
- López, A., & Reyes, J. (2005). Flotación de calcopirita, pirita y molibdenita en minerales de cobre tipo pórfidos. *X Simposio sobre Procesamiento de Minerales*, (pp. 6-14). Chillán.
- López, A., & Reyes, J. (2005). Flotación de calcopirita, pirita y molibdenita en minerales de cobre tipo pórfidos. *X Simposio sobre Procesamiento de Minerales*, (pp. 6-14). Chillán.
- Ludington, S., & Plumlee, G. (2009). *Climax-type porphyry molybdenum deposits*. Geological Survey.
- Madrid, I. (2005). *Efecto de iones calcio, pH, tamaño de partícula y colectores no polares en la flotabilidad de molibdenita*. Instituto de metalurgia/Facultad de Ingeniería UASLP.

- Ministerio de Energía y Minas del Perú. (2020). *Anuario minero 2019: estadística minera, producción y exportaciones*. Dirección de Producción Minera.
- Municipalidad de Ilabaya. (2019). *Ubicación*.  
[https://munilabaya.gob.pe/web/ila\\_ubicacion.php](https://munilabaya.gob.pe/web/ila_ubicacion.php)
- Peña, Y. (2007). *Estudio experimental y modelación de procesos de cristalización de molibdatos*. Universidad de Chile:  
[http://www.tesis.uchile.cl/tesis/uchile/2007/pena\\_yn/pdf/pena\\_yn.pdf](http://www.tesis.uchile.cl/tesis/uchile/2007/pena_yn/pdf/pena_yn.pdf)
- Roskill. (2020). *Molybdenum: outlook to 2030*. Market Research Report:  
<http://roskill.com/market-report/molybdenum/>
- Sutulov, A. (1965). Molybdenite and rhenium by-product recovery. En A. Sutulov, *Molybdenum Extractive Metallurgy* (pp. 141-169). Universidad de Concepción.
- The International Molybdenum Association. (1998). *Molybdenum*. IMO.A.
- The International Molybdenum Association. (2008). *IMO.A*. IMO.A Web Site:  
<https://www.imoa.info/index.php>
- The International Molybdenum Association. (2013). *Applications of molybdenum metal and its alloys*. IMO.A.
- The International Molybdenum Association. (2014). *Practical Guidelines for the fabrication of high performance austenitic stainless steels*. Londres: IMO.A.
- Vilca, H. (2019). *Evaluación de la flotación de óxidos de cobre mediante pruebas de reactivos en laboratorio*. Universidad Nacional de San Agustín:  
<http://repositorio.unsa.edu.pe/bitstream/handle/UNSA/10068/IMvicahh.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Yianatos B., J. (2005). *Flotación de minerales*. Valparaíso, Chile: Universidad Técnica Federico Santa María.

## CAPÍTULO IX. ANEXOS

### Anexo 1. Medición de ORP



## Anexo 2. Flotación en laboratorio



## Anexo 3. Planta de Molibdeno



## Anexo 4. Reporte de laboratorio de caracterización



### Caracterización Mineralógica QEMSCAN PLANTA CONCENTRADORA

| Sample             | Name               | Conc. Final Mo |
|--------------------|--------------------|----------------|
|                    |                    | Unized         |
| Cu Sulphides       | Chalcopyrite       | 1.27           |
|                    | Chalcosite         | 0.32           |
|                    | Covellite          | 0.14           |
|                    | Bornite            | <0.1           |
| Other Cu           | Cu/Micas           | <0.1           |
|                    | Other Cu           | 0.84           |
| Cu-As-Sb Sulphides | Tetrahedrite       | <0.1           |
|                    | Enargite/Tenn.     | <0.1           |
| Pyrite             | Pyrite             | 2.24           |
| Molybdenite        | Molybdenite        | 88.89          |
| Other Sulphides    | Arsenopyrite       | <0.1           |
|                    | Realgar            | 0.24           |
|                    | Galena             | <0.1           |
|                    | Sphalerite         | 0.80           |
| Hard Gangue        | Quartz             | 1.49           |
|                    | K-feldspar         | <0.1           |
|                    | Plagioclase        | <0.1           |
|                    | Tourmaline         | <0.1           |
|                    | Iron Oxide         | <0.1           |
|                    | Magnetite          | <0.1           |
|                    | Siderite           | <0.1           |
| Sliming Gangue     | Muscovite/Sericite | 0.75           |
|                    | Biotite            | <0.1           |
|                    | Chlorite           | 1.46           |
|                    | Kaolinite          | 0.11           |
|                    | Talc               | <0.1           |
|                    | Pyrophyllite       | 0.45           |
|                    | Smectite           | 0.22           |
|                    | Alunite            | <0.1           |
|                    | Anhydrite          | <0.1           |
|                    | Gypsum             | 0.37           |
| Others             | Amphibole/Pyroxene | <0.1           |
|                    | Calcite            | <0.1           |
|                    | Other              | 0.18           |



### Caracterización Mineralógica QEMSCAN PLANTA CONCENTRADORA

#### Liberación

| Muestra | Conc. Final Mo | Unized | Liberación de Sulfuros de Cu |           |        |       | Liberación de Pirita |           |        |       | Liberación de Molibdenita |           |        |       |
|---------|----------------|--------|------------------------------|-----------|--------|-------|----------------------|-----------|--------|-------|---------------------------|-----------|--------|-------|
|         |                |        | Liberated                    | Middlings | Locked | Total | Liberated            | Middlings | Locked | Total | Liberated                 | Middlings | Locked | Total |
|         |                |        | 43.58                        | 20.97     | 35.45  | 100.0 | 45.78                | 30.91     | 23.31  | 100.0 | 94.66                     | 4.94      | 0.41   | 100.0 |

## Anexo 5. Ficha de seguridad del NaSH



## HOJA DE SEGURIDAD SULFHIDRATO DE SODIO (SOLIDO)

### 1. IDENTIFICACION DE LA SUSTANCIA/MEZCLA Y DE LA SOCIEDAD EMPRESA

#### 1.1. Información del Producto

|                     |   |
|---------------------|---|
| Nombre Comercial:   | Sulfhidrato de Sodio, Hidrosulfuro de sodio |
| Numero E.I.N.E.C.S. | 16721-80-5                                  |
| Numero I.U.P.A.C.   | 240-778-0                                   |
| Formula quimica:    | NaSH  |
| Peso molecular:     | 56,06                                       |

### 2. IDENTIFICACION DE PELIGROS

- Tóxico por ingestión, es irritante a la piel, ojos y mucosas.
- Aunque estable a la temperatura ambiente se hidroliza con la humedad del aire, desprendiendo ácido sulfhídrico, gas muy tóxico e inflamable.
- Nocivo para los organismos acuáticos.

### 3. COMPOSICION/INFORMACION SOBRE LOS COMPONENTES:

| Sustancia        | Numero EC-Numero CAS | Concentracion | Clasificacion SGA (GHS)  |
|------------------|----------------------|---------------|--|
| NaSH             | 16721-80-5           | 70/72%        | T(Tóxico)<br>R25 (Tóxico por ingestión)<br>R32(En contacto con ácidos libera gases muy tóxicos)<br>R34(Provoca quemaduras) |
| H <sub>2</sub> O | 30/28                | 7732-18-5     | -----  |

[vgventas@quimicosgoicochea.com](mailto:vgventas@quimicosgoicochea.com)

Oficina Principal: AV. NÉSTOR GAMBETTA 150 - CALLAO Telef.: 014-4400 Fax: 014-4461  
 Sucursal: Pj. Mercedes Mz. C.L.I. 8-7 Urb. María Isabel AREQUIPA - PERU Telefon: (054) 203-703  
 LIMA: RPM #022043 NEXTEL 4997345 AREQUIPA: RPM #33674 NEXTEL 34471603

#### 4. PRIMEROS AUXILIOS

**Inhalacion:** Trasladar a zona ventilada y solicitar asistencia medica.

**Piel:** Quitar las ropas contaminadas.Lavarse con mucha agua.

**Ojos:** Lavarse inmediatamente,con abundante agua un minim de 15 min. Y proporciona asistencia medica inmediata.

**Ingestion:** Lavar la boca dar de beber agua.No provoca vomito.Requerir asistencia medica.

#### 5.MEDIDAS DE LUCHA CONTRA INCENDIOS

##### 5.1.Riesgos especiales de incendio:

Sustancia no combustible.

En caso de fuego circundante,el calor lo puede descomponer en acido sulfhidrico,gas inflamable,que a su vez pr combustin da anhido de sulfuroso gas toxico.

##### 5.2.Agentes de Extincion adecuados:

Apagar el fuegos de los agentes adecuados contra e fuego circundante.

##### 5.3. Equipos de Proteccion personal:

Usar mascara "Todo rostro" con filtro adecuado.De prolongarse el incendio,protegerse con equipo de respiracion autonoma.

##### 5.4. Otras Recomendaciones:

Mantener alejado el producto de llamas y chispas.

#### 6.MEDIDAS EN CASO VERTIDO ACCIDENTAL

##### 6.1 Precauciones personales:

Usar equipo de proteccion personal (Ver seccion 8)

[qgventas@quimicospolcochea.com](mailto:qgventas@quimicospolcochea.com)

Oficina Principal: AV. NÉSTOR GAMBETTA 150 – CALLAO Telef.: 014-4400 Fax: 014-4401  
 Sucursal: Pj. Mercedes Mc. C LL 6-7 Urb. Maria Isabel AREQUIPA – PERU Telefax: (084) 202-708  
 LIMA: RPM #022040 NEXTEL 4097345 AREQUIPA: RPM #03874 NEXTEL 144\*1600

## 6.2. Precauciones relativas al medio ambiente

Evitar que alcance a los desagües y cauces públicos. En caso contrario diluir con gran cantidad de agua.

## 6.3. Métodos y materiales de contención y limpieza:

Recoger el producto en envases secos evitando a formación de polvo. Limpiar los últimos restos con abundante agua oxigenada (peróxido de hidrógeno)

## 6.4 Eliminación del producto/Envase:

Ver sección 13

## 7. MANIPULACION Y ALMACENAMIENTO

### 7.1 Manipulación segura:

Evitar la formación y difusión de polvo.  
Dada la posibilidad de desprenderse ácido sulfhídrico  
Evitar la formación de chispas y llamas

### 7.2 Almacenamiento Seguro:

Mantener los envases herméticamente cerrados.  
Almacenar en un área limpia y fresca protegida del calor y humedad.  
Almacenar alejado de materias incompatibles (ver sección 10)

### 7.3 Materiales Incompatibles:

Acero inoxidable tipo AISI 304L o AISI 316L, el polietileno, el polipropileno, el PVC, el vidrio y el caucho.

[qqventas@quimicosgoicochea.com](mailto:qqventas@quimicosgoicochea.com)

---

Oficina Principal: AV. NÉSTOR GAMBETTA 150 – CALLAO Telef.: 614-4400 Fax: 614-4401  
Sucursal: Pj. Morelos Mz. C LL 6-7 Urb. María Isabel AREQUIPA – PERU Telefax: (054) 202-703  
LIMA: RPM #822043 NEXTEL 409\*7345 AREQUIPA: RPM #83674 NEXTEL 144\*1800

## 8. CONTROLES DE EXPOSICIÓN/PROTECCIÓN PERSONAL

### 8.1. Controles de exposición:

TLV-TWA del producto: sin determinar

TLV-TWA del ácido sulfhídrico gas: 10 ppm (ACGIH 92/93)

### 8.2. Medidas de Protección Individual:

#### Protección respiratoria:

Usar mascar "Todo rostro" con filtro adecuado o equipo de respiración autónomo en caso de presencia de ácido sulfhídrico. La inhalación de este gas a niveles altos de concentración, adormece el sentido del olfato, pudiendo causar la muerte. Su umbral olfativo es de 0,0047 ppm.

#### Protección de las manos:

Guantes de PVC, goma natural o neoprene.

#### Protección de los ojos:

Use gafas de seguridad y asegure la disponibilidad de lava ojos en el sector.

#### Protección de la piel:

Utilizar calzado de ropa de trabajo adecuado. Medidas de higiene: Sustituir inmediatamente la ropa contaminada. Lavar caras y manos al término de trabajo con la sustancia.

## 9. PROPIEDADES FÍSICAS Y QUÍMICAS

|                                |   |
|--------------------------------|---|
| Aspecto                        | Escamas muy deliquescentes, de color amarillo verdoso. Bloque fundido del mismo color |
| Olor                           | Característico de huevos podridos   |
| Ph solución acuosa al 5%, 20°C | 12,5  |
| Temperatura de ebullición, °C  | 160   |
| Temperatura de fusión, °C      | 50-55   |
| Temperatura de inflamación, °C | No aplicable  |

[qqventas@quimicosgolcochea.com](mailto:qqventas@quimicosgolcochea.com)

Oficina Principal: AV. NÉSTOR GAMBETTA 150 – CALLAO Telef.: 614-4400 Fax: 614-4401  
 Sucursal: P.J. Morelos Mz. C LL 8-7 Urb. María Isabel AREQUIPA – PERU Telefax: (054) 202-708  
 LIMA: RPM #022040 NEXTEL 4267345 AREQUIPA: RPM #93674 NEXTEL 144\*1603

|                                   |  |
|-----------------------------------|--|
| Temperatura de autoignicion,°C    | No aplicable   |
| Limites de inflamabilidad de aire | No aplicable   |
| Presion de Vapo,20°C              | 1400 Kg/m <sup>3</sup> (bloque)<br>550 kg/m <sup>3</sup> (escamas) |
| Solubilidad en el agua,20°C       | 600 gr/l   |
| Higroscopicidad                   | Muy alta   |
| Tamaño tipico escamas             | Entre 3 y 20 mm el 95%   |

## 10. ESTABILIDAD Y REACTIVIDAD

### 10.1 Condiciones a evitar

Mantener alejado de fuentes de calor.Evitar la humedad.

### 10.2 Materiales incompatibles

Con los agentes oxidantes reaccionan violentamente.  
Con los acidos reacciona liberandose acido sulfhidrico gas.  
Es corrosivo para los metales aluminio,cobre y Zinc.  
Ataca el cemento.

### 10.3 Productos peligroso para la descomposicion

Acido sulfhidrico gas muy toxico e inflamable.

## 11.INFORMACION TOXICOLOGICA

|                    |  |
|--------------------|--|
| 11.1 Inhalacion    | Sin datos experimentales                     |
| 11.2 Ingestion     | Toxicidad aguda oral,rata:LD50 6 A 200 mg/kg |
| 11.3 Contacto piel | Irritacion de la piel,conejo: irritante      |
| 11.4 Contacto Ojos | Irritacion del ojo,conejo: irritante         |

[qgventas@quimicosgolcoches.com](mailto:qgventas@quimicosgolcoches.com)

Oficina Principal: AV. NÉSTOR GAMBETTA 150 – CALLAO Telef.: 614-4400 Fax: 614-4401  
Sucursal: Pj. Morelos Mz. C Lt. 5-7 Urb. María Isabel AREQUIPA – PERU Telefax: (054) 203-703  
LIMA: RPM #022043 NEXTEL 409\*7345 AREQUIPA: RPM #93674 NEXTEL 144\*1603

|                                   |  |
|-----------------------------------|--|
| 11.5 Sensibilización:             | Sin datos experimentales                 |
| 11.6 Carcinogenicidad:            | No incluido en la lista de cancerígenos. |
| 11.7 Mutagenicidad:               | No incluido en la lista de mutágenos     |
| 11.8 Toxicidad a la reproducción: | Sin datos experimentales                 |

## 12. INFORMACION ECOLOGICA

### 12.1 Consideraciones generales:

El producto no es acumulativo ni persistente en el medio ambiente. Expuesto al aire se degrada a tiosulfato de sodio, sulfato de sodio y bicarbonato de sodio.

### 12.2 Comportamiento Medio Acuatico

Consumo oxígeno en las aguas naturales y en las instalaciones de purificación biológica de aguas residuales.

### 12.3 Toxicología acuática

La sustancia es tóxica para la flora y fauna acuática. No se dispone de datos experimentales.

## 12. CONSIDERACIONES RELATIVAS A LA ELIMINACION

De acuerdo con las Leyes Y Regulaciones correspondientes:

1º El producto fuera de calidad o desechado debe ser tratado como un residuo tóxico y peligroso para su eliminación.

2º Los envases contaminados de productos deben ser tratados con idénticas condiciones.

[qgventas@quimicosgolcoches.com](mailto:qgventas@quimicosgolcoches.com)

Oficina Principal: AV. NÉSTOR GAMBETTA 150 – CALLAO Telfax: 014-4400 Fax: 014-4401  
 Sucursal: Pj. Morelos Mz. C LL 6-7 Urb. María Isabel AREQUIPA – PERU Telfax: (054) 203-703  
 LIMA: RPM #022040 NEXTEL 4097345 AREQUIPA: RPM #93074 NEXTEL 144\*1900

## 14. INFORMACION PARA EL TRANSPORTE

|  |                        |                          |                           |
|--|------------------------|--------------------------|---------------------------|
| Numero UN  | 2949                   | Transporte por mar       |                           |
| Grupo embalaje   | II                     | IMDG/MO                  | Clase : 8 pag 8225        |
| Transporte de carretera y ferrocarril  |                        | Transporte por via aerea |                           |
| ADR/RID  | Clase:8,45°b) 1 Etiq:8 | ICAO/IATA                | Clase:8 Grupo embalaje:II |
| NFPA: Salud= 2 Incendio= 1 Inestabilidad=2 Especial=Ningun   |                        |                          |                           |
| HMIS: Salud=2 Incendio= 1 Reactividad=2 Proteccion Personal=Equipo suministrado por el usuario;depende de condiciones. |                        |                          |                           |

## 15. INFORMACION SOBRE ORIENTACION REGLAMENTARIA

|  |   |
|--|---|
| <b>ENVASADO Y ETIQUETADO (Directiva 67/548/CEE y enmiendas R.D. 363/95 y sig.)</b> |   |
| Numero CEE   | 240-778-0   |
| Simbolo(s) de riesgo   | R25 (Toxico)  |
| Frase(s) de riesgo   | R25 (Toxico por ingestion)<br>R32 (En contacto con acido libera gases muy toxicos)<br>R34 (Provoca quemaduras)  |
| Frase(s) de seguridad  | S3/9/14 (Conservese en lugar fresco y bien ventilado y lejos de acidos y oxidantes)<br>S26 (En caso de contacto con los ojos lavense inmediata con abundante agua y acudase ala medico)<br>S39 (Usen proteccion para los ojos/la cara)<br>S51 (Usese unicamente en lugares bien ventilados) |
| <b>RESIDUOS TOXICOS Y PELIGROSOS (Ley 10/1998)</b>                                 |   |
| Aplicable  |   |
| <b>LEY DE AGUAS (Ley 29/1895 y R.D. 849/1986)</b>                                  |   |
| Los iones sulfuro y sulfhidrato estan limitados en el vertido de aguas residuales. |   |
| <b>ACCIDENTES MAYORES (Directiva 96/82/CEE y correcciones R.D. 1254/99)</b>        |   |
| No incluido en los anexos  |   |

[qgventas@quimicospolcochea.com](mailto:qgventas@quimicospolcochea.com)

Oficina Principal: AV. NÉSTOR GAMBETTA 150 – CALLAO Telef.: 614-4400 Fax: 614-4401  
 Sucursal: Pj. Mercedes Mz. C LL 8-7 Urb. María Isabel AREQUIPA – PERU Telefco: (054) 203-703  
 LIMA: RPM #822040 NEXTEL 4097345 AREQUIPA: RPM #82874 NEXTEL 1441800

**16. OTRAS INFORMACIONES:****Aplicaciones del Producto:**

Curticion de pieles; flotacion de minerales; preparacion de pasta Kraft; fabricacion de colorantes; reductor de tintes sulfurados.

La informacion contenida en este documento es, según todos los nuestros conocimientos actuales, verdaderos y exactos.

Pero cualquiera de las recomendaciones o sugerencias formuladas aquí lo son sin nuestra garantía, ya que las condiciones de uso de producto estan fuera de nuestro control.

Ademas, nada de lo contenido aquí puede ser interpretado con una recomendación para usar cualquier producto infringiendo las leyes, practicas de seguridad o patentes de vigor sobre cualquier materia o uso.

[egventas@quimicospolicochea.com](mailto:egventas@quimicospolicochea.com)

---

Oficina Principal: AV. NÉSTOR GAMBETTA 150 – CALLAO Telef.: 614-4400 Fax: 614-4401  
Sucursal: Pj. Morelos Mz. C LL 9-7 Urb. Maria Isabel AREQUIPA – PERU Teletex: (054) 302-703  
LIMA: RPM #022040 NEXTEL 405-7345 AREQUIPA: RPM #02674 NEXTEL 144\*1600