FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA DE INGENIERÍA EN MEDIOAMBIENTE
INGENIERÍA AMBIENTAL

# PROCESO DE VALORIZACIÓN DE LA ESCORIA DE FUNDICIÓN VENTANAS DE CODELCO, BAJO EL CONCEPTO DE ECONOMÍA CIRCULAR.

**TRABAJO DE TITULACIÓN PARA OPTAR AL TITULO DE INGENIERA AMBIENTAL**

**AUTOR: VERÓNICA PATRICIA CISTERNAS CASTRO**

**PROFESOR GUÍA: OCIEL COFRÉ**

**VALPARAÍSO, 2023**

## AGRADECIMIENTOS

Creo que esta fue la parte que más me costó hacer de la tesis, pero no porque no tuviera a quien agradecer, sino más bien, porque a veces no soy buena expresándome. Quiero dejar en claro que los agradecimientos no van en orden de importancia (excepto mis gatos, ellos se llevan el primer puesto siempre).

Primero que todo agradezco a mis gatos, por soportarme en mis momentos de estrés y frustración a lo largo de la carrera, por ser esos seres de luz que no muchas personas tienen la dicha de conocer, por ser los que consumen hasta mi último centavo, pero que ahí están, sin saber que solo con su compañía hacen más felices mis días.

Segundo, agradezco a mis amigas de la universidad Isabel, Silvana, Ignacia y Valentina, gracias a ustedes logré sobrevivir estos largooos años de universidad, gracias a ustedes entendí que, si me propongo algo, seré capaz de cumplirlo. Gracias por existir, ya que con solo estar presente salvaron un poquito la carrera y la vida. Gracias por tanto perdón por tan poco.

Tercero, agradecer a Julio mi hermano por ser incondicional y apañador, sé que, de los 365 días del año, peleamos 366, pero agradezco que jamás me dejes de lado y me apoyes para verme salir adelante. Agradezco tu lealtad y preocupación, y sobre todo agradezco que cuides a tus sobrinos.

Cuarto, agradezco a mis profesores de carrera, ya que jamás me hicieron sentir que no tenía la capacidad de terminar este proceso. Agradezco esa confianza y conversaciones largas con el profesor Andrade, ya que, una palabra de aliento me ayudó en momentos necesarios. Hago una mención honrosa al profesor Ociel, puesto que, a pesar de que jamás tuvimos clases y no se formó esa “confianza” que uno genera con los profesores durante el pasar de los semestres, me apoyó en este proceso final de la carrera.

Finalmente, pero no menos importante, le agradezco a mi madre Violeta Castro, sin usted esto jamás hubiera sido posible. Me saco el sombrero ante usted, por la gran madre que es, pero sobre todo la gran mujer. Gracias por jamás dejarme caer, ni dejar que me rindiera, sin todo su apoyo esto no hubiera sido posible, de verdad mamá infinitas gracias por existir. Al fin puedo decir “misión cumplida mamita”.

# RESUMEN

La actividad minera, es una de las actividades industriales más importantes de nuestro país, ya que, junto con otros recursos naturales, como la agricultura, la pesca y acuicultura, la madera, entre otros, contribuyen significativamente al Producto Interno Bruto, generando ingresos, empleo y oportunidades de desarrollo importantes para el país. Es bien sabido que Chile es uno de los grandes productores, exportadores y procesadores de cobre en el mundo, ya que en él se encuentra el 21,3% de las reservas de este mineral a nivel mundial. Cabe destacar, que la gran minería en Chile está presente en las siete (7) regiones del norte y centro del país, en donde se lleva a cabo todo el proceso productivo de la minería extractiva y productiva. Actualmente en el país, se encuentran seis (6) fundiciones operativas, en donde se procesa el concentrado de cobre obtenido en la minería extractiva, para obtener ánodo y/o cátodo para su posterior comercialización. Durante el proceso de fundición, se genera escoria, la que constituye uno de los principales desechos sólidos de esta industria, que es acumulada en depósitos autorizados destinados para su disposición final, por lo que, año a año en Chile se acumulan millones de toneladas de este residuo.

Es por esto, que, en el presente trabajo, se busca proponer un proceso de valorización de la escoria de fundición de cobre, en este caso de la Fundición Ventanas de Codelco, para así lograr evitar que este residuo se convierta en un pasivo ambiental, además, de reincorporarlo al mercado como materia prima, bajo el concepto de economía circular.

Para ello, se caracterizó y determinó la cantidad potencial de escoria disponible para ser valorizada, obteniéndose que la escoria de la fundición Ventanas de Codelco no es un residuo peligroso, sino más bien un residuo minero masivo, según la normativa ambiental vigente. Este residuo, posee una composición porcentual de óxido de hierro que varía entre 40-50%; 0,80-0,84% de cobre; 0,2-0,4% de óxido de calcio; 0,5-0,6% de azufre; 0,07-0,010% de arsénico y 0,3 – 0,5 ppm de plomo. En cuanto a la cantidad potencial de escoria, fundición Ventanas de Codelco posee un volumen de 1.781.338 [$m^3$] o bien 4.453.345 [ton] de masa de escoria.

Por otra parte, se logró identificar y seleccionar la mejor tecnología aplicable para la valorización de la escoria de la fundición Ventanas, destacando los procesos de reciclaje, reutilización y recuperación de elementos valiosos de la escoria. Esto a su vez, permitió evaluar ambiental y económicamente el proceso, destacando que la tasa de valorización de escoria anual es de un 12,2%, siendo esto un aporte para la disminución de pasivos ambientales. Así mismo, a través de un flujo de caja, y el cálculo de VAN y TIR, se concluyó que la realización de este proyecto es económicamente rentable.

# ÍNDICE GENERAL

1. INTRODUCCIÓN ..... 1
1.1. ANTECEDENTES GENERALES ..... 1
1.2. MINERÍA EN CHILE ..... 2
1.3. COBRE ..... 3
1.4. MINERÍA DE COBRE EN CHILE ..... 3
1.4.1. Exploración ..... 4
1.4.2. Extracción ..... 4
1.4.3. Chancado ..... 5
1.4.4. Proceso Hidrometalúrgico ..... 6
1.4.5. Proceso Pirometalúrgico ..... 7
1.5. FUNDICIONES DE COBRE EN CHILE ..... 12
1.6. EFECTOS AMBIENTALES DE LA ACTIVIDAD MINERA ..... 13
1.7. CÓDIGOS, REGLAMENTOS, REGULACIÓN Y LEGISLACIÓN APLICABLE EN CHILE 13
1.8. CORPORACION NACIONAL DEL COBRE ..... 14
1.9. DIVISIÓN VENTANAS ..... 15
1.10. ESCORIA DE COBRE ..... 16
2. PROBLEMA ..... 19
3. OBJETIVOS ..... 20
3.1. OBJETIVO GENERAL ..... 20
3.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS ..... 20
4. METODOLOGÍA ..... 21
4.1. Caracterización y determinación de la cantidad de escoria ..... 21
4.2. Identificación y selección de alternativas de valorización de la escoria ..... 22
4.2.1. Revisión bibliográfica ..... 22
4.2.2. Selección de la tecnología ..... 22
4.2.3. Diseño conceptual de la solución ..... 23
4.3. Evaluación económica y ambiental, a nivel de prefactibilidad, de las alternativas propuestas ..... 23
4.3.1. Evaluación ambiental ..... 23
4.3.2. Evaluación económica ..... 23
5. RESULTADOS ..... 26

5.1. CARACTERIZACIÓN Y DETERMINACIÓN DE LA CANTIDAD DE ESCORIA 26

5.2. IDENTIFICACIÓN Y SELECCIÓN DE ALTERNATIVAS DE VALORIZACIÓN DE LA ESCORIA ..... 31

5.2.1. Revisión bibliográfica ..... 31

5.2.2. Selección de la tecnología ..... 33

5.2.3. Diseño conceptual de la solución ..... 35

5.3. EVALUACIÓN ECONÓMICA Y AMBIENTAL, A NIVEL DE PREFACTIBILIDAD, DE LAS ALTERNATIVAS PROPUESTAS ..... 46

5.3.1. Evaluación ambiental ..... 46

5.3.2. Evaluación Económica ..... 47

5.3.3. Flujo de caja ..... 49

5.3.4. Cálculo de VAN y TIR ..... 52

6. DISCUSIÓN ..... 53

7. CONCLUSIONES ..... 56

8. REFERENCIAS ..... 57

9. ANEXOS ..... 65

# ÍNDICE DE TABLAS

**Tabla 4.1:** Toneladas de escoria generadas por año de cada fundición de Codelco..... 21
**Tabla 4.2:** Explicación y ponderación de criterios de evaluación..... 22
**Tabla 4.3:** Puntuación de clasificación. ..... 23
**Tabla 5.1:** Composición porcentual de óxidos fundamentales presentes en la escoria. Adaptado de Gálvez, 2015. ..... 26
**Tabla 5.2:** Composición porcentual de la escoria de la fundición Ventanas. Fuente: Hoja de Datos de Seguridad..... 27
**Tabla 5.3:** Características físicas de la escoria de la fundición Ventanas. Fuente: Hoja de Datos de Seguridad. ..... 27
**Tabla 5.4:** Composición porcentual de la escoria de la fundición Ventanas. Adaptada de Gálvez, 2015. ..... 27
**Tabla 5.5:** Toneladas de escoria generada en cada una de las fundiciones de Codelco período 2005-2010. Fuente: Reportes de sustentabilidad Codelco. ..... 28
**Tabla 5.6**: Toneladas de escoria generada en cada una de las fundiciones de Codelco período 2010-2020. Fuente: Reportes de sustentabilidad Codelco de los años indicados. ..... 29
**Tabla 5.7**: Cantidad potencial de escoria acumulada en el escorial de la fundición Ventanas de Codelco..... 30
**Tabla 5.8:** Evaluación técnica para la “Estabilización de suelos arcillosos”..... 33
**Tabla 5.9:** Evaluación técnica para la “Elaboración de baldosas”. ..... 33
**Tabla 5.10:** Evaluación técnica para la “Fabricación de hormigón”. ..... 34
**Tabla 5.11:** Evaluación técnica para el “Uso de escoria de cobre como agregado pétreo para solución de caminos básicos”. ..... 34
**Tabla 5.12:** Evaluación técnica para la “recuperación de cobre por lixiviación”. ..... 34
**Tabla 5.13:** Evaluación técnica para la “recuperación de cobre por flotación”. ..... 34
**Tabla 5.14:** Bandas granulométricas para lechada asfáltica. Fuente: Volumen N°5 del Manual de Carreteras. ..... 36
**Tabla 5.15:** Requisitos de agregados pétreos para TSS. Fuente: Vol. n°5 del Manual de Carreteras..... 36
**Tabla 5.16:** Tipos de Chancadores. Fuente: Elaboración propia, en base a descripción de Metso..... 37
**Tabla 5.17:** Datos para calcular la tasa de valorización de residuos..... 46
**Tabla 5.18:** Cotización chancador de cono..... 47
**Tabla 5.19:** Cotización tamiz vibratorio. ..... 48
**Tabla 5.20:** Cotización máquina excavadora. ..... 48
**Tabla 5.21:** Costos en UF de inversión por equipos y maquinarias. Elaboración propia... 48
**Tabla 5.22:** Sueldos considerados para el total en mano de obra..... 49
**Tabla 5.23:** Vida útil de los activos físicos (SII, 2003)..... 50
**Tabla 5.24**: *Flujo de caja para la propuesta de valorización de la escoria de cobre de la Fundición Ventanas en el periodo de los años 0 y 4.* ..... 51
**Tabla 5.25:** Flujo de caja para la propuesta de valorización de la escoria de cobre de la Fundición Ventanas en el periodo de los años 5 y 8. ..... 52
**Tabla 5.26:** Resultados obtenidos de la VAN y la TIR del proyecto. ..... 52

# ÍNDICE DE FIGURAS

**Figura 1.1:** Participación de la Minería En El PIB. Fuente: Cochilco,2022..... 4
**Figura 1.2:** Diagrama general del proceso productivo de la actividad minera de cobre. Elaborado a partir del proceso publicado en Codelco Educa, 2018. ..... 6
**Figura 1.3:** Proceso Hidrometalúrgico. Elaborado a partir del proceso publicado en Codelco Educa, 2018. ..... 6
**Figura 1.4:** Proceso Pirometalúrgico. Elaborado a partir del proceso publicado en Codelco Educa, 2018. ..... 8
**Figura 1.5:** Diagrama general del proceso productivo de fundición Codelco. Fuente: Adaptado de Codelco, 2015..... 12
**Figura 1.6:** Divisiones mineras de la Corporación Nacional del Cobre. Fuente: Codelco, 2015. ..... 15
**Figura 1.7:** Localización depósito de escoria de la fundición Ventanas de Codelco. Fuente: SMA,2013. ..... 18
**Figura 5.1:** Porcentaje acumulado de escoria período 2005-2010. Elaboración propia a partir de los reportes de sustentabilidad de los años indicados. ..... 29
**Figura 5.2:** Porcentaje acumulado de escoria período 2010-2020. Elaboración propia a partir de los reportes de sustentabilidad de los años indicados. ..... 30
**Figura 5.3:** Chancador de mandíbula. Fuente: Chancador de mandíbula Nordberg® Serie C™ - Metso A. ..... 37
**Figura 5.4:** Chancador giratorio.Fuente: Chancador primario giratorio MKIII - Metsol ..... 38
**Figura 5.5:** Chancador de cono.Fuente: Chancadores de cono – Metso..... 38
**Figura 5.6:** Chancador de impacto. Fuente: Chancadores de impacto - Metso ..... 39
**Figura 5.7:** Representación gráfica del proceso. ..... 39
**Figura 5.8:** Diagrama de flujo del mezclador. ..... 40
**Figura 5.9:** Diagrama de flujo del chancador. ..... 41
**Figura 5.10:** Diagrama de flujo del harnero. ..... 42
**Figura 5.11:** Diagrama general del proceso. ..... 42
**Figura 5.12:** Chancador de cono modelo LY1300(F). ..... 45
**Figura 5.13:** Tamiz vibratorio modelo SZZ1500. ..... 46

# LISTADO DE ACRÓNIMOS Y ABREVIATURAS

a) ACRÓNIMOS

COCHILCO: Comisión Chilena del Cobre

CODELCO: Corporación Nacional del Cobre

ENAMI: Empresa Nacional de Minería

HDS: Hoja de Datos de Seguridad

SEREMI: Servicio Regional Ministerial

SERNAGEOMIN: Servicio Nacional de Geología y Minería

SMA: Superintendencia del Medio Ambiente

b) ABREVIATURAS

CPS: Convertidor Peirce Smith

CT: Convertidor Teniente

HLE: Horno Eléctrico de Limpieza de Escorias

HR: Horno Reverbero

RAF: Refino a Fuego

# GLOSARIO

1. Ánodos: Placas metálicas de cobre o plomo que se instalan en la celda electrolítica por las cuales entra la corriente eléctrica (carga positiva). En la electrorrefinación los ánodos son placas gruesas de cobre producto de la etapa de fundición, los cuales se someten a refinación mediante electrólisis, en la cual todo el cobre que los constituye se disuelve y se deposita en el cátodo de cobre puro y las impurezas que contiene (metales nobles como oro, plata, etc.) quedan depositadas en el fondo de la celda en la forma de barro anódico.

2. Blíster: Cobre producido en los hornos convertidores con una pureza de 99,5%. Este cobre es llevado a los hornos de refino y de moldeo desde donde se obtiene el cobre anódico que va a la electrorrefinación. Su nombre proviene del aspecto que tienen los productos moldeados en su superficie (blister = ampolla).

3. Cátodos de cobre: Son las placas de cobre de alta pureza que se obtienen en el proceso de electrorrefinación y de electroobtención. Estos cátodos también se llaman cátodos de cobre electrolítico de alta pureza y tienen una concentración de 99,9%.

4. Concentrado de cobre: Pulpa espesa obtenida de la etapa de Flotación, está compuesto de cobre, hierro y azufre. Es el primer producto comercial en la línea de producción de cobre.

5. Escoria: Material constituido en un 90% o más por sílice e hierro, con algún contenido de cobre residual, que se separa de la mezcla fundida en el interior de hornos de reverbero o convertidores por gravedad, quedando ésta en la parte superior desde donde es retirada en forma separada de la parte donde está el cobre por vaciado del horno.

6. Estéril: Se refiere al material que no tiene cobre (su ley está bajo la ley de corte), el cual es enviado a botaderos.

7. Fundición: Proceso que va desde la recepción y clasificación del concentrado de cobre, hasta la producción de ánodos. El principal objetivo de la fundición es separar del concentrado de cobre otros minerales e impurezas. Para esto, el concentrado de cobre se funde en hornos de reverbero desde donde se obtiene la escoria y el eje (o mata) que contiene 45% a 48% de cobre. El eje o mata es llevado a los hornos convertidores donde se separa el azufre y el fierro obteniéndose metal blanco que contiene hasta un 75% de cobre. El metal blanco pasa a un proceso de conversión donde se eleva la pureza del cobre líquido que finalmente termina su proceso en la etapa de refinación.

8. Mata: Material en forma de una mezcla sulfurada, que contiene un 45% a 48% de cobre. Se obtiene del horno de reverbero y se separa de la escoria por densidad.

9. Metal blanco: Se refiere al metal que sale del Convertidor Teniente de un proceso de fusión conversión que contiene 70% a 75% de cobre. El cobre del metal blanco se encuentra en forma de sulfuro de cobre ($Cu_2S$), lo que le da el aspecto blanquecino.

10. Mineral: Compuesto químico inorgánico, de origen natural, que posee una estructura interna y composición química característica, formado como resultado de procesos geológicos. Un mineral puede estar constituido por un solo elemento (nativos, como, por ejemplo: oro, plata, cobre) o, más comúnmente, por una asociación de distintos elementos (sulfuros, carbonatos, óxidos, etc.). En la actualidad se han reconocido más de 3.000 especies de minerales.

11. Oxidación: Consumo total del oxígeno durante una reacción química.

12. Reducción: Reacción química que afecta a un compuesto que implica un cambio en el estado Redox cuando acepta electrones provenientes de otro compuesto y simultáneamente disminuye su número de oxidación.

# 1. INTRODUCCIÓN

La actividad minera, es una de las actividades industriales más importantes de nuestro país, ya que, junto con otras actividades económicas, como la agropecuaria-silvícola, la pesca, la industria manufacturera, la madera, la celulosa, entre otros, contribuyen significativamente al Producto Interno Bruto (PIB), generando ingresos, empleo y oportunidades de desarrollo importantes para el país. Entre los recursos minerales que se encuentran en el país destacan el cobre, el litio, el molibdeno, el oro, la plata, entre otros, aunque el cobre en particular, es el recurso más significativo, puesto que, Chile es uno de los grandes productores y exportadores de cobre en el mundo, debido a que posee el 21,3% de reservas de este mineral a nivel mundial (Servicio Geológico de los Estados Unidos, 2023), distribuidas principalmente en las regiones de Tarapacá, Antofagasta, Atacama, Coquimbo, Valparaíso, Metropolitana y O'Higgins (Consejo Minero, 2022). Así mismo, en el país se procesa el concentrado de cobre obtenido de la minería extractiva, a través de un proceso pirometalúrgico o hidrometalúrgico, según sea la composición del mineral (Codelco, 2019), del cual se obtienen ánodos o cátodos de cobre que posteriormente son comercializados.

Cabe señalar que, tanto la minería extractiva como la productiva, generan diversos impactos en el medio, sean estos positivos o negativos, ya sea, ambientales, económicos y/o sociales, por lo que es fundamental, mejorar continuamente los procesos, y así asegurar una operación sustentable en el sector minero. Es por esto, que es importante mencionar que la gran minería de Chile genera un aporte a once (11) de los diecisiete (17) Objetivos de Desarrollo Sostenible de la Organización de las Naciones Unidas (ONU), destacando el fin de la pobreza, la educación de calidad, agua limpia y saneamiento, energía asequible y no contaminante, industria, innovación e infraestructura, producción y consumo responsable, entre otros (Consejo Minero, 2022).

## 1.1. ANTECEDENTES GENERALES

Puesto que el cuidado del medio ambiente se ha vuelto un objetivo para la población, se ha incremento la conciencia y preocupación por los problemas ambientales en todo el mundo. En el mes de octubre del año 1984, se reunió por primera vez la Comisión Mundial sobre Medio Ambiente y Desarrollo (CMMAD), con la misión de llevar a cabo el informe llamado "Nuestro Futuro Común", con el fin de mostrar la posibilidad de una nueva era de crecimiento económico en base a políticas que sostengan y amplíen la base de los recursos del medio ambiente. En su informe publicado en 1987, se presentaba por primera vez el término "desarrollo sostenible", el cual hace alusión a un desarrollo duradero, que debe ser capaz de asegurar satisfacer las necesidades del presente sin comprometer la capacidad de las futuras generaciones para satisfacer las propias (Comisión Mundial sobre el Medio Ambiente y Desarrollo, 1987), garantizando el equilibrio entre el crecimiento económico, el cuidado del medio ambiente y el bienestar social.

A raíz de lo anterior es que se ha desarrollado el concepto de economía circular, el cual data sus orígenes al año 1989 en el libro de Pearce y Turner, quienes incluso desarrollaron un capítulo completo denominado “La economía circular”. Sin embargo, este concepto ha tomado más relevancia estas últimas décadas, puesto que busca romper con el modelo tradicional de economía lineal, el cual se basa en la extracción de la materia prima, el procesamiento y transformación en productos, su distribución y venta, su utilización y, finalmente, su desecho como residuo (Falappa et al., 2019). No así el concepto de economía circular, el cual es un modelo de producción y consumo que implica compartir, alquilar, reutilizar, reparar, renovar y reciclar materiales y productos existentes todas las veces que sea posible para crear un valor añadido y, de esta forma, extender el ciclo de vida de los productos (Parlamento Europeo, 2023).

Es así como Chile no se ha quedado atrás, creando la Oficina de Economía Circular, la cual tiene como objetivo reducir el impacto ambiental relacionado a la generación de residuos y promover un modelo de Economía Circular, que propone un cambio en los sistemas lineales de producción negocios y consumo incorporando el ecodiseño, la reutilización, reciclaje y valorización (Ministerio del Medio Ambiente, 2018). A partir de esto, Chile trabaja en desarrollar e implementar diferentes estrategias, destacando la Ley N° 20920, con el fin de disminuir la generación de residuos y fomentar su reutilización, reciclaje y otro tipo de valorización, a través de la instauración de la responsabilidad extendida del productor y otros instrumentos de gestión de residuos, para así proteger la salud de las personas y el medio ambiente (Ministerio del Medio Ambiente, 2016).

Cabe señalar que, con la implementación de lo descrito en los párrafos anteriores, se contribuye significativamente a evitar los pasivos ambientales, los cuales son el conjunto de daños ambientales, en términos de contaminación del agua, del suelo, del aire, del deterioro de los recursos y de los ecosistemas, producidos por una empresa durante su funcionamiento ordinario o por accidentes imprevistos, a lo largo de su historia (Observatorio de la deuda en la Globalización, 2003).

## 1.2. MINERÍA EN CHILE

Chile es un importante actor en la producción mundial de la industria minera metálica y no metálica. En minería metálica es líder en la producción de cobre y renio, mientras que en la no metálica es líder en la producción de nitratos naturales y yodo (García, 2020). De acuerdo a lo señalado, Chile es el mayor productor y exportador de cobre en el mundo, luego de los procesos de chilenización del cobre con la formación de sociedades mixtas entre el Estado de Chile y las empresas privadas extranjeras, y la posterior nacionalización culminada en julio de 1971, mediante el Decreto Ley N° 1350/76, el cual creó la Corporación Nacional del Cobre (Codelco), entidad encargada de la explotación y comercialización del cobre producido (Consejo Minero, 2019). Adicionalmente, Chile concentra parte importante de las reservas mundiales de litio (44%), renio (54%), cobre (21%), yodo (10%) y plata (5%). (Sociedad Nacional de Minería, 2021).

## 1.3. COBRE

Según el International Copper Study Group (2022), el cobre es un elemento metálico maleable y dúctil, excelente conductor de calor y electricidad, además de ser resistente a la corrosión y antimicrobiano, su símbolo químico es Cu, posee un peso atómico de 63,546 Unidad de Masa Atómica (U.M.A) y un número atómico de 29. El cobre se encuentra naturalmente en la corteza terrestre en una variedad de formas, entre ellas se destacan los depósitos de sulfuro (como pirita y calcopirita), depósitos de óxidos (como cuprita), depósitos de carbonato (como malaquita), entre otros. El cobre es uno de los metales más utilizados a nivel mundial, puesto que sus usos abarcan el 28% de la construcción, 12% en infraestructura, 13% en transporte, 12% en maquinarias y 31% en otros equipos, como monedas, aparatos electrónicos, entre otros (Consejo Minero, 2022).

## 1.4. MINERÍA DE COBRE EN CHILE

En el The World Copper Factbook (2022) se señala que las cifras preliminares de la producción minera mundial de cobre en 2021 alcanzaron los 21,2 millones de toneladas, siendo Chile el mayor productor de cobre extraído (5,6 millones de toneladas). Así mismo, la producción de fundición alcanzó los 21,4 millones de toneladas, siendo China el mayor productor de cobre blister y ánodos con casi el 50% de la producción, seguido por Japón (7%) y posteriormente Chile con 2,05 millones de toneladas de cobre fundido, lo que equivale al seis por ciento (6%).

La actividad minera contribuye en un 10,4% al PIB en el año 2013, mientras que su aporte fue de 14,6% en el año 2021 (Comisión Chilena del Cobre, 2022), tal como se muestra en la **Figura 1.1**.Esto, debido a la cantidad de inversionistas y la magnitud alcanzada en la producción de cobre.

Chile es el país que más invierte en exploración minera por superficie de territorio, con un valor de US$ 762/ $km^2$. Cabe señalar que más del 90% de las exportaciones mineras del país corresponden a cobre, el cual puede ser exportado de dos maneras: como refinado, mayoritariamente cátodos, que poseen una pureza del 99,99%, el que corresponde al 44% de las exportaciones; como concentrado de cobre, el cual posee una pureza del 30%, que corresponde al 56% restante de las exportación de este mineral (Consejo Minero, 2022).

Así mismo, es importante mencionar que seis (6) de las diez (10) minas de cobre más importantes del mundo están en Chile, siendo estas: Collahuasi (Anglo American), El Teniente (Codelco), Escondida (BHP), Los Bronces (Anglo American), Pelambre (Antofagasta Minerals S.A.) y Radomiro Tomic (Codelco) donde se desarrolla el proceso productivo de la minería extractiva.

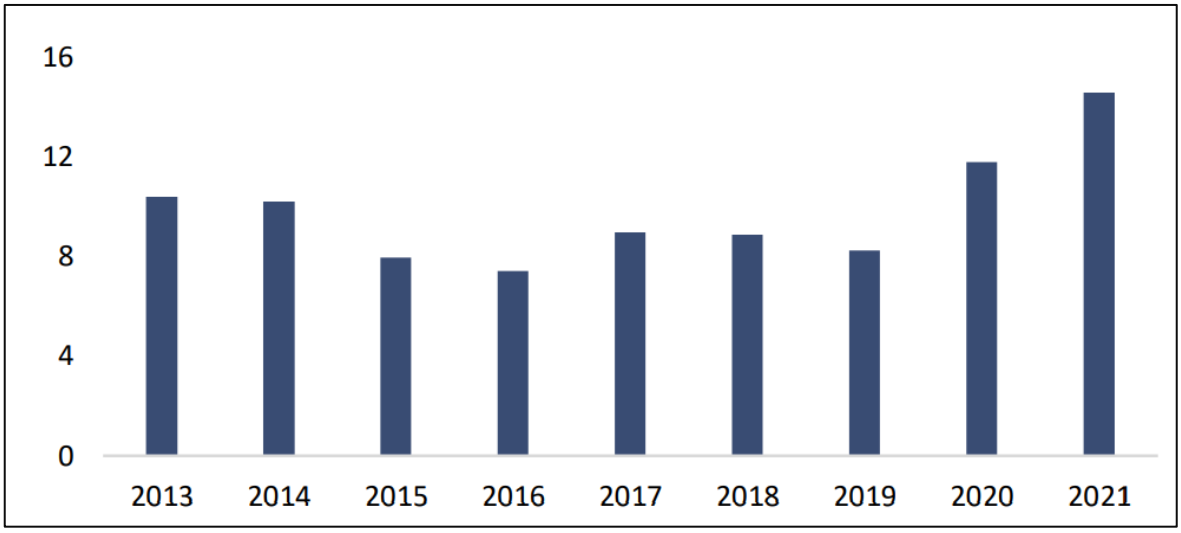


**Figura 1.1:** *Participación de la Minería En El PIB. Fuente: Cochilco,2022.*

A continuación, se explica de manera general el proceso productivo de la minería extractiva de cobre. Este proceso puede ser realizado en minas a rajo o cielo abierto o en minas subterráneas, y consta de las siguientes operaciones:

### 1.4.1. Exploración

La primera etapa de la minería extractiva corresponde a la exploración geológica, en la cual un equipo de profesionales sale en búsqueda de un yacimiento de cobre, en donde toma muestras del terreno y así pueden determinar la viabilidad de su explotación. En esta fase, se puede verificar los tipos de rocas presentes en el subsuelo y verificar si existen o no minerales. De acuerdo con las características de los procesos geológicos, el cobre está presente en la corteza terrestre en forma de minerales sulfurados u óxidos, cuyas características determinan su posterior forma de procesamiento (Corporación Nacional del Cobre, 2018b).

### 1.4.2. Extracción

En esta etapa, es donde se extrae el cobre de la Tierra, es decir, es cuando se obtiene el material (mineral + estéril), a partir de las siguientes etapas:

a. *Perforación:* Proceso que consiste en hacer huecos en la tierra para colocar explosivos.

b. *Tronadura:* Luego de colocar los explosivos, son detonados los explosivos para fraccionar la roca maciza a través de un control remoto.

c. *Carguío:* Después de obtener los fragmentos de roca, se procede a cargar los camiones tolvas mediante palas y equipos de gran tonelaje.

d. *Transporte:* Por último, se transporta el material cargado hacia la planta de procesamiento del material.

Así como existen dos tipos de cobre, también existen dos formas diferentes para la extracción del mineral, las cuales son:

a. *Extracción subterránea*: se realiza cuando el yacimiento de cobre tiene una cubierta estéril muy espesa, como sería, por ejemplo, al interior de un cerro. En estos casos, se hace muy poco rentable quitar todas las capas de tierra antes de llegar a la roca mineralizada. Por tanto, es necesario, hacer labores subterráneas como túneles, galerías, rampas, etc. para así acceder al mineral y llegar a lo más profundo.

b. *Extracción a rajo abierto*: se realiza cuando la zona en la que se encuentra el yacimiento sí presenta las condiciones necesarias para extraer el mineral desde la superficie. En estos casos, sí es rentable quitar la capa estéril que cubre el macizo rocoso mineralizado, pues su espesor es de menor magnitud.

Según las características del material extraído, será el destino que se le proporcione; para el caso del mineral, este es transportado hacia el chancador primario donde es tratado; para el caso del estéril, éste es enviado hacia los depósitos de estériles que posee la faena minera y en el caso del mineral de baja ley, este es transportado hacia el acopio temporal designados para estos (Corporación Nacional del Cobre, 2019b).

### 1.4.3. Chancado

El objetivo principal del chancado es disminuir el tamaño de la roca mineralizada a un diámetro de ½ pulgada, equivalente a 1,27 centímetros aproximadamente. Los chancadores reciben el material por su parte superior, trituran las rocas mediante movimientos vibratorios y las expulsan por debajo. Todo el material, tanto el que llega como el que sale del chancador, es trasladado a través de correas transportadoras, por lo que el proceso es bastante automatizado (Corporación Nacional del Cobre, 2018c).

Cabe señalar que el proceso productivo del cobre no es lineal, por lo que este puede proseguir de dos formas diferentes, según el proceso del cobre sulfurado (Proceso Pirometalúrgico) o bien, según el proceso del cobre oxidado (Proceso Hidrometalúrgico), tal como se muestra en la **Figura 1.2**, procesos que serán descritos posteriormente.

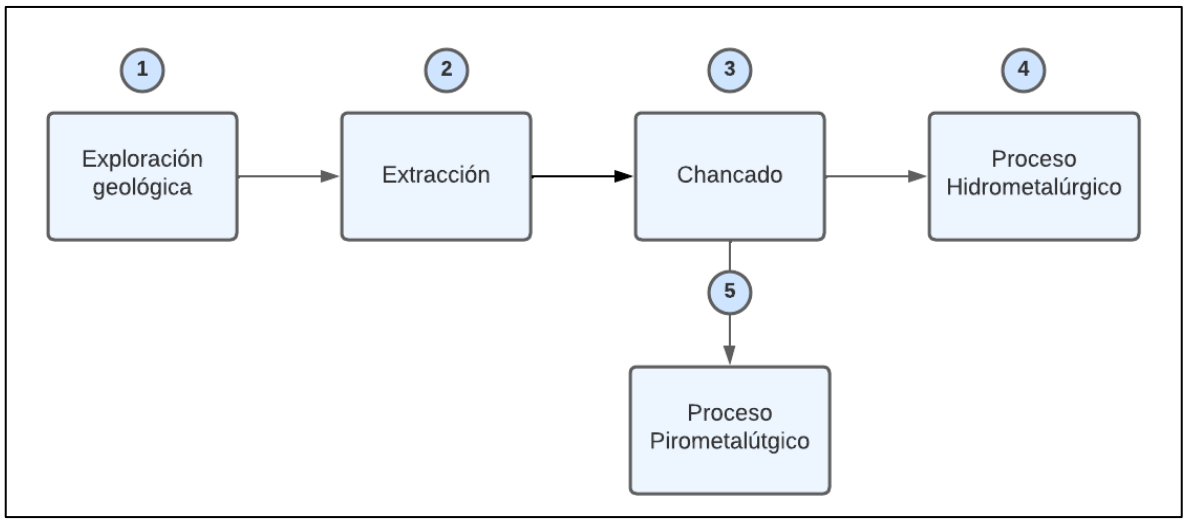


**Figura 1.2:** *Diagrama general del proceso productivo de la actividad minera de cobre. Elaborado a partir del proceso publicado en Codelco Educa, 2018.*

### 1.4.4. Proceso Hidrometalúrgico

El proceso hidrometalúrgico se realiza al material de cobre oxidado posterior a la actividad de chancado, el cual consta de dos etapas tal como se muestra en la **Figura 1.3** y se describe a continuación.

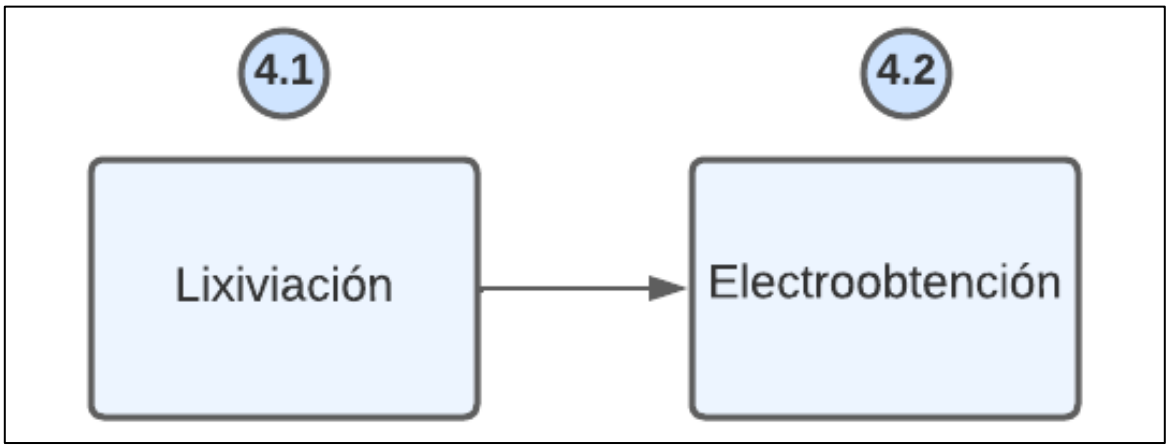


**Figura 1.3:** *Proceso Hidrometalúrgico. Elaborado a partir del proceso publicado en Codelco Educa, 2018.*

#### *1.4.4.1. Lixiviación*

Posterior a la etapa de chancado, el cobre oxidado pasa por el proceso de lixiviación, que consiste en recuperar los metales presentes en el mineral mediante la aplicación de agua y ácido sulfúrico ($H_2SO_4$). Para poder realizar este proceso es necesario contar con una superficie de apoyo de la pila, en la que se coloca la impermeabilización. Una vez que el material ya es preparado, se coloca en cúmulos para poder proceder a su riego con una solución preparada. Posterior a percolar la solución a través de toda la pila, se recolectan

los líquidos enriquecidos que se llevan a la planta de proceso de recuperación de la sustancia mineral (Corporación Nacional del Cobre, 2019g).

- *Extracción por solvente*

Para poder extraer el cobre de la solución de sulfato de cobre obtenida en la lixiviación, es necesario mezclarla con una solución de parafina y resina orgánica. La resina captura los iones de cobre en forma selectiva, donde de la reacción que se produce se obtiene un complejo de resina-cobre y, por otro lado, una solución denominada refino. El compuesto de resina-cobre es tratado en forma independiente con un electrolito rico en ácido, que descarga el producto del cobre desde la resina hacia el electrolito, mejorando así la concentración del cobre (Corporación Nacional del Cobre, 2019g).

#### *1.4.4.2. Electroobtención*

La electroobtención también conocida como electrodepositación, es uno de los procedimientos actuales más sencillos para recuperar el cobre contenido en soluciones líquidas. La electroobtención se basa en la "electrometalurgia" para recolectar el metal, es decir, utiliza electricidad para atraer las partículas de cobre. En esta etapa el cobre se traslada desde la solución hacia los cátodos y no desde los ánodos, como en el caso de los sulfuros (Corporación Nacional del Cobre, 2019h). Esto es llevado a cabo en 4 etapas:

- La solución electrolítica proveniente de la Lixiviación, que contiene el sulfato de cobre, se traslada a las denominadas "celdas electrolíticas" o de "electroobtención".

- En estas celdas se disponen en su interior ánodos (polo positivo (+)) por donde entra la corriente eléctrica y cátodos (polo negativo (-)) por donde sale la corriente eléctrica.

- En las celdas se hace circular una corriente eléctrica de muy baja intensidad entre el ánodo y el cátodo.

- Finalmente, mediante la electrólisis, los iones de cobre (cationes) presentes en la solución de sulfato de cobre son atraídos por la carga negativa del cátodo y se depositan en él.

### 1.4.5. Proceso Pirometalúrgico

Para el caso del proceso pirometalúrgico, este se realiza al cobre sulfurado posterior a la etapa de chancado, siendo este el proceso importante para este trabajo, puesto que es aquí donde se genera la escoria de descarte, la cual es el material que se pretende valorizar. Este proceso se lleva a cabo según las etapas presentadas en la **Figura 1.4** y descritas a continuación.

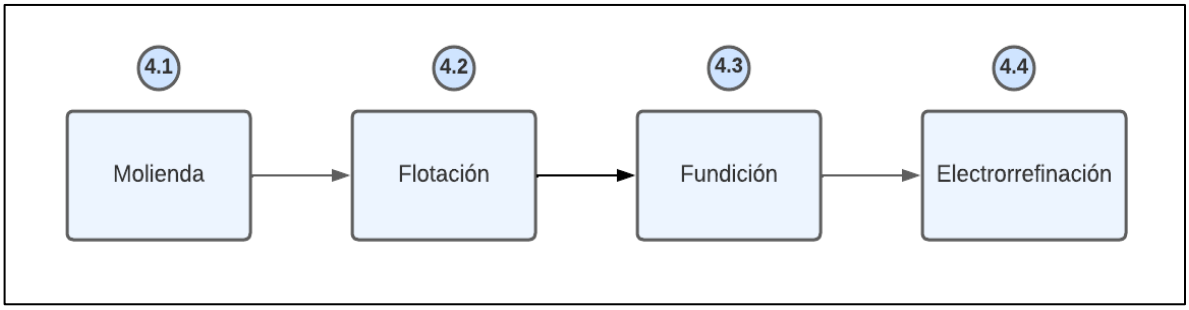


**Figura 1.4:** *Proceso Pirometalúrgico. Elaborado a partir del proceso publicado en Codelco Educa, 2018.*

#### *1.4.5.1. Molienda*

Esta es la primera etapa del proceso pirometalúrgico, y en ella se continúa reduciendo el tamaño de las partículas que componen el mineral para obtener una granulometría máxima de 180 micrones (0,18 mm), la que permite la liberación de la mayor parte de minerales de cobre en forma de partículas individuales. Este proceso se realiza utilizando equipos giratorios o molinos de forma cilíndrica. El mineral proveniente del chancado se coloca dentro de los equipos y se le agrega agua y los reactivos necesarios para realizar la molienda, la cual puede ser: molienda convencional, en la que se mezcla el mineral con agua y así se obtiene una pulpa homogénea y eficiente; molienda de barras, en donde dentro del equipo hay barras de acero que sirven para moler el mineral, gracias al movimiento libre que tienen las barras dentro del equipo y que caen sobre el mineral; molienda de bolas, en donde en los molinos están ocupados por bolas de acero las cuales reducen el 80% del tamaño del mineral; finalmente, molienda SAG o semiautógena, en ella se mezcla el mineral proveniente del chancador primario con agua y cal, y gracias a la acción del choque de las mismas rocas con las bolas de acero presentes en el molino, es que se reduce el tamaño del mineral (Corporación Nacional del Cobre, 2019c).

#### *1.4.5.2. Flotación*

Esta etapa es esencial durante el proceso, puesto que, en ella ocurre el proceso de concentración de mineral y la limpieza de este. Esto se logra gracias a la adición de reactivos añadidos en la etapa anterior (molienda) que influyen en la concentración del cobre.

Se lleva a cabo en las celdas de flotación, donde se inyecta aire por la parte inferior de las celdas generando así burbujas, las que hacen que el cobre suba hacia la superficie, rebasando las celdas de flotación por los costados en canaletas, que van hacia a estanques especiales.

Luego de obtener el concentrado, este es recuperado a través de sedimentadores, los cuales eliminan la mayor cantidad de agua presente en los concentrados producto de la

flotación, obteniéndose un sólido espeso que va hacía los filtros que terminan de eliminar el agua presente en los concentrados, obteniéndose así un concentrado de cobre con una humedad del nueve al doce por ciento (19-12%) y con una ley de cobre cercana al treinta por ciento (30%) (Corporación Nacional del Cobre, 2019d).

Posterior a las etapas descritas anteriormente, se procede a almacenar el concentrado de cobre en un edificio cerrado, el que puede ser llevado a la etapa siguiente (fundición) o ser comercializado como concentrado de cobre como tal.

#### *1.4.5.3. Fundición*

A continuación, se describirá de forma general el proceso productivo que se lleva a cabo en una fundición de cobre, por él se obtienen ánodos de cobre con una pureza aproximada del 99,5% (Corporación Nacional del Cobre, 2019e), el que consta de las siguientes etapas:

*a) Recepción, Almacenamiento y Preparación de mezclas (RAM)*

En el sector RAM se llevan a cabo 2 etapas en paralelo, una de ellas inicia el proceso con la recepción, almacenamiento y disposición de concentrados, fundentes y circulantes, los cuales constituyen la mezcla húmeda que ingresan mediante Garr-Gun al Convertidor Teniente (CT). La otra que ocurre en el domo de mezcla, comprende la preparación de la mezcla homogénea de concentrado mediante una correa circular interna, que luego ingresa mediante toberas al CT.

*b) Secado de Concentrados*

El concentrado húmedo proveniente del domo de mezclas es almacenado en tolvas desde donde ingresa a las líneas de secado de cada equipo de fusión, donde se reducen los niveles de humedad desde entre 6% y 8% a 0,2% y 0,3%. El concentrado va reduciendo su humedad a medida que avanza dentro de un tambor metálico.

*c) Alimentación de Concentrados al Horno de Fusión*

Una vez alcanzado el nivel de humedad requerido, el concentrado es descargado por gravedad desde los secadores y transportado a tolvas intermedias, en donde se encuentran los polvos recuperados de diferentes partes del proceso de fusión y concentrado seco. Junto a cada tolva se encuentran tolvas de almacenamiento de cuarzo fino, el cual es requerido como fundente para la formación de escoria.

*d) Fusión de Concentrados*

El objetivo de esta etapa es formar una fase de sulfuros líquidos, constituida de calcosina ($Cu_2S$), covelina (CuS), calcopirita ($CuFeS_2$), pirita ($FeS_2$), bornita ($Cu_5FeS_4$) y enargita ($Cu_3AsS_4$); y otra fase oxidada líquida, en lo posible libre de cobre, compuesta por silicatos de hierro que en conjunto con los fundentes forman la escoria.

La escoria, pobre de cobre, es caracterizada, por lo que puede ser descartada inmediatamente o ser sometida a una etapa adicional de recuperación del metal (si su contenido es alto).

En cambio, la fase líquida que contiene sulfuros de cobre y hierro, además de otros metales preciosos y elementos trazas, pasa a una etapa de conversión por oxidación, en el Horno de Fusión, el cual funciona a temperaturas de 1200°C. Tradicionalmente, se utilizan dos tipos de hornos, el Horno de Reverbero y el Convertidor Modificado Teniente (CMT). Este último es el modelo que utiliza Codelco, ya que posee una tecnología más avanzada y realiza, al mismo tiempo fusión y conversión. Todo el sulfuro de cobre se descompone de acuerdo a las siguientes reacciones:

$$Cu_2S + 2CuO \rightarrow 4Cu + SO_2$$
$$Cu_2 + 2Cu_2O \rightarrow 6Cu + SO_2$$
$$Cu_2S + FeS \rightarrow Cu_2S + FeO$$
$$2CuS + FeS \rightarrow Cu_2S + Fe$$

Los productos generados en esta etapa son ricos en cobre; el metal blanco conocido como eje de alta ley, entre 62-70% de cobre es extraído hacía la etapa de conversión; la escoria, entre 1-2% de cobre, es extraída del CT por el extremo opuesto del metal blanco hacía un horno eléctrico de limpieza de escoria; y una corriente continua de gases a la salida del horno, entre 30-35% de Dióxido de Azufre ($SO_2$), es conducida hacía la Planta de Limpieza de Gases.

*e) Limpieza de Escorias*

La limpieza de escorias se lleva a cabo en el Horno Eléctrico de Limpieza de Escorias (HLE), en donde se purifica la escoria obtenida en la etapa anterior, resultando una escoria final con 0,7% de Cu, que es descartada en un botadero. Así mismo, en este equipo se recupera metal blanco con un 70% de Cu, el cual se mezcla con el metal blanco proveniente del CT.

*f) Conversión de Eje de Alta Ley*

En esta etapa, se obtiene $SO_2$ y cobre blister, a partir de la reacción entre el óxido y el sulfuro cuproso provenientes de la fusión de concentrados. Esta reacción, es llevada a cabo en hornos de conversión, llamados Convertidor Peirce Smith (CPS), en donde se carga el metal blanco proveniente del CT y del HLE, con un 73% de Cu aproximadamente. La oxidación se realiza por la inyección de aire enriquecido, por toberas sumergidas en el baño caliente de metal, esto elimina todo el azufre contenido, obteniéndose como resultado un cobre blister con un 96,9% de Cu, pasando posteriormente a la etapa de Refino a Fuego.

*g) Refino a Fuego (RAF)*

El cobre blíster obtenido en la etapa de conversión, aún contiene impurezas y materiales valiosos como plata, oro, arsénico, antimonio, entre otros, por lo que debe ser refinado en los hornos anódicos. Esta etapa tiene por objetivo eliminar las impurezas del blister, mediante oxidación (eliminación de azufre) y reducción (eliminación de oxígeno en exceso), obteniéndose así, un cobre blister libre de impureza, es decir, un cobre anódico con un contenido de cobre del 99,6%.

*h) Rueda de Moldeo*

Finalmente, se realiza el moldeo de los ánodos de cobre en la rueda de moldeo. En esta etapa, el cobre es vaciado sobre moldes desde el horno de RAF, los cuales tienen la forma característica de los ánodos. Los moldes están hechos de una mezcla entre cobre y cemento, que deben ser calentados a una temperatura aproximada entre 70-80 grados, previamente al moldeo ya que, de otra manera, el molde tendería a romperse o producir ánodos de rechazo. El horno anódico se extrae del horno de ánodos por medio de una canaleta cubierta hacía la rueda de moldeo que va girando, produciéndose la solidificación del ánodo fundido por contacto con el aire. Finalmente, el ánodo es desprendido del molde y se lleva a una piscina de agua para enfriar, pesar y almacenar.

*i) Plantas de Limpieza de Gases*

El objetivo de las plantas de limpieza de gases es acondicionar los gases metalúrgicos provenientes de las etapas de fusión y conversión para producir ácido sulfúrico ($H_2SO_4$). Estos gases, compuestos principalmente de $SO_2$ (entre 7% y 12%) y Material Particulado (MP), son captados por precipitadores electroestáticos, llevándose hacia las plantas de limpieza de gases. En estas instalaciones se realiza la producción de $H_2SO_4$, para su posterior comercialización.

#### *1.4.5.4. Electrorrefinación*

Esta es la última etapa del cobre sulfurado, y se lleva a cabo mediante un sistema múltiple (paralelo), en el cual se colocan ánodos y cátodos intercalados en el interior de una celda electrolítica, en donde son expuestos a electrólisis, es decir, se les aplica corriente eléctrica, para disolver los ánodos y cátodos. Las celdas están conectadas en serie para formar secciones. Cada serie, de veintiséis (26) a cuarenta y dos (42) celdas, constituye una parte independiente que puede ser aislada eléctrica y químicamente para las operaciones de colocación y retiro de electrodos, limpieza de residuos y mantenimiento. Las secciones están conectadas eléctricamente para que la tensión total sea del orden de cien (100) a doscientos cincuenta (250) Voltios (V), dependiendo del equipo de la planta. Una vez instalados los ánodos y cátodos, se conecta la energía eléctrica y el cobre se corroe gradualmente en los ánodos para depositarse sobre los cátodos. Lo usual es que un ánodo permite producir dos cátodos, proceso que se extiende por 12 a 14 días. Al final de un ciclo, cada ánodo ha sido disuelto electroquímicamente en casi el 85 %. Los restos de los ánodos

sin disolver (desperdicio o chatarra) se retiran de las celdas y, después de lavados, se funden y se vuelven a vaciar como ánodos nuevos. Se retira el electrolito de las celdas y los residuos del ánodo se canalizan hacia un sistema de donde se recolectan y desde donde son transportados a la planta de recuperación de metales preciosos. Entonces comienza de nuevo el ciclo de refinación. Es así como se obtienen cátodos de cobre con una pureza del 99,99%, para ser comercializados en el mercado mundial (Corporación Nacional del Cobre, 2019f). En la **Figura 1.5** se muestra el diagrama general del proceso que se lleva a cabo en una fundición de cobre.

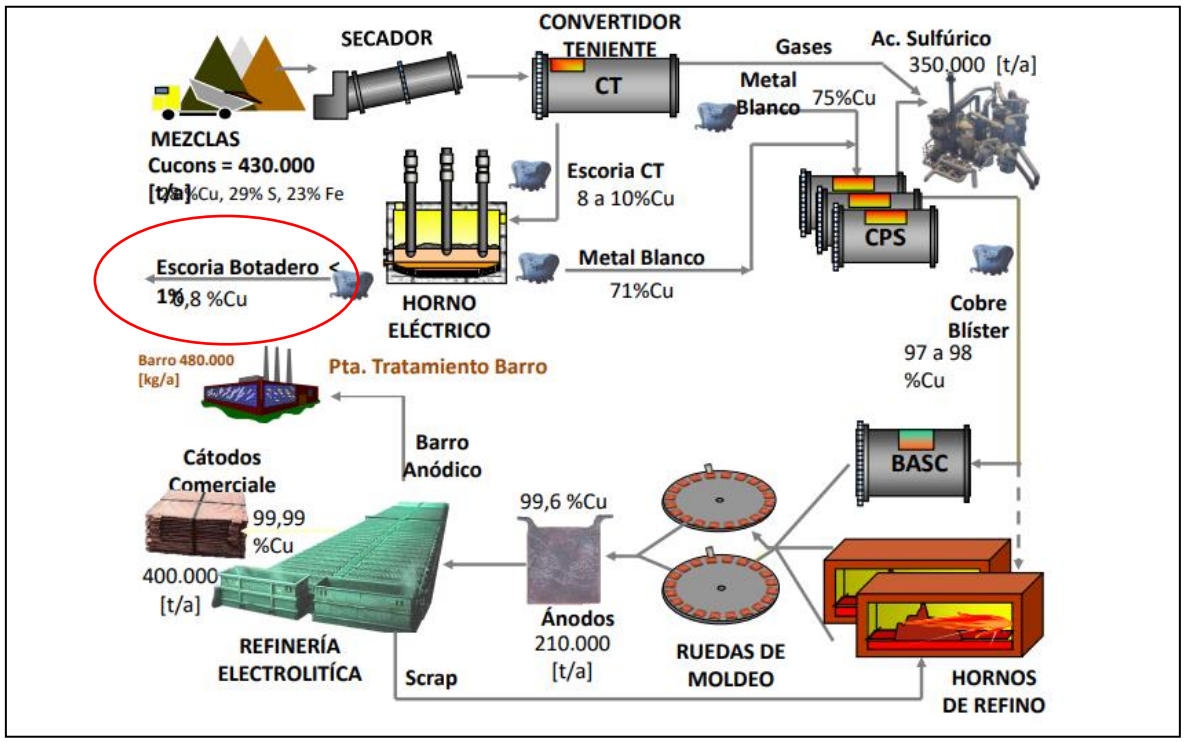


**Figura 1.5:** *Diagrama general del proceso productivo de fundición Codelco. Fuente: Adaptado de Codelco, 2015.*

## 1.5. FUNDICIONES DE COBRE EN CHILE

En Chile existían, 7 fundiciones de cobre, Altonorte, Chagres, Caletones, Chuquicamata, Potrerillos, Ventanas y Hernán Videla Lira. De ellas, Chuquicamata, Potrerillos y Ventanas tiene una refinería. Cabe señalar que Caletones, Chuquicamata, Potrerillos y Ventanas están bajo el control de Codelco, Hernán Videla Lira de Enami, mientras que Altonorte pertenece a la firma suiza Glencore y Chagres a Anglo American. En ellas se lleva a cabo el proceso para incrementar progresivamente la ley o contenido de cobre del material, logrando que la pureza inicial del concentrado de cobre aumente desde el 30% hasta 99,5% en el ánodo (Codelco, 2019). Es importante mencionar que la Fundición Ventanas de Codelco cesó sus operaciones en mayo del 2023.

### 1.5.1. Emisiones y Residuos

Las fundiciones de cobre en Chile son una fuente importante de emisiones atmosféricas, puesto que estas se caracterizan por contener: Dióxido de Azufre ($SO_2$), el cual es un gas tóxico y contribuye a la formación de la lluvia ácida; Material Particulado (MP fino o grueso), el cual puede contener metales pesados y al ser inhalados genera problemas para la salud; Arsénico (As), Mercurio (Hg), Plomo (Pb) y Cadmio (Cd), los cuales son elementos altamente tóxico para el medio ambiente y la salud de las personas (Sistema de Información Ambiental, 2021). Asimismo, estas generan grandes volúmenes de residuos industriales sólidos, los cuales, producto de su naturaleza y cantidad, deben contar con condiciones adecuadas de disposición final, para controlar los riesgos asociados. Por otra parte, es importante mencionar que generan residuos mineros masivos, que tal como su nombre lo indica, constituyen residuos sólidos que se generan en grandes volúmenes, en esta categoría se incluyen los relaves, los ripios, el material estéril y las escorias (Codelco, 2012). Cabe señalar que su gestión está enfocada principalmente a incentivar su reutilización y reciclaje, puesto que no presentan un riesgo a la salud humana ni al medio ambiente cuando son debidamente tratados,

## 1.6. EFECTOS AMBIENTALES DE LA ACTIVIDAD MINERA

Tal como se indicó anteriormente, Chile es uno de los principales productores y exportadores de cobre, por lo que la actividad minera (tanto metálica como no metálica) ha ido generando diferentes efectos en el medio ambiente. Durante los años 80', las compañías mineras estatales figuraron entre los peores contaminantes del medio ambiente, y las instituciones responsables hicieron muy poco por cambiar sus conductas (Lagos, 1997). A mediados de los años 80', a raíz de las diferentes demandas que las personas presentaron contra la Corporación Nacional del Cobre (Codelco) en sus diferentes faenas, contra la Empresa Nacional de Minería (Enami), contra la Compañía Minera del Pacífico (CMP), entre otros; y, los cambios internacionales en los que proteger el medio ambiente se volvía un objetivo, es que algunas de las compañías públicas en el sector minero comenzaron a asignar fondos para solucionar los problemas ambientales más serios (Lagos, 1997). De acuerdo a lo señalado, la actividad minera genera diferentes efectos ambientales en su distintas etapas, desde la exploración geológica hasta el cierre de la faena. En especial en el proceso de fundición, en el cual el medioambiente está expuesto a impactos negativos más o menos significativos. Entre los que destaca la contaminación atmosférica generada por la emisión de gases sulfurosos, la contaminación de agua por emisión de efluentes líquidos con contenido de metales pesados, riesgos ambientales por las condiciones de los tranques de relaves activos y abandonados, entre otros (Sánchez & Enríquez, 1996).

## 1.7. CÓDIGOS, REGLAMENTOS, REGULACIÓN Y LEGISLACIÓN APLICABLE EN CHILE

Entre las exigencias legales con la que debe cumplir la actividad minera en su etapa de fundición en Chile, se encuentran:

a. Ley Sobre Bases Generales del Medio Ambiente del Ministerio Secretaría General de la Presidencia (1994): Establece los principios y procedimientos para la protección del medio ambiente y la evaluación de impacto ambiental de proyectos industriales, incluidas las fundiciones de cobre.

b. Decreto 28 del Ministerio del Medio Ambiente (2013): Establece Norma de Emisión para Fundiciones de Cobre y Fuentes Emisoras de Arsénico.

c. Decreto 104 del Ministerio del Medio Ambiente (2019): Establece Norma Primaria de Calidad de Aire para Dióxido de Azufre ($SO_2$).

d. Decreto 12 del Ministerio del Medio Ambiente (2022): Establece Norma Primaria de Calidad Ambiental para Material Particulado Respirable (MP10).

e. Decreto 12 del Ministerio del Medio Ambiente (20122): Establece Norma Primaria de Calidad Ambiental para Material Particulado Fino Respirable (MP2,5).

## 1.8. CORPORACION NACIONAL DEL COBRE

La Corporación Nacional del Cobre (Codelco) es una empresa estatal y la principal productora de cobre en Chile. Su historia comienza con la promulgación de la reforma constitucional que nacionalizó el cobre el 11 de julio de 1971 a través de la Ley 17.450, pero no es hasta el 1 de abril de 1976, que se crea Codelco como se conoce hoy en día. Gracias a la nacionalización del cobre en 1971, los yacimientos de Chuquicamata y el Teniente, propiedad de Braden Copper Co. y Exploration Company hasta esa fecha, pasaron a ser propiedad del Estado chileno.

Hoy en día, Codelco ejecuta sus operaciones a través de ocho (8) divisiones mineras, las cuales están distribuidas desde la región de Antofagasta hasta la región de O'Higgins, como se muestra en la **Figura 1.6**, estas son: Radomiro Tomic, ubicada al norte de Calama en la provincia del Loa, realiza sus operaciones desde 1997, con una producción de 301.062 toneladas métricas de cobre fino (tmf) en el 2022; Chuquicamata, ubicada en la región de Antofagasta, realiza sus operaciones desde 1915, con una producción de 268.348 [tmf] en el 2022; Ministro Hales, la división más joven de Codelco, ubicada al norte de Calama operando desde el año 2010, con una producción de 152.167 [tmf] en el 2022; Gabriela Mistral, la que tiene operaciones desde el año 2008, con una producción de 109.524 [tmf] en el 2022; Salvador, la que tiene operaciones desde el año 1959, con una producción de 32.065 [tmf] en el 2022; Andina, la que tiene operaciones desde 1970, con una producción de 177.027 [tmf] en el 2022; El Teniente, la que tiene operaciones desde el año 1905, con una producción de 405.429 [tmf] en el 2022; y finalmente, División Ventanas, fundición y refinería, que hasta mayo del año 2023 fundía cobre de la pequeña y mediana minería, la

que tiene operaciones desde el año 1964, y actualmente solo opera su refinería con el cumplimiento del 100% de la norma de captura de emisiones (Codelco, 2022).

## 1.9. DIVISIÓN VENTANAS

La División Ventanas comenzó la construcción de sus plantas en 1961 las cuales fueron inauguradas en años distintos. La fundición fue inaugurada el 30 de septiembre de 1964, por el presidente Jorge Alessandri, y la refinería electrolítica en 1966, por el presidente Eduardo Frei Montalva (Codelco, 2023). Esta división estuvo bajo la administración de ENAMI hasta el año 2005, cuando el Ministerio de Minería, a través de la Ley 19.993

**Figura 1.6:** *Divisiones mineras de la Corporación Nacional del Cobre. Fuente: Codelco, 2015.*

AUTORIZA A LA EMPRESA NACIONAL DE MINERÍA TRANSFERIR A LA EMPRESA CORPORACIÓN NACIONAL DEL COBRE DE CHILE LA FUNDICIÓN Y REFINERÍA LAS VENTANAS, luego de que Codelco comprará los activos de la división a ENAMI. En el año 1992, se inauguró el primer plan de descontaminación con una inversión de US$100 millones de la época, producto de que, en ese año, se declaró zona satura por $SO_2$ y $MP_{10}$ a la zona industrial de Ventanas.

La División está ubicada en la zona costera de la región de Valparaíso, en la localidad de Las Ventanas, en la comuna de Puchuncaví. Su producción se basa en el procesado de concentrado de cobre de la pequeña y mediana minería, para obtener ánodos y cátodos de este material, con una capacidad de procesamiento alrededor de 400.000 [ton/año] de concentrados de cobre electrolítico, siendo reconocidos por sus altos niveles de pureza (99,99%), una de las más altas a nivel mundial (Codelco, 2022), además de la producción de ácido sulfúrico ($H_2SO_4$).

En el año 2022, luego de reiteradas situaciones de emergencia ambiental que se registraron en la bahía de la Región de Valparaíso, se anunció el cierre de la Fundición Ventanas (CNN Chile, 2023). Es así como esta División de Codelco avanzó hacía el cese de sus

operaciones, el cual se lleva a cabo de forma gradual. Es así, como en el mes de marzo del año 2023, modificando la Ley 19.993 es que se permitió el cese operacional de la fundición antes mencionada, por lo que el día 31 de mayo del 2023, y tras 58 años de operación, Codelco cerró Ventanas (Ibarra, 2023).

Es importante destacar que, a pesar de que la fundición Ventanas ha detenido sus operaciones y no sigue generando emisiones y/o residuos sólidos, aún está presente la escoria que ha sido acumulada en el depósito autorizado desde su origen, por lo que, esto sigue representando un impacto en el entorno.

## 1.10. ESCORIA DE COBRE

La escoria de fundición se produce en la etapa de fusión del concentrado de cobre. Esta es un material de desecho del proceso pirometalúrgico que se lleva a cabo en estas instalaciones. Durante la fundición del concentrado de cobre se producen dos fases líquidas inmiscibles entre sí, las que se pueden clasificar como: mata rica en cobre (sulfuro) y la escoria (óxido). La mata pasa a procesos posteriores de conversión, mientras que la escoria fundida se descarga directamente o pasa a procesos de recuperación de cobre, logrando que tengan un porcentaje menor al 1% de cobre antes de ser descartadas. En las etapas de recuperación de cobre en Hornos Eléctricos de Limpieza de Escoria (HLE) es posible recuperar el cobre contenido en escorias de alta ley, las que se encuentran entre 4 – 10% de cobre, que provienen de los procesos de fusión (horno) o conversión (Gálvez, 2015). La escoria de cobre es uno de los residuos industriales finales del proceso pirometalúrgico aplicado a los concentrados de minerales de cobre que ingresan a la fundición. Este residuo habitualmente es depositado y acopiado directamente en vertederos autorizados. En ocasiones, si posee una rentabilidad comercial y previa al vertido final, estas escorias pasarán por un proceso de flotación que permite recuperar los metales contenidos en ella. Finalmente, la escoria resultante se vierte en lugares aptos para ello (Mejías, 2017).

La escoria de cobre se considera un pasivo ambiental y puede permanecer en los lugares de acopio por décadas, lo que involucra la ocupación de grandes extensiones de superficies de terreno. Es por ello que en los últimos años, ha habido un creciente interés en buscar alternativas de uso para éstas, llegando a ser utilizada a nivel mundial en diversos sectores productivos, como un sustituto parcial del cemento hidráulico, como gravilla para líneas de ferrocarriles, como árido en mezclas asfálticas de obras viales, como árido constituyente de los morteros y hormigones de cemento, como abrasivo en la limpieza por chorro de arena de estructuras metálicas y en ocasiones en albañilerías de bloques de escoria moldeados (Mejías, 2017).

La obtención por procesos pirometalúrgicos a nivel mundial alcanza alrededor del 80% (Davenport et al., 2002). Se sabe que, por cada tonelada de cobre producido, se generan alrededor de 2,2 toneladas de escoria, lo que implica que en un año se produzcan unas 4,5 millones de toneladas de escoria (INDUAMBIENTE, 2022). Según el origen del mineral, la escoria podría contener una variedad de componentes tóxicos y peligrosos, incluyendo

metales pesados como arsénico, plomo y cadmio, así como compuestos de azufre y otros contaminantes. Los volúmenes vertidos ocupan grandes extensiones de superficies de terreno y muchas veces restan terreno cultivable e impactan negativamente al medio ambiente por la potencial lixiviación natural de metales pesados y por la contaminación visual del paisaje (Nazer et al., 2011).

Las escorias de cobre pueden ser vertidas y enfriadas lentamente al aire, o pasar por un proceso de enfriamiento rápido con chorro de aire o agua. Las escorias enfriadas al aire son de color negro vítreo y muestran una baja absorción de agua, mientras que las que son enfriadas con agua son amorfas, granuladas y con mayor capacidad de absorción. Es frecuente encontrar en las escorias de cobre modernas altos contenidos de $SiO_2$ (10-71%) y FeO (0,7-62%) y los elementos químicos predominantes corresponden al Cu, Pb, Ni y Zn. Sus fases mineralógicas forman principalmente fayalita y magnetita. Además, algunas escorias de cobre muestran elevado contenido de CaO, compuesto que otorgaría efectos positivos en las propiedades mecánicas de materiales conglomerantes para su uso como material de construcción (Pardo, 2018).

Hasta el mes de mayo del 2023, la escoria de la fundición Ventanas era dispuesta en los depósitos de escorias o escoriales, es decir, en los sitios de almacenamiento y acopio de la escoria del proceso pirometalúrgico. El escorial de Codelco Ventanas estaba regulado mediante la Resolución N° 2.258 del 8 de junio del 2011, a través de la cual la Secretaría Regional Ministerial (SEREMI) de Salud de la región de Valparaíso autorizó el funcionamiento del depósito de escorias de la producción de cobre de la división Ventanas, del sector indicado en la Resolución Sernageomín (Servicio Nacional de Geología y Minería) N° 1209/2005 (Superintendencia del Medio Ambiente, 2013).

En la **Figura 1.7** se presenta la localización del depósito de escoria de la fundición en las dependencias de la División Ventanas.

**Figura 1.7:** *Localización depósito de escoria de la fundición Ventanas de Codelco. Fuente: SMA,2013.*

# 2. PROBLEMA

Como se especificó en incisos anteriores, la escoria de fundición de cobre es un residuo generado durante el proceso pirometalúrgico del cobre a partir de minerales sulfurados. Aunque es un residuo común en la industria metalúrgica, su manejo y disposición inadecuados pueden resultar en una serie de problemas ambientales significativos. La escoria de fundición de cobre contiene una variedad de componentes tóxicos y peligrosos, incluyendo metales pesados como arsénico, plomo y cadmio, así como compuestos de azufre y otros contaminantes. Cuando se descartan de manera inapropiada, estas sustancias pueden filtrarse en el suelo y las aguas subterráneas, causar la contaminación del entorno y poner en riesgo la salud humana y la biodiversidad.

La principal problemática ambiental que surge de la escoria de fundición de cobre como pasivo ambiental es su potencial para liberar contaminantes en el medio ambiente a medida que se descompone con el tiempo. Esto puede ocurrir cuando la escoria se almacena en montones sin medidas adecuadas de contención y sellado. La lixiviación de metales y otros compuestos químicos tóxicos de la escoria puede llevar a la contaminación del suelo y las aguas superficiales y subterráneas, la calidad del agua potable y los ecosistemas acuáticos.

Para abordar esta problemática, se han realizado diversas investigaciones y pruebas en busca de soluciones sostenibles que permitan reutilizar la escoria de fundición de cobre y minimizar su impacto ambiental, como la utilización de la escoria en la construcción, la estabilización y solidificación, recuperaciones de metales, entre otras; las cuales han obtenido resultados positivos.

Si bien la Fundición Ventanas de Codelco ha cesado sus operaciones, esta posee toneladas de escoria acumuladas en el depósito autorizado para este residuo, por lo que es esencial minimizar los impactos negativos que este podría producir al ser considerado un pasivo ambiental. Es por esto, que mediante la estrategia de economía circular se busca proponer un proceso de valorización que podría ayudar a disminuir la cantidad acumulada de este residuo voluminoso de la cuprífera Codelco.

# 3. OBJETIVOS

## 3.1. OBJETIVO GENERAL

Proponer un proceso de valorización de la escoria de Fundición Ventanas de Codelco bajo el concepto de economía circular.

## 3.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

1. Caracterizar y determinar la cantidad potencial de escoria disponible para ser valorizada.

2. Identificar y seleccionar técnicas aplicables para la valorización de la escoria de la fundición Ventanas de Codelco.

3. Evaluar económica y ambientalmente, a nivel de prefactibilidad, la viabilidad del proceso de valorización seleccionado.

# 4. METODOLOGÍA

El desarrollo del presente trabajo de título se efectuó mediante un levantamiento de información a partir de revisión bibliográfica e información obtenida por parte de la Fundición Ventanas de Codelco. Luego, esta información se analizó y se evaluó con la finalidad de elaborar una propuesta de valorización de la escoria generada en la empresa.

## 4.1. CARACTERIZACIÓN Y DETERMINACIÓN DE LA CANTIDAD DE ESCORIA

Para llevar a cabo el primer objetivo específico, se solicitó información al área de medio ambiente de la Fundición Ventanas y se realizó una revisión bibliográfica, con la finalidad de obtener datos y registros históricos de la generación de escoria de la empresa a lo largo de su funcionamiento.

Para la caracterización de la escoria, se tomó en consideración la información solicitada a la cuprífera Codelco. Del mismo modo, se realizó una revisión bibliográfica para conocer la caracterización general de la escoria generada en las fundiciones.

Por otra parte, para determinar la cantidad de escoria generada, se recopiló información de los diferentes reportes de sustentabilidad de la empresa Codelco, en los cuales se detalla año tras año la cuantificación de escoria que se generan en las diferentes fundiciones de Codelco y su disposición final. Luego, con esta información se realizó una suma simple de las toneladas acumuladas año tras año, para así obtener las toneladas totales acumuladas de este material. Esto se realizó utilizando una plantilla Excel como la que se muestra en la **Tabla 4.1**.

**Tabla 4.1:** *Toneladas de escoria generadas por año de cada fundición de Codelco.*

| Residuo minero masivo generado (escoria), en miles de toneladas | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Fundición | Año | | | | | | Total acumulado |
| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | |
| | | | | | | | |
| | | | | | | | |
| | | | | | | | |
| | | | | | | | |
| | | | | | | | |

La definición de cada columna de la **Tabla 4.1**, es la siguiente:

- Fundición: corresponde a cada una de las fundiciones de la cuprífera Codelco.
- Año: corresponde a cada uno de los años de acumulación de escoria.

- Total acumulado: corresponde a la suma de las toneladas totales acumuladas de escoria.

## 4.2. IDENTIFICACIÓN Y SELECCIÓN DE ALTERNATIVAS DE VALORIZACIÓN DE LA ESCORIA

### 4.2.1. Revisión bibliográfica

Para lograr llevar a cabo el segundo objetivo, se realizó una revisión bibliográfica de las diferentes tecnologías disponibles, que existen actualmente para la valorización de la escoria de cobre. Con esto se buscó identificar la mejor alternativa para el proceso de valorización que se pretende proponer.

### 4.2.2. Selección de la tecnología

Para la selección de la tecnología se creó una matriz de ponderación o priorización, la cual consiste en criterios ponderados y utilizados para escoger entre un conjunto de opciones por medio de matemáticas simples (Betancourt, 2018). En la **Tabla 4.2** se explican cada uno de los criterios a evaluar.

Asimismo, para evaluar cada criterio, a se les asignó una puntuación de uno (1) a tres (3), siendo 1 lo más bajo y 3 lo más alto, debido a la importancia que le entrega cada uno de estos a la tecnología, tal como se muestra en la **Tabla 4.3**.

Por lo tanto, para evaluar cada una de las tecnologías, y teniendo en cuenta lo especificado con anterioridad, se procedió a calcular el total obtenido por cada una, para determinar cuál de ellas posee mayor puntaje y proceder a seleccionarla, pues se entiende que es la opción más adecuada.

**Tabla 4.2:** *Explicación y ponderación de criterios de evaluación.*

| Criterio | Explicación | Ponderación |
|---|---|---|
| Nivel de madurez de la tecnología | La escala de madurez tecnológica (TRL, por sus siglas en inglés) es una medida para describir el estado de desarrollo o madurez de una tecnología (Salazar, 2020). | 30% |
| Complejidad del proceso | Se refiere al nivel de sofisticación y dificultad de la ejecución de la tecnología, es decir, que tan complejo es o no la puesta en marcha de la tecnología en cuestión. | 40% |
| Generación de residuos | Se refiere a que si la puesta en marcha del proceso genera residuos que pueden provocar un efecto negativo en el medioambiente. | 30% |

**Tabla 4.3:** *Puntuación de clasificación.*

| Criterio | Puntuación | | |
|---|---|---|---|
| | 1 | 2 | 3 |
| Nivel de madurez de la tecnología | Nivel de madurez bajo, se cuenta con pruebas de laboratorio como validación. | Nivel de madurez intermedio, se cuenta con un prototipo validado en un ambiente real. | Nivel de madurez más alto, a sido llevado a cabo a nivel industrial. |
| Complejidad del proceso | Muy complejo, requiere de personal calificado para la operatividad, además de equipos e instrumentos sofisticados, lo cual conlleva a costos elevados. | Medianamente complejo, la tecnología no requiere de equipos muy sofisticados | Sin complejidad, la tecnología se puede desarrollar fácilmente |
| Generación de residuos | Genera otros residuos (incluso peligrosos) | Genera escoria residual | Genera residuos propios del proceso |

### 4.2.3. Diseño conceptual de la solución

Luego de escoger la tecnología, se realizó el bosquejo de la validación de esta, realizando una memoria de cálculos, sus respectivos diagramas con los requerimientos necesarios para poder llevar a cabo la realización del modelo de la solución.

## 4.3. EVALUACIÓN ECONÓMICA Y AMBIENTAL, A NIVEL DE PREFACTIBILIDAD, DE LAS ALTERNATIVAS PROPUESTAS

### 4.3.1. Evaluación ambiental

Para el caso de la evaluación ambiental, se definió calcular la Tasa de valorización anual de residuos no peligrosos que se destinan para valorización, donde se representa el porcentaje de residuos no peligrosos que se destina para el reciclaje. Este indicador pretende hacer seguimiento a la meta 12.5 de “reducir considerablemente la generación de residuos mediante actividades de prevención, reducción, reciclado y reutilización” que forma parte de la Agenda 2030 de los Objetivos de Desarrollo Sostenible (Ministerio del Medio Ambiente, 2018), para ello se utilizó la **Ecuación 4.1**.

$$TV = \frac{cantidad\ de\ residuosno\ peligrosos\ valorizados}{cantidad\ total\ de\ residuos\ no\ peligrosos\ generados}$$

**Ecuación 4.1:**
*Fórmula para calcular la tasa de valorización anual de residuos no peligrosos.*

### 4.3.2. Evaluación económica

Para la realización de la prefactibilidad económica, se realizó una determinación de costos mediante una cotización de cada uno de los equipos y maquinas requeridos para la implementación de la tecnología, luego esto se consideró como inversión inicial del proyecto.

#### *4.3.2.1. Flujo de caja*

Posterior, a la determinación de costos, se procedió a realizar un flujo de caja, el cual, es reporte financiero que sirve para diferenciar los egresos de los ingresos de dinero en un período determinado (Urzúa, 2022). Para ello se consideraron los costos de inversión de cada una de las maquinarias y equipos requeridos para el proyecto. Además, se consideraron los beneficios y gastos que se generaron con el proyecto, en un periodo determinado de tiempo.

#### *4.3.2.2. Cálculo de VAN y TIR*

Finalmente, se procedió a calcular el Valor Actual Neto (VAN) y la Tasa Interna de Retorno (TIR), con el fin de conocer que tan rentable es la puesta en marcha del proyecto.

El Valor Actual Neto (VAN) y la Tasa Interna de Retorno (TIR) son indicadores financieros que permiten analizar, de una forma segura, el posible proyecto de inversión (Ramírez, 2022). La VAN tiene por objetivo dar a conocer la posible rentabilidad del proyecto mediante la fórmula matemática presentada en la **Ecuación 4.2**, así mismo, se tienen tres (3) posibles resultados:

- **VAN = 0.** Sí el resultado es igual a cero (0), se determina que el proyecto no dará ganancias ni perdidas, o sea, es indiferente.
- **VAN > 0.** Cuando el valor obtenido es mayor a cero (0) se asume que el proyecto será rentable.
- **VAN < 0.** Si el valor obtenido es menor a cero (0) se considera el proyecto no viable.

$$VAN = -I_0 + \sum_{t=1}^{n} \frac{F_n}{(1+r)^n}$$

**Ecuación 4.2:**
*Fórmula matemática para calcular el Valor Actual Neto*

Donde:
*$I_0$, corresponde a la inversión inicial*
*n, corresponde al periodo*
*r, corresponde a la tasa de descuento*

Para el caso de la TIR, esta viene a ser la tasa de descuento que hace que el valor del VAN sea igualado a cero (0). Razón por la cual su resultado siempre será expresado de manera porcentual. El objetivo de la TIR es mostrar el valor de rendimiento de la inversión realizada comparable a una tasa de interés expresado en porcentajes (Ramírez, 2022). La TIR, se calcula mediante la **Ecuación 4.3** y se tienen tres posibles resultados (al igual que la VAN).

- Si la TIR es < r se determina que el proyecto debe ser rechazado.

- Si la TIR es > r entonces el proyecto será viable y puede ser aprobado.
- En el caso de que la TIR = 0, el proyecto en principio debe ser rechazado. Es cierto, que desde el punto de vista estratégico puro, se podría decidir invertir, pero a nivel financiero no compensa asumir dicho riesgo.

$$TIR = \sum_{T=0}^{n} \frac{F_n}{(1+i)^n} = 0$$

**Ecuación 4.3:**
*Fórmula matemática para calcular la Tasa Interna de Retorno.*

Donde:
*$F_n$, corresponde al flujo de caja en el periodo n*
*n, corresponde al número de periodos*
*I, corresponde al valor de la inversión inicial*

# 5. RESULTADOS

## 5.1. CARACTERIZACIÓN Y DETERMINACIÓN DE LA CANTIDAD DE ESCORIA

Como se mencionó en capítulos anteriores, la escoria de fundición es generada durante el proceso de fusión de concentrados en el CT. Luego, ésta es enviada al HLE, en el cual se separa la escoria del cobre contenido en ella, resultando un metal blanco (que es reincorporado al proceso) y escoria de descarte, la cual es enviada a su disposición final, es decir, el escorial o depósito de escoria autorizado para la fundición.

En primer lugar, a partir de la revisión bibliográfica que se realizó, se concluyó que la escoria de fundición no clasifica como Residuo Peligroso (Respel), según lo expuesto en el Decreto Supremo N° 148/2004 el que "*APRUEBA REGLAMENTO SANITARIO SOBRE MANEJO DE RESIDUOS PELIGROSOS".* El cual establece en su artículo 23 que la escoria proveniente de las operaciones de extracción, beneficio o procesamiento de minerales no será considerada residuo peligroso (Ministerio de Salud, 2004). Además que, a nivel internacional, la Agencia de Protección del Medioambiente de Estados Unidos (USEPA) estableció que las escorias del procesamiento de cobre son clasificadas como residuo No Peligroso (USEPA, 2023), pues están incluidos en el listado de residuos especiales del organismo mencionado anteriormente; esto es relevante para este trabajo, ya que si la escoria de fundición hubiese clasificado como Respel, no se podría considerar como un material potencial de valorización.

Por otra parte, cabe señalar que la escoria se forma a partir de los óxidos contenidos en la carga del horno de los óxidos de hierro que se producen por la oxidación durante el proceso pirometalúrgico (Sepúlveda, 2006), por lo cual presenta diferentes rangos de concentración de estos óxidos, los cuales se detallan en la **Tabla 5.1**.

**Tabla 5.1:** *Composición porcentual de óxidos fundamentales presentes en la escoria. Adaptado de Gálvez, 2015.*

| **Composición química de la escoria** | |
|---|---|
| **Componente** | **Rango concentración (%)** |
| Óxido de hierro (FeO, $Fe_3O_4$) | 30-40 |
| Óxido de silicio ($SiO_2$) | 35-40 |
| Óxido de aluminio ($Al_2O_3$) | Hasta 10 |
| Óxido de calcio (CaO) | Hasta 10 |

Ahora bien, en la **Tabla 5.2** y **Tabla 5.3**, se señala la composición química y física de la escoria de la Fundición Ventanas de Codelco, según la información extraída desde la Hoja de Datos de Seguridad (HDS) facilitada por la cuprífera Codelco.

**Tabla 5.2:** *Composición porcentual de la escoria de la fundición Ventanas. Fuente: Hoja de Datos de Seguridad.*

| **Composición/información sobre los componentes** | |
|---|---|
| **Componente** | **Rango concentración (%)** |
| Óxido de hierro (FeO, $Fe_3O_4$) | 45-50 |
| Cobre | 0,80-0,84 |
| Óxido de calcio (CaO) | 0,2-0,4 |
| Azufre (S) | 0,5-0,6 |
| Arsénico (As) | 0,07-0,010 |
| Plomo | 0,3-0,5* |
| **ppm: partes por millón* | |

**Tabla 5.3:** *Características físicas de la escoria de la fundición Ventanas. Fuente: Hoja de Datos de Seguridad.*

| **Información sobre propiedades físicas y químicas de la escoria:** | |
|---|---|
| Aspecto: | Solido de color negro, de distintas granulometrías |
| Olor: | Inodoro |
| pH: | No aplica |
| Solubilidad: | Poco soluble |
| Humedad: | 0,1% |
| Densidad real del árido [kg/m3]: | 3.747 |
| Densidad real del árido seco [kg/m3]: | 3.741 |
| Corrosivo: | No |
| Estabilidad química: | Estable en condiciones normales de almacenamiento, presión y temperatura |

Además, de la literatura se ha podido obtener información complementaria de la composición de la escoria de la fundición Ventanas. En la **Tabla 5.4** se detalla información de un análisis químico realizado por el Laboratorio de Control de la Calidad de la fundición a la escoria del depósito (Gálvez, 2015).

**Tabla 5.4:** *Composición porcentual de la escoria de la fundición Ventanas. Adaptada de Gálvez, 2015.*

| **Componente** | **Composición (%)** |
|---|---|
| Cobre (Cu) | 0,800 |
| Arsénico (As) | 0,006 |
| Antimonio (Sb) | 0,008 |
| Sílice ($SiO_2$) | 25,950 |
| Azufre (S) | 0,372 |
| Hierro (Fe) | 41,760 |
| Magnetita ($Fe_3O_4$) | 10,00 |

A partir de la información presentada con anterioridad, se evidencia que la escoria de la Fundición Ventanas de Codelco posee un alto porcentaje de óxidos de fierro. Esta característica podría considerarse como un aspecto favorable para este trabajo, ya que, al buscar la valorización y su reintroducción en el mercado, se persigue identificar las mejores oportunidades para su reutilización.

En cuanto a la determinación de la cantidad potencial de escoria disponible para valorizar, se consultaron los reportes de sustentabilidad de la empresa Codelco, de los cuales se obtuvieron que desde el año 2005 (año en que la fundición Ventanas pasó a ser propiedad de Codelco) al año 2020 (último año en que se reportó la generación de escoria en los

reportes de sustentabilidad de la empresa) se generaron y, por ende, acumularon, 4.133.065 toneladas de escoria de cobre anual en el escorial.

La **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** muestra el total acumulado del periodo 2005 - 2010, puesto que entre esos años los reportes de sustentabilidad declaraban la generación de escoria de la División Codelco Norte, división que estaba constituida por las operaciones de Chuquicamata y Radomiro Tomic (esta última no funde cobre); División Salvador, constituida por la operaciones de Salvador y fundición Potrerillos; División Andina (división que no funde cobre); División Ventanas, constituida por fundición y refinería electrolítica y División El Teniente, constituida por las operaciones de mina subterránea y fundición Caletones.

En el gráfico que se presenta en la **Figura *5.1***, se muestra que entre los años 2005 y 2010, la fundición Ventanas acumuló el 15% del total acumulado de escoria de las cuatro fundiciones que constituyen a la cuprífera Codelco.

Así mismo, la **Tabla 5.6** presenta el total acumulado del periodo 2011 - 2020, puesto que entre esos años los reportes de sustentabilidad declaraban la generación de escoria producida por las ocho (8) Divisiones que comprenden a Codelco, a pesar de que, en algunas de ellas no se funde cobre. Cabe señalar que la información relevante es la cantidad de escoria generada en las cuatro (4) fundiciones de la cuprífera.

En el gráfico que se presenta en la **Figura 5.2**, se muestra que el 30% de la escoria acumulada de la cuprífera Codelco, corresponde a escoria generada en la fundición Ventanas.

**Tabla 5.5:** *Toneladas de escoria generada en cada una de las fundiciones de Codelco período 2005-2010. Fuente: Reportes de sustentabilidad Codelco.*

| **Residuo minero masivo generado (escoria), en miles de toneladas** | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| **Fundición** | **Año*** ** | | | | | | **Total acumulado** |
| | 2005 | 2006 | 2007 | 2008 | 2009 | 2010 | |
| Codelco Norte | 197 | 241 | 243 | 885 | 823 | 808 | 3197 |
| Salvador (Potrerillos) | 278 | 333 | 344 | 339 | 353 | 351 | 1998 |
| Andina | N/A | N/A | N/A | N/A | N/A | N/A | 0 |
| **Ventanas** | **205** | **301** | **256** | **279** | **288** | **156*** | **1485** |
| El Teniente (Caletones) | 691 | 767 | 701 | 777 | 690 | ** | 3626 |

**División Ventanas reprocesó una parte de la escoria generada.*

***División El Teniente reprocesó el 100% de la escoria generada.*

*N/A: No aplica, no se genera este tipo de residuo minero masivo.*

****Fuente:* (Codelco, 2005)*;* (Codelco, 2006)*;* (Codelco, 2007)*;* (Codelco, 2008)*;* (Codelco, 2009)*;* (Codelco, 2010)*.*

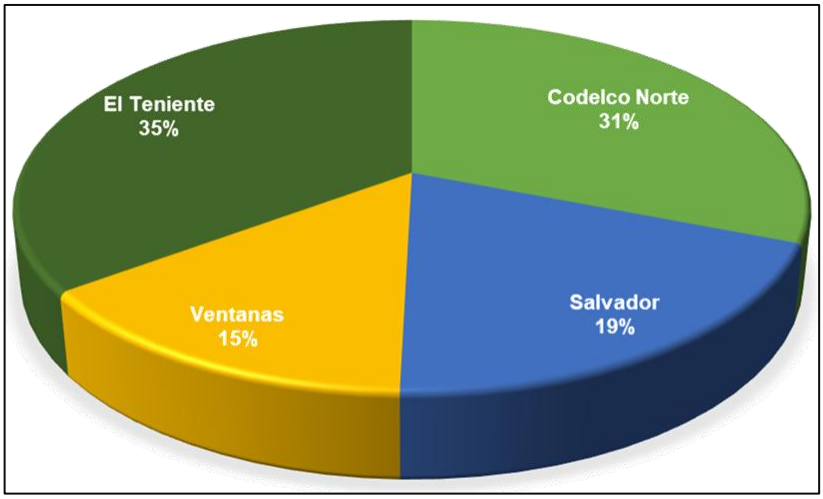


**Figura 5.1:** *Porcentaje acumulado de escoria período 2005-2010. Elaboración propia a partir de los reportes de sustentabilidad de los años indicados.*

**Tabla 5.6***: Toneladas de escoria generada en cada una de las fundiciones de Codelco período 2010-2020. Fuente: Reportes de sustentabilidad Codelco de los años indicados.*

| **Residuo minero masivo generado (escoria), en miles de toneladas** | | | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Fundición | Año* | | | | | | | | | | Total acumulado |
| | 2011 | 2012 | 2013 | 2014 | 2015 | 2016 | 2017 | 2018 | 2019 | 2020 | |
| Radomiro Tomic | N/A | N/A | N/A | N/A | N/A | N/A | N/A | N/A | N/A | N/A | 0 |
| Chuquicamata | 712 | 604 | 603 | 675 | 737 | 683,6 | 560,2 | 16 | 26 | 2.4 | 4616,8 |
| Ministro Hales | N/A | N/A | N/A | N/A | N/A | N/A | N/A | N/A | N/A | N/A | 0 |
| Gabriela Mistral | N/A | N/A | N/A | N/A | N/A | N/A | N/A | N/A | N/A | N/A | 0 |
| Salvador (Potrerillos) | 361 | 263 | 289 | 206 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1119 |
| Andina | N/A | N/A | N/A | N/A | N/A | N/A | N/A | N/A | N/A | N/A | 0 |
| **Ventanas** | **292** | **264** | **255** | **286** | **278** | **259,3** | **280** | **243** | **252** | **238,765** | **2648,1** |
| El Teniente (Caletones) | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 253 | 92 | 0 | 0 | 345 |

*N/A: No aplica, no se genera este tipo de residuo minero masivo.*

**Fuente:* (Codelco, 2011); (Codelco, 2012); (Codelco, 2013); (Codelco, 2014); (Codelco, 2015); (Codelco, 2016); (Codelco, 2017); (Codelco, 2018); (Codelco, 2019); (Codelco, 2020).

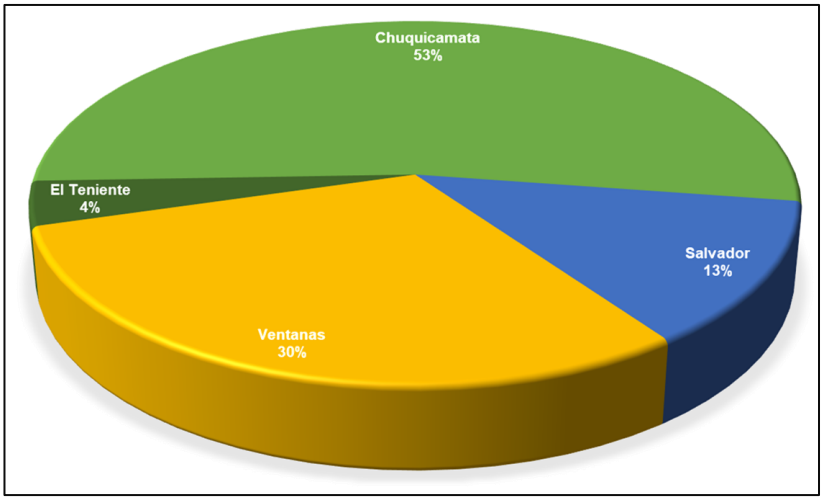


**Figura 5.2:** *Porcentaje acumulado de escoria período 2010-2020. Elaboración propia a partir de los reportes de sustentabilidad de los años indicados.*

Ahora bien, para conocer la cantidad total de escoria acumulada en el depósito de escoria de la Fundición Ventanas de Codelco, se procedió a sumar los totales acumulados de los periodos en los que fue entregada la información, lo que resultó en:

$$\text{Escoria Total Acumulada} = 1.485 + 2.648{,}065 =$$

$$= 4.133{,}065 \text{ (en miles de ton)} =$$

$$= 4.133.065 \text{ [ton]}$$

Esto, a su vez, se complementa con la información entregada por el departamento de medioambiente de la División Ventanas de Codelco, información que se presenta en la **Tabla 5.7.**

**Tabla 5.7***: Cantidad potencial de escoria acumulada en el escorial de la fundición Ventanas de Codelco.*

| | Cantidad | Unidad de medida |
|---|---|---|
| **Volumen** | 1.781.338 | $m^3$ |
| **Masa** | 4.453.345 | ton |

Finalmente, para determinar la cantidad potencial a valorizar, se tomó en cuenta la tecnología que se escoja en los próximos objetivos, puesto que de la eficiencia de ésta dependerá la cobertura de valorización que se realice, es decir, la cantidad real que será tratada. Cabe destacar que, al ya conocer la cantidad real acumulada de escoria, se tiene una visión general de lo que se quiere abarcar con el desarrollo de este trabajo.

## 5.2. IDENTIFICACIÓN Y SELECCIÓN DE ALTERNATIVAS DE VALORIZACIÓN DE LA ESCORIA

Actualmente, existe una tendencia mundial para que las industrias procesadoras operen bajo un régimen sin residuos. Asimismo, es bien sabido que la industria minera, tanto extractiva como procesadora, genera una gran cantidad de residuos mineros masivos tales como relaves, estériles, minerales de baja ley, ripios de lixiviación y escoria de fundición, los cuales son dispuestos en terrenos cercanos a la operación de la faena minera en donde son generados.

Por otra parte, aun cuando el concepto de valorización de la escoria de fundición de cobre no es un tema nuevo, puesto que durante muchos años este residuo ha sido objeto de investigación con el fin de ser tratadas y/o utilizadas, la documentación y evidencia directa acerca de este tema resulta escasa. Aun así, se ha constatado de casos a nivel mundial en los que los residuos mineros masivos, en este caso la escoria de fundición de cobre, a nivel mundial, se ha destinados para diferentes usos (Nazer et al., 2021). Así es como, dentro de las tecnologías estudiadas, se encontraron diferentes oportunidades en los que se ha utilizado el concepto de economía circular para la valorización de este residuo (Candia, 2020).

### 5.2.1. Revisión bibliográfica

Las tecnologías descritas en el presente capitulo tienen tres (3) enfoques diferentes, por un lado, se encuentran las que detallan el reciclaje de la escoria de cobre en materiales de construcción, también se encuentran las que detallan la reutilización de las escoria, y finalmente, se encuentran las que detallan la recuperación del cobre y otro elemento de valor contenido en la escoria. A continuación, se describen las tecnologías que se consideraron en el presente trabajo.

#### *5.2.1.1. Reciclaje de escoria de cobre*

Para el caso del reciclaje de escoria, existen diferentes estudios sobre los posibles usos que se le puede brindar a este residuo, entre los que destacan:

- **Estabilización de suelos arcillosos**: Según el estudio experimental realizado por Gupta et al., (2012), los suelos arcillosos expansivos, por su naturaleza inestable, pueden representar un peligro para las edificaciones construidas sobre ellos. Estos suelos tienen la capacidad de expandirse hasta un 10% si absorben agua. Por lo que los investigadores de este trabajo quisieron conocer el comportamiento técnico de la arcilla cuando se estabiliza con escoria de cobre; de lo que concluyeron que existen combinaciones posibles de arcilla estabilizada con escoria de cobre que resultarían satisfactorias para obtener buenas estabilizaciones en este tipo de suelo.

- **Elaboración de baldosas**: En el trabajo realizado por Nazer et al., 2012, se obtuvieron resultados que permitieron concluir que el proyecto tiene viabilidad de producción y es económicamente rentable. Para ello, se seleccionaron tres (3) depósitos de escoria abandonados de la región de Atacama, y se evaluó técnica y económicamente la construcción y puesta en marcha de una planta industrial productora de pavimentos de baldosas de escoria de cobre, con el fin de reciclar el material de los diferentes escoriales abandonados existentes.

#### *5.2.1.2. Reutilización de la escoria de cobre*

Por otra parte, se encontraron investigaciones que buscaban encontrar una alternativa para la escoria de las fundiciones de cobre en Chile, entre las que destacan:

- **Estudio de Factibilidad para el Empleo de la Escoria de Cobre en Hormigones:** Según Gálvez (2015), se pudo constatar que la escoria no presenta limitaciones como árido y puede ser utilizada en hormigones, además de no mostrar diferencias significativas en su resistencia a compresión flexo-tracción. Esto lo concluyó a partir de la caracterización granulométrica realizada a cuatro (4) muestras diferentes, tomadas desde el escorial de la Fundición Ventanas.

- **Utilización de Escoria de Cobre como Agregado Pétreo:** En el estudio realizado por Pardo (2018) valida el uso de la escoria de cobre como agregado pétreo para su utilización como una alternativa sustentable y físicamente viable en las propiedades de Tratamiento Superficial Simple, Lechadas Asfálticas y Carpeta de Sello tipo Cape Seal. En el desarrollo del trabajo se evaluó y comparó las propiedades mecánicas de la escoria de cobre como reemplazante del agregado pétreo convencional. Además, concluyó que las nuevas tecnologías siempre sugieren un cambio en la forma en la que se plantean y llevan a cabo los diferentes proyectos, por lo que esto influye de manera positiva en el país.

#### *5.2.1.3. Recuperación de cobre contenido en escoria de cobre*

- **Método de flotación**: En el trabajo realizado en el año 2018 por investigadores de la Universidad de Atacama en conjunto con la Planta Manuel Antonio Matta de la Empresa Nacional de Minería, se investigó el procesamiento de las escoria del Horno de Reverbero (HR) y horno Convertidor Teniente (CT) de la fundición Hernán Videla Lira, mediante flotación, para recuperar el cobre contenido. Para ello, se realizó una caracterización química, mineralógica y metalúrgica de ambas escorias, y se realizaron pruebas de flotación para determinar las variables de operación para ambos tipos de escoria. Los resultados obtenidos a nivel de laboratorio fueron usados a nivel industrial en la Planta Matta, logrando conseguir resultados satisfactorios, entre los que destacan que para la escoria del HR se logró una recuperación del 56,1% de cobre con una ley del 18,2; mientras que para la escoria del CT se obtuvo una ley del 39,1% de cobre con una recuperación del 91,4%.

- **Método de lixiviación**: A partir de la aplicación de la metodología de “Lixiviación amoniacal para extraer cobre a partir de escorias oxídicas”, desarrollada por investigadores de la Pontificia Universidad Católica de Valparaíso (2016), se busca extraer el cobre residual presente en la escoria proveniente del proceso pirometalúrgico y que tenga una alta ley de cobre en forma de óxido de cobre. Esta invención se presenta como una alternativa de mejora, que permite el mejor aprovechamiento de los recursos naturales y la optimización de los procesos productivos minero

### 5.2.2. Selección de la tecnología

Para realizar la selección de la tecnología se evaluaron cada uno de los criterios considerados como importantes que debe contener cada una de las tecnologías enlistadas en la sección anterior. La evaluación de cada una de las tecnologías, se presentan desde la **Tabla 5.8** hasta la **Tabla 5.13**, según los criterios definidos en el capítulo de metodología.

**Tabla 5.8:** *Evaluación técnica para la “Estabilización de suelos arcillosos”.*

| Criterio | Puntuación | | | Ponderación | Puntaje obtenido |
|---|---|---|---|---|---|
| | 1 | 2 | 3 | | |
| Nivel de madurez de la tecnología | Validación de laboratorio | Validación piloto | Validación a nivel industrial | 30% | 0,3 |
| Complejidad del proceso | Muy complejo | Medianamente complejo | Sin complejidad | 40% | 1,2 |
| Generación de residuos | Otros residuos (incluso peligrosos) | Generación escoria residual | Residuos propios del proceso | 30% | 0,9 |
| | | | | **TOTAL** | **2,4** |

**Tabla 5.9:** *Evaluación técnica para la “Elaboración de baldosas”.*

| Criterio | Puntuación | | | Ponderación | Puntaje obtenido |
|---|---|---|---|---|---|
| | 1 | 2 | 3 | | |
| Nivel de madurez de la tecnología | Validación de laboratorio | Validación piloto | Validación a nivel industrial | 30% | 0,3 |
| Complejidad del proceso | Muy complejo | Medianamente complejo | Sin complejidad | 40% | 1,2 |
| Generación de residuos | Otros residuos (incluso peligrosos) | Generación escoria residual | Residuos propios del proceso | 30% | 0,9 |
| | | | | **TOTAL** | **2,4** |

**Tabla 5.10:** *Evaluación técnica para la "Fabricación de hormigón".*

| Criterio | Puntuación | | | Ponderación | Puntaje obtenido |
|---|---|---|---|---|---|
| | 1 | 2 | 3 | | |
| Nivel de madurez de la tecnología | Validación de laboratorio | Validación piloto | Validación a nivel industrial | 30% | 0,6 |
| Complejidad del proceso | Muy complejo | Medianamente complejo | Sin complejidad | 40% | 0,8 |
| Generación de residuos | Otros residuos (incluso peligrosos) | Generación escoria residual | Residuos propios del proceso | 30% | 0,9 |
| | | | | **TOTAL** | **2,3** |

**Tabla 5.11:** *Evaluación técnica para el "Uso de escoria de cobre como agregado pétreo para solución de caminos básicos".*

| Criterio | Puntuación | | | Ponderación | Puntaje obtenido |
|---|---|---|---|---|---|
| | 1 | 2 | 3 | | |
| Nivel de madurez de la tecnología | Validación de laboratorio | Validación piloto | Validación a nivel industrial | 30% | 0,6 |
| Complejidad del proceso | Muy complejo | Medianamente complejo | Sin complejidad | 40% | 1,2 |
| Generación de residuos | Otros residuos (incluso peligrosos) | Generación escoria residual | Residuos propios del proceso | 30% | 0,9 |
| | | | | **TOTAL** | **2,7** |

**Tabla 5.12:** *Evaluación técnica para la "recuperación de cobre por lixiviación".*

| Criterio | Puntuación | | | Ponderación | Puntaje obtenido |
|---|---|---|---|---|---|
| | 1 | 2 | 3 | | |
| Nivel de madurez de la tecnología | Validación de laboratorio | Validación piloto | Validación a nivel industrial | 30% | 0,6 |
| Complejidad del proceso | Muy complejo | Medianamente complejo | Sin complejidad | 40% | 0,4 |
| Generación de residuos | Otros residuos (incluso peligrosos) | Generación escoria residual | Residuos propios del proceso | 30% | 0,3 |
| | | | | **TOTAL** | **1,3** |

**Tabla 5.13:** *Evaluación técnica para la "recuperación de cobre por flotación".*

| Criterio | Puntuación | | | Ponderación | Puntaje obtenido |
|---|---|---|---|---|---|
| | 1 | 2 | 3 | | |
| Nivel de madurez de la tecnología | Validación de laboratorio | Validación piloto | Validación a nivel industrial | 30% | 0,9 |
| Complejidad del proceso | Muy complejo | Medianamente complejo | Sin complejidad | 40% | 0,4 |
| Generación de residuos | Otros residuos (incluso peligrosos) | Generación escoria residual | Residuos propios del proceso | 30% | 0,3 |
| | | | | **TOTAL** | **1,6** |

Como fue posible observar en las evaluaciones anteriores, la tecnología de “Utilización de escoria de cobre como agregado pétreo para solución de caminos básicos”, fue la que obtuvo mayor puntaje, con un total de 2,7. No obstante, el documento que contiene esta información presenta una visión general del tema en cuestión, abarcando aspectos fundamentales y relevantes, pero no suficientes para conocer si el proceso de valorización de la escoria de la fundición Ventanas que se pretende implementar será viable tanto técnica, como económica y ambientalmente, por lo que se pretende realizar una adaptación de esta tecnología, lo cual se especifica en la sección siguiente (diseño conceptual de la solución).

### 5.2.3. Diseño conceptual de la solución

Como se especificó con anterioridad, se decidió adaptar la tecnología seleccionada, pues se cree que, aunque no esté del todo desarrollada, presenta un gran potencial para la valorización de escoria.

Para realizar esto, se evaluó la instalación de un proceso de chancado, para reducir el tamaño de la escoria, puesto que se debe velar con el cumplimiento de los requisitos granulométricos especificados en el Volumen N°5 Especificaciones Técnicas Generales de Construcción (ETGC) del Manual de Carreteras (MC) del Ministerio de Obras Públicas (MOP), el cual pretende que las obras ejecutadas alcancen la calidad y duración considerada en los proyectos (Dirección de Vialidad, 2018). Para ello, se tomó en consideración las especificaciones para la construcción de carpetas asfálticas (sello tipo cape seal, lechada asfáltica y tratamiento superficial simple) mediante la incorporación de escoria de cobre como árido.

- **Sello Cape Seal:** Según lo dispuesto en el MC, sección 5.404.1, un sello del tipo cape seal está constituido por una primera capa de tratamiento superficial asfaltico simple, consistente en una aplicación de asfalto recubierta por áridos de granulometría con tamaño máximo de 20 [mm] (3/4 pulgadas); y una segunda capa de lechada asfáltica, de granulometría de tamaño máximo de 10 [mm] (3/8 pulgadas).

- **Lechada asfáltica:** Según lo dispuesto en la sección 5.406.1 del MC, las lechadas asfálticas corresponden a una mezcla de agregado fino (áridos) bien graduado, emulsión asfáltica (de rompimiento lento “SS” o acelerado “QS”), filler (relleno mineral) y agua. Cabe señalar, que los áridos deben cumplir con alguna de las granulometrías presentadas en la **Tabla 5.14**, sin embargo, en este caso se quiere cumplir con las especificaciones de la banda granulométrica Tipo C-1, pues es la banda que presenta áridos más finos.

- **Tratamiento Superficial:** Por su parte, el tratamiento superficial consiste en sucesivas aplicaciones de asfalto recubiertas por áridos que de acuerdo con el número de aplicaciones de riegos de asfalto y áridos, reciben el nombre de tratamiento superficial simple (una aplicación), doble (dos (2) aplicaciones) o triple (tres (3) aplicaciones), según lo dispuesto en el Volumen N°5 del Manual de Carreteras. Para este trabajo, se consideraron las especificaciones de la banda granulométrica TN 2,5-10 especificadas en la **Tabla 5.15**, ya que tradicionalmente es la utilizada para el TSS.

**Tabla 5.14:** *Bandas granulométricas para lechada asfáltica. Fuente: Volumen N°5 del Manual de Carreteras.*

| TAMICES | | BANDAS GRANULOMÉTRICAS PORCENTAJE EN PESO QUE PASA | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| (mm) | (ASTM) | Tipo A-1 | Tipo B-1 | Tipo C-1 | Tipo D-1 |
| 12,5 | (1/2") | | | | 100 |
| 10,0 | (3/8") | | 100 | 100 | 85 - 98 |
| 5,0 | (N°4) | 100 | 85 - 95 | 70 - 90 | 62 - 80 |
| 2,5 | (N°8) | 85 - 95 | 62 - 80 | 45 - 70 | 41 - 61 |
| 1,25 | (N°16) | 60 - 80 | 45 - 65 | 28 - 50 | 28 - 46 |
| 0,63 | (N°30) | 40 - 60 | 30 - 50 | 18 - 34 | 18 - 34 |
| 0,315 | (N°50) | 25 - 42 | 18 – 35 | 12 - 25 | 11 - 23 |
| 0,16 | (N°100) | 15 - 30 | 10 – 24 | 7 - 17 | 6 - 15 |
| 0,08 | (N°200) | 10 - 20 | 5 – 15 | 5 - 11 | 4 - 9 |

**Tabla 5.15:** *Requisitos de agregados pétreos para TSS. Fuente: Vol. n°5 del Manual de Carreteras*

| TAMICES mm (ASTM) | TN 25 – 12,5 | TN 20 - 10 | TN 12,5 - 5 | TN 10 – 2,5 | TN 5 – 2,5 | TN 20 – 12,5a | TN 20 – 12,5b | TN 10 – 6,3a | TN 10 – 6,3b |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 40 (1 ½") | 100 | | | | | | | | |
| 25 (1") | 90 – 100 | 100 | | | | 100 | 100 | | |
| 20 (3/4") | 20 – 55 | 90 –100 | 100 | | | 85 – 100 | 95 – 100 | | |
| 12,5 (1/2") | 0 – 10 | 20 – 55 | 90 – 100 | 100 | | 0 – 20 | 0 – 20 | 100 | 100 |
| 10 (3/8") | 0 – 5 | 0 – 15 | 40 – 70 | 85 – 100 | 100 | 0 – 7 | 0 – 5 | 95 – 100 | 85 – 100 |
| 6,3(1/4") | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | 0 – 40 | 0 – 25 |
| 5 (Nº 4) | --- | 0 – 5 | 0 – 15 | 10 – 30 | 85 – 100 | --- | --- | 0 – 5 | 0 – 10 |
| 2,5 (Nº 8) | --- | --- | 0 – 5 | 0 – 10 | 10 – 40 | 0 – 1 | --- | --- | 0 – 1 |
| 1,25 (Nº 16) | --- | --- | --- | --- | --- | --- | 0 - 1 | 0 - 1 | --- |
| 0,08 (Nº 200) | 0 – 0,5 | 0 – 0,5 | 0 – 0,5 | 0 – 0,5 | 0 – 0,5 | 0 – 0,5 | 0 – 0,5 | 0 – 0,5 | 0 – 0,5 |

Ahora bien, para el proceso de chancado, se procedió a seleccionar el equipo que mejor se ajusta a las especificaciones requeridas, es decir, el que cumple con la obtención del tamaño necesario de escoria. Para esto, se revisaron las diferentes opciones de chancadores existentes en el mercado.

Los chancadores de rocas se utilizan para reducir el tamaño de las rocas y piedras en la producción de agregados, aplicaciones de reciclaje de materiales de construcción y en operaciones mineras (Metso, 2023). En el mercado existen diferentes tipos de estos

equipos, los cuales se clasifican según la manera que tienen para romper el material. En la **Tabla 5.16** se caracterizan los diferentes tipos de chancadores disponibles.

**Tabla 5.16:** *Tipos de Chancadores. Fuente: Elaboración propia, en base a descripción de Metso.*

| Clasificación | Características | Tipo de chancador |
|---|---|---|
| Chancador de compresión | Presionan el material hasta que se rompe | De mandíbula (**Figura 5.3**): Este utiliza una mandíbula fija y otra móvil para triturar el material mediante un movimiento de compresión. Es ideal para materiales duros y abrasivos. |
| | | Giratorio (**Figura 5.4**): Se asemeja al chancador de mandíbulas, pero con un eje central que gira, lo que permite un proceso de trituración más uniforme. Se utiliza comúnmente para materiales duros y abrasivos en la minería. |
| | | De cono (**Figura 5.5**): Funciona mediante la compresión entre una pared cóncava y una superficie cónica, lo que reduce el material a tamaños más pequeños. Es adecuado para materiales duros y abrasivos, y es común en la industria de la construcción y la minería. |
| Chancador de impacto | Utilizan el principio de impactos rápidos para triturar el material | De impacto (**Figura 5.6**): Emplea el impacto para triturar rocas y minerales. Utiliza una alta velocidad de rotación y un impacto de alta energía para romper el material. Es útil para materiales blandos y semiduros. |

**Figura 5.3:** *Chancador de mandíbula. Fuente: Chancador de mandíbula Nordberg® Serie C™ - Metso A.*

**Figura 5.4:** *Chancador giratorio.Fuente: Chancador primario giratorio MKIII - Metsol*

**Figura 5.5:** *Chancador de cono.Fuente: Chancadores de cono – Metso*

**Figura 5.6:** *Chancador de impacto. Fuente: Chancadores de impacto - Metso*

Ahora bien, teniendo en consideración la información entregada en los incisos anteriores, se propuso el proceso señalado en la **Figura 5.7**, el cual representa el esquema general del proceso, abarcando desde la extracción de la escoria desde el escorial hasta la separación de las partículas según la granulometría requerida.

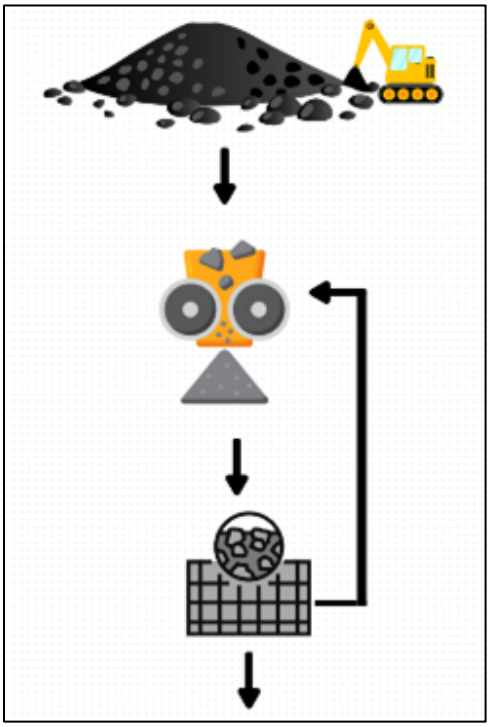

**Figura 5.7:** *Representación gráfica del proceso.*

Cabe señalar, que en el proceso de chancado y harneado (o tamizado), no existe un cambio de materia, sino que ocurre una disminución en el tamaño de las partículas de entrada y salida, por lo que, al realizar el balance al proceso, se obtuvo el porcentaje de carga circulante con la cual se lleva a cabo el proceso, el cual corresponde al porcentaje de rechazo que se recircula, pues este no cumple con el tamaño de las partículas requeridas.

A continuación, se detalla cada una de las etapas por las cuales está constituido el proceso, detallando sus entradas y salidas, además de las consideraciones que se tuvieron para realizar los diferentes cálculos.

- **Etapa 1**: Mezclador

*Entrada*: Los flujos de entrada al mezclador están representados por las letras “X” y “R”, correspondientes a la escoria proveniente del escorial y la escoria recirculada (no cumple con la granulometría de salida), respectivamente. Cabe señalar que el flujo de entrada “X” es un flujo conocido, pues los chancadores poseen una capacidad de procesamiento del mineral definida en las especificaciones técnicas, en este caso se consideró una base de cálculo de 105 (ton/h) de capacidad de procesamiento. También es importante mencionar que el flujo conocido está compuesto completamente por material grueso, no así el flujo recirculado, el cual está constituido por 89% de material grueso y 11% de material fino.

*Salida*: El flujo de salida del mezclador, corresponde al flujo representado por la letra “A”, el cual está constituido por la mezcla de escoria que se desea procesar. En la **Figura 5.8** se presenta el diagrama de flujo del mezclador.

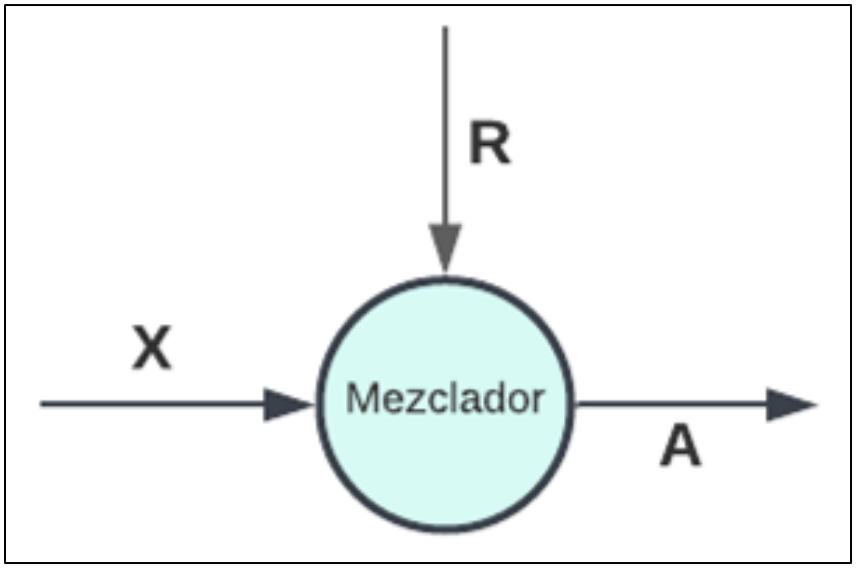


**Figura 5.8:** *Diagrama de flujo del mezclador.*

- **Etapa 2:** Chancado

*Entrada*: El flujo de entrada al chancador, corresponde al flujo representado por la letra “A”, el cual está constituido por la mezcla de escoria que se desea procesar, proveniente de la etapa anterior.

*Salida*: El flujo de salida del mezclador, corresponde al flujo representado por la letra “B”, el cual será la misma cantidad que el flujo de entrada, pues en el chancador ocurre la disminución del tamaño de partículas, por lo cual no hay variación entre la cantidad de escoria que ingresa y que sale. En la **Figura 5.9** se presenta el diagrama de flujo del mezclador.

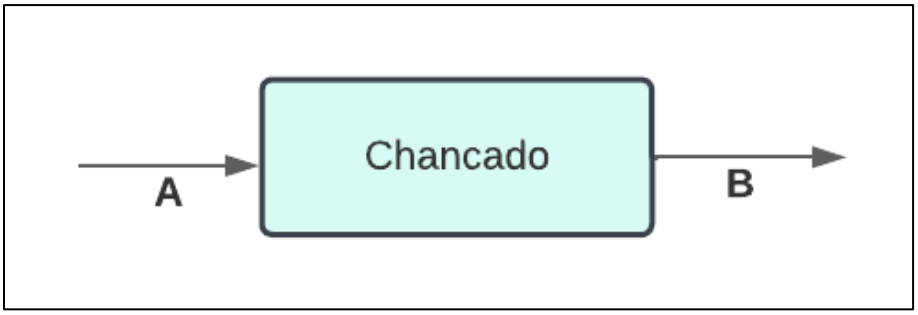


**Figura 5.9:** *Diagrama de flujo del chancador.*

- **Etapa 3:** Harneado o tamiz

*Entrada*: El flujo de entrada al harnero está representado por la letra “B”, el cual corresponde a la escoria triturada proveniente del chancador. En esta etapa, se desea separar el material fino del material grueso para su posterior utilización.

*Salida*: El flujo de salida del harnero, corresponde a los flujos representados por las letras “C” y “R”, los cuales corresponden a la salida de escoria fina y la escoria que recirculará, respectivamente, tal como se muestra en la **Figura 5.10**.

Asimismo, en la **Figura 5.11** se muestra el diagrama general del proceso, en el cual se especifica la composición porcentual de finos y gruesos presentes en cada uno de los flujos másicos que interactúan en el sistema

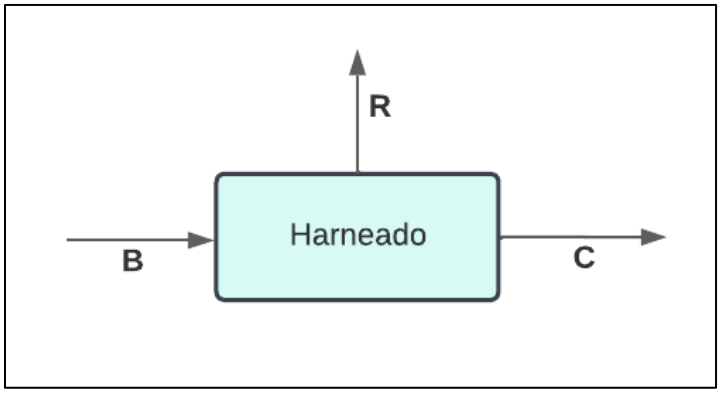


**Figura 5.10:** *Diagrama de flujo del harnero.*

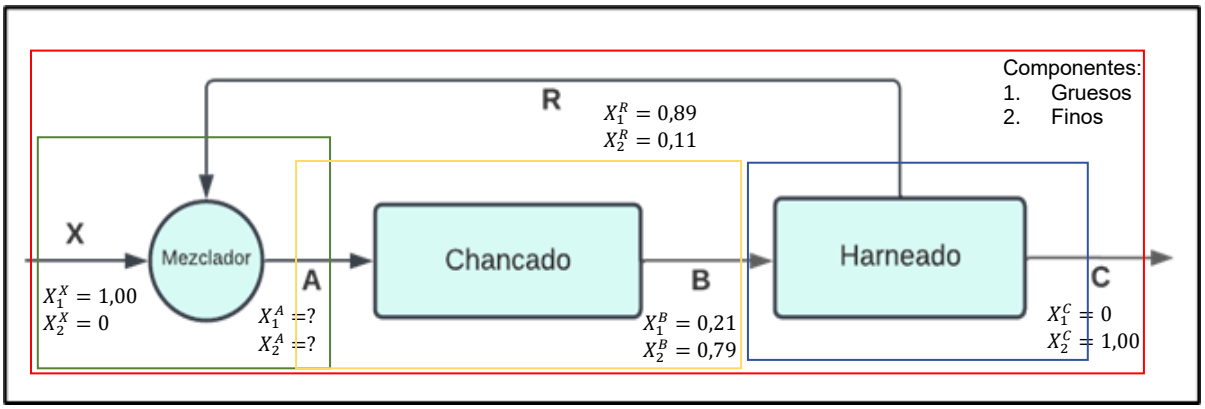


**Figura 5.11:** *Diagrama general del proceso.*

Finalmente, se procedió a realizar cálculos para conocer los flujos masicos en cada una de las operaciones del proceso, así como también, se realizó el cálculo de la carga circulante, la cual corresponde a la razón entre finos y gruesos que participan en el proceso. Esto se realizó con la finalidad de conocer la eficiencia del proceso propuesto. Para ello, se realizó la definición de ecuaciones que facilitaron la obtención de resultados.

1. $Balance\ general: X = C$
2. $Balance\ al\ mezclador: X + R = A$
3. $Balance\ al\ chancador: A = B$
4. $Balance\ al\ harnero: B = R + C$

Como ya se especificó con anterioridad, para efectos de este trabajo, se estipuló una base de cálculo de 105 [ton/h], la cual corresponde al flujo de entrada al mezclador, es decir, al flujo “X”. Por lo tanto:

Como X = C, C = 105 [ton/h]

Ahora bien, al conocer el flujo de salida del sistema, se procedió a realizar el balance al harnero. Para ello se consideró lo siguiente:

Ecuaciones:

5. $B = R + C \rightarrow B = R + 105 \left[\frac{ton}{h}\right]$
6. $X_1^B * B = X_1^R * R + X_1^C * C$
7. $X_2^B * B = X_2^R * R + X_2^C * C$

De la ecuación 6:

$$0{,}21 * B = 0{,}89 * R + 0 * 105 \left[\frac{ton}{h}\right]$$

$$0{,}21B = 0{,}89R$$

$$\frac{0{,}21}{0{,}89}B = R$$

$$0{,}2360B = R$$

De la ecuación 7:

$$0{,}79 * B = 0{,}11 * R + 1 * 105 \left[\frac{ton}{h}\right]$$

$$0{,}79B = 0{,}11(0{,}2360B) + 105 \left[\frac{ton}{h}\right]$$

$$0{,}79B = 0{,}0260B + 105 \left[\frac{ton}{h}\right]$$

$$0{,}79B - 0{,}0260B = 105 \left[\frac{ton}{h}\right]$$

$$0{,}764B = 105 \left[\frac{ton}{h}\right]$$

$$B = \frac{105}{0{,}764}$$

$$B = 137{,}43 \left[\frac{ton}{h}\right]$$

Volviendo a la ecuación 6:

$$0{,}2360B = R$$

$$0{,}2360 * 137{,}43 \left[\frac{ton}{h}\right] = R$$

$$32{,}43 \left[\frac{ton}{h}\right] = R$$

Por lo tanto, la cantidad de escoria gruesa que se recircula hacia el mezclador, y que posterior ingresa al chancador, es de 32,43 [ton/h].

Luego, se procedió a realizar el balance al mezclador, donde se definieron las ecuaciones que permitieron calcular la cantidad porcentual de material grueso y fino con la que ingresa la carga al chancador.

8. $X_1^X * X + X_1^R * R = X_1^A * A$
9. $X_2^X * X + X_2^R * R = X_2^A * A$
10. $X_1^A + X_2^A = 1{,}00$

A partir de la ecuación 9, se obtuvo:

$$0 * 105\left[\frac{ton}{h}\right] + 0{,}11 * 32{,}43\left[\frac{ton}{h}\right] = X_2^A * 137{,}43\left[\frac{ton}{h}\right]$$

$$3{,}5673\left[\frac{ton}{h}\right] = X_2^A * 137{,}43\left[\frac{ton}{h}\right]$$

$$\frac{3{,}5673\left[\frac{ton}{h}\right]}{137{,}43\left[\frac{ton}{h}\right]} = X_2^A$$

$$0{,}02 = X_2^A$$

Y, con la ecuación 10, se obtuvo:

$$X_1^A + 0{,}02 = 1{,}00$$

$$X_1^A = 1{,}00 - 0{,}02$$

$$X_1^A = 0{,}98$$

Por lo tanto, se concluye que la composición de la escoria que ingresa al chancador es 2% de finos y 98% de gruesos.

Finalmente, a través de la ecuación once (11), se calculó la carga circulante del proceso.

11. $\%CC = \frac{gruesos}{finos} * 100\%$

Donde:

%CC, *corresponde a la carga circulante*

gruesos, *corresponde a la masa recirculada desde el harnero*

finos, *corresponde a la masa de salida del harnero.*

Por lo tanto, a partir de lo anterior se obtiene:

$$\%CC = \frac{32{,}43\left[\frac{ton}{h}\right]}{105\left[\frac{ton}{h}\right]} * 100$$

$$\%CC = 30{,}89\%$$

Es decir, un 30,89% de la carga que ingresa al chancador es recirculada, pues no cumple con las especificaciones de granulometría requerida.

Finalmente, se escogió el chancador de cono de resorte compuesto, modelo LY1300(F), puesto que, según las especificaciones técnicas, es el que mejor se adecua al proceso; y el tamiz vibratorio (harnero) de alta eficiencia modelo SZZ1500, pues según especificaciones, cumple con los requisitos granulométricos. Ambos equipos se presentan en la **Figura 5.12** y **Figura 5.13**, respectivamente. Cabe señalar, que según la granulometría que se obtiene al final del proceso, la escoria procesada reemplazaría la arena y gravilla, siendo estos, los áridos que se emplean en la construcción de los caminos básicos.

**Figura 5.12:** *Chancador de cono modelo LY1300(F).*

**Figura 5.13:** *Tamiz vibratorio modelo SZZ1500.*

## 5.3. EVALUACIÓN ECONÓMICA Y AMBIENTAL, A NIVEL DE PREFACTIBILIDAD, DE LAS ALTERNATIVAS PROPUESTAS

### 5.3.1. Evaluación ambiental

Para el caso de la evaluación ambiental, se calculó la “Tasa nacional de valorización de residuos” (TVR), definida en el capítulo de metodología.

Para realizar esto, se consideró lo indicado en la **Tabla 5.17**.

**Tabla 5.17:** *Datos para calcular la tasa de valorización de residuos.*

| | |
|---|---|
| Capacidad del chancador | 105 [ton/h] |
| Total escoria acumulada | 4.133.065 [ton] |
| Jornada de trabajo | 1 día de trabajo equivale a 16 [h/día] |
| Tiempo de trabajo | 1 [año] equivale a 300 [días] |

Se tiene que:

$$Tiempo\ anual = \frac{300\ [días]}{1\ [año]} \times \frac{16\ [horas]}{1\ [día]} = 4.800\ [horas/año]$$

Por lo tanto:

$$Masa\ anual = 105\left[{}^{ton}/_{h}\right] \times 4.800[h/año] = 504.000[ton/año]$$

Finalmente, la tasa de valorización de residuo, para este caso corresponde a:

$$TVR = \frac{cantidad\ total\ anual\ de\ residuo\ no\ peligroso\ valorizado}{cantidad\ total\ de\ residuo\ no\ peligroso\ generado} * 100$$

$$TVR = \frac{504.000}{4.133.065} * 100$$

$$TVR = 12{,}2\%$$

En conclusión, al cabo de un año, se valorizaría un 12,2% de la escoria acumulada.

### 5.3.2. Evaluación Económica

Para el caso de la evaluación económica, se realizó una cotización para cada uno de los equipos y maquinarias requeridos para el proceso de valorización de la escoria de fundición de cobre. Luego, se procedió a calcular el total de costos, lo que se consideró como el costo total de inversión para el proyecto. Desde la **Tabla 5.18** a la **Tabla 5.20**, se presentan las cotizaciones de los equipos y maquinarias requeridos. Así mismo, en el *ANEXO 1: COTIZACIÓN DE LAS MAQUINARIAS Y EQUIPOS REQUERIDOS*ANEXO 1: COTIZACIÓN DE LAS MAQUINARIAS Y EQUIPOS REQUERIDOS, se presenta con mayor detalle las cotizaciones.

**Tabla 5.18:** *Cotización chancador de cono.*

| Nombre del equipo | Valor [UF] | Características | Imagen | Contacto |
|---|---|---|---|---|
| Trituradora de cono de resorte compuesto | 1688,98 | Modelo: LY1300(F)<br>Capacidad: 105 [ton/h]<br>máximo tamaño de alimentación [mm]: 145<br>Motor [kW]: 132-160 | | Contacto: Lichy Li<br>Teléfono: +862154081496<br>Fax:+8621 54083495<br>Oficina agregada: Sala 1108 #2008 Huqingping road, distrito de Qingpu, Shanghai, China 201700 |
| **Link de compra:** https://www.alibaba.com/product-detail/Compound-Spring-Cone-Crusher-Price-Mining_1600589649579.html?spm=a2700.galleryofferlist.normal_offer.d_image.23b12479JXtE7h | | | | |

**Tabla 5.19:** *Cotización tamiz vibratorio.*

| Nombre del equipo | Valor [UF] | Características | Imagen | Contacto |
|---|---|---|---|---|
| Maquinaria de fabricación de arena de alta eficiencia | 45,36 | Modelo: Capacidad: 90-200 [ton/h] Máximo tamaño de alimentación [mm]: 200 Motor [kW]: 7,5 | | - |
| Link de compra: https://www.alibaba.com/product-detail/High-Efficiency-Sand-Making-Machinery-Compost_1600825601749.html?spm=a2700.galleryofferlist.normal_offer.d_image.5d0a48bbKJEbAV | | | | |

**Tabla 5.20:** *Cotización máquina excavadora.*

| Nombre del equipo | Valor [UF] | Características | Imagen | Contacto |
|---|---|---|---|---|
| Cargadora de ruedas KOMATSU WA 320- 5 | 458,44 | Tipo cargador: Frontal Carga nominal: 15 [ton] TONELADAS Marca de bomba: Hidráulica Fuerza: 92 [kW] Horas Laborales: 2001-4000 | | - |
| **Link de compra:** https://www.alibaba.com/product-detail/Komatsu-Used-KOMATSU-WA-320-5_1600941557679.html?spm=a2700.7735675.0.0.6e82HdKcHdKcpp&s=p | | | | |

A partir de la descripción de las cotizaciones mostradas, se procedió a calcular el costo total en Unidad de Fomento (UF) de los equipos y maquinarias requeridos para este proyecto, lo cual se muestra en la **Tabla 5.21**.

**Tabla 5.21:** *Costos en UF de inversión por equipos y maquinarias. Elaboración propia.*

| Equipo | Cantidad | Costo unitario (UF) | Costo total (UF) |
|---|---|---|---|
| Trituradora de cono | 1 | 1688,98 | 1688,98 |
| Tamizadora | 1 | 45,36 | 45,36 |
| Excavadora | 1 | 458,44 | 458,44 |
| | | **Total** | **2.192,78** |

Por lo tanto, se concluye que se requieren de 2.192,78 UF como total de inversión para el presente proyecto.

### 5.3.3. Flujo de caja

Ahora bien, luego de obtener el valor de la inversión que se requiere, se procedió a realizar el flujo de caja del proyecto, con el fin de evaluar la factibilidad económica de este, para lo cual se tomaron en consideración los siguientes datos:

#### *5.3.3.1. Venta del servicio*

Se planificó la venta del servicio tomando en cuenta 300 días de operación anuales (según lo especificado en la evaluación ambiental) para la tecnología propuesta, con dieciséis (16) horas de trabajo diarias. Cada día se producirán 449, 08 [$m^3$] de escoria tratada; y como se pretende que el producto ingrese al mercado como reemplazo de áridos comunes utilizados en la construcción de caminos básicos, por cada metro cubico de escoria tratada se aplicó un cargo de 0,80 Unidad de Fomento chilena (UF) (ver Anexo "**Ventas del servicio**")

Estos mismos valores se utilizarán a lo largo de los 8 periodos contemplados, los cuales representan la vida útil de las maquinarias.

#### *5.3.3.2. Mano de obra*

Para poder operar la tecnología propuesta, se consideraron cinco (5) operarios, de los cuales se requieren dos (2) para operar el chancador (uno por turno), dos (2) para operar la excavadora (uno por turno) y un ingeniero en proceso. En la **Tabla 4.2** se muestra el sueldo anual de cada operador, lo cual permitió determinar el monto total asociado a la mano de obra directa (ver Anexo "**Mano de obra**").

**Tabla 5.22:** *Sueldos considerados para el total en mano de obra.*

| Cargo | Total (UF) |
|---|---|
| Operador(a) equipo de chancado | 636 |
| Operador de excavadora | 595,92 |
| Ingeniero en proceso | 456,12 |
| Total | 1.688,04 |

#### *5.3.3.3. Materiales*

En este ítem, se consideraron costos de repuestos que podrían llegar a requerir los equipos en caso de generarse alguna contingencia.

#### *5.3.3.4. Depreciación*

La depreciación de los equipos y/o maquinarias, que se aplicó fue la del método de depreciación lineal, el cual es un mecanismo mediante el que se reconoce el desgaste que

sufre un bien (activo fijo) por el uso que se haga de él. Cuando un activo es utilizado para generar ingresos, este sufre un desgaste normal durante su vida útil que al final lo lleva a ser inutilizable (INACAP, 2017). Para calcular la depreciación se utilizó la **Ecuación 5.1** que consiste en dividir el costo del equipo por sus años de vida útil, este último dato se obtuvo de la "Tabla de vida útil de los bienes físicos del activo inmovilizado", fijada por el Servicio de Impuestos Internos (SII) según la Resolución N°43 del 26-12-2002, con vigencia a partir del 01-01-2003. En la **Tabla 5.23** se muestran los datos de vida útil para cada uno de las maquinarias y equipos del proyecto.

$$Depreciación = \frac{Costo\ del\ equipo}{Vida\ útil}$$

**Ecuación 5.1**
*Fórmula para obtener la depreciación lineal de una maquinaria o equipo.*

**Tabla 5.23:** *Vida útil de los activos físicos (SII, 2003).*

| Equipo y/o maquinaria | Vida útil | Categoría SII |
|---|---|---|
| Trituradora de cono (chancador) | 8 | B.- Industria de la construcción: 1) Maquinaria destinada a la construcción pesada |
| Tamizadora | | |
| Excavadora | | |

Ahora bien, para obtener la depreciación anual total, se calculó la depreciación anual de cada uno de los equipos señalados anteriormente (ver Anexo "**Depreciación**"), en un periodo de ocho (8) años, resultando en una depreciación total anual de 274,1 UF.

#### *5.3.3.5. Tecnología por implementar*

Como se especificó anteriormente, para implementar la tecnología se consideró un chancador de cono, un tamiz vibratorio y una excavadora. Con estos equipos, se determinó el costo total, considerado como inversión inicial.

#### *5.3.3.6. Capital de trabajo*

El capital de trabajo se estimó a través del método de gasto acumulado, que consiste en los gastos asociados a la adquisición de materia primas (en este caso no aplica), mano de obra, costos indirectos de fabricación y los gastos de administración y venta, que se dividieron en doce (12) para saber cuánto son los costos aproximados en los primeros 12 meses del proyecto. Además, se tomaron los ingresos por ventas esperados del primer periodo (ver Anexo "**Capital de trabajo**") estimándose un total de 5.438,28 UF como capital de trabajo.

#### *5.3.3.7. Utilidades antes del impuesto*

Las utilidades antes del impuesto del proyecto reflejan la cantidad de dinero que ha generado en sus operaciones antes de que se apliquen los impuestos. Estas se calcularon mediante la diferencia entre los ingresos y gastos del proyecto (ver Anexo "**Utilidades antes del impuesto**").

#### *5.3.3.8. Impuestos*

Se consideró un impuesto a la renta de primera categoría del 27%, según el circular del SII N°52, 10-10-2014.

#### *5.3.3.9. Utilidad neta después del impuesto*

Para obtener la utilidad neta después del impuesto, se obtuvo la diferencia entre la utilidad antes del impuesto y los impuestos (ver Anexo "**Utilidades después del impuesto**").

Finalmente, con cada uno de los conceptos descritos anteriormente, se procedió a realizar el flujo de caja, el cual se detalla en la **Tabla 5.24** y **Tabla 5.25**.

**Tabla 5.24**: *Flujo de caja para la propuesta de valorización de la escoria de cobre de la Fundición Ventanas en el periodo de los años 0 y 4.*

| **Periodos (años)** | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| | 0 | 1 | 2 | 3 | 4 |
| **Ingresos (+)** | | | | | |
| Venta del servicio | - | 107.779,2 | 107.779,2 | 107.779,2 | 107.779,2 |
| Venta de activos | - | - | - | - | - |
| **Egresos (-)** | | | | | |
| Mano de obra | - | 1.688,04 | 1.688,04 | 1.688,04 | 1.688,04 |
| Materiales | 136,59 | - | - | - | - |
| Depreciación (-) | - | 274,1 | 274,1 | 274,1 | 274,1 |
| Inversión en tecnología | 2.192,78 | - | - | - | - |
| Capital de trabajo | 5.438,28 | - | - | - | - |
| Utilidades antes del I° | - | 105.817,06 | 105.817,06 | 105.817,06 | 105.817,06 |
| Impuesto (I°) | - | 28.570,61 | 28.570,61 | 28.570,61 | 28.570,61 |
| Utilidades después del I° | - | 77.246,45 | 77.246,45 | 77.246,45 | 77.246,45 |
| Depreciación (+) | - | 274,1 | 274,1 | 274,1 | 274,1 |
| Flujo de caja | -7.767,65 | 77.520,55 | 77.520,55 | 77.520,55 | 77.520,55 |

**Tabla 5.25:** *Flujo de caja para la propuesta de valorización de la escoria de cobre de la Fundición Ventanas en el periodo de los años 5 y 8.*

| Periodo (años) | | | | |
|---|---|---|---|---|
| | 5 | 6 | 7 | 8 |
| **Ingresos (+)** | | | | |
| Venta del servicio | 107.779,2 | 107.779,2 | 107.779,2 | 107.779,2 |
| Venta de activos | - | - | - | 293,38 |
| **Egresos (-)** | | | | |
| Mano de obra | 1.688,04 | 1.688,04 | 1.688,04 | 1.688,04 |
| Materiales | - | - | - | - |
| Depreciación (-) | 274,1 | 274,1 | 274,1 | 274,1 |
| Inversión en tecnología | - | - | - | - |
| Capital de trabajo | - | - | - | - |
| Utilidades antes del I° | 105.817,06 | 105.817,06 | 105.817,06 | 106.110,44 |
| Impuesto (I°) | 28.570,61 | 28.570,61 | 28.570,61 | 28.649,82 |
| Utilidades después del I° | 77.246,45 | 77.246,45 | 77.246,45 | 77.460,62 |
| Depreciación (+) | 274,1 | 274,1 | 274,1 | 274,1 |
| Flujo de caja | 77.520,55 | 77.520,55 | 77.520,55 | 77.734,72 |

### 5.3.4. Cálculo de VAN y TIR

Con los datos obtenidos a partir del flujo de caja, se procedió a calcular la VAN y la TIR (ver anexo "**Cálculo VAN y TIR**"), considerando una tasa de descuento del 15%, puesto que, según bibliografía, esta tasa, es la que está presente en los proyectos más exitosos.

**Tabla 5.26:** *Resultados obtenidos de la VAN y la TIR del proyecto.*

| | |
|---|---|
| **VAN** | 340.162 UF |
| **TIR** | 9,98% |

Finalmente, con los valores obtenidos de la VAN y la TIR, se concluye que el proyecto es rentable económicamente, por lo que puede ser llevado a cabo.

# 6. DISCUSIÓN

Como se ha especificado a lo largo de este trabajo, la escoria de fundición de cobre está constituida por diferentes proporciones de óxidos fundamentales, siendo el óxido de hierro y oxido de sílice los que se encuentran en mayor proporción, 45-50% y 25,95%, respectivamente, según los datos recopilados. No obstante, si se compara con la información entregada por Díaz R., González S., & Díaz R., (2020), donde especifican que las escorias de cobre primarias se componen, principalmente, en un 30% a 40% por óxidos de cobre (CuO, $Cu_3O_4$), que se producen por la oxidación durante el proceso pirometalúrgico; seguido de óxidos de silicio ($SiO_2$) que están en un 35% y óxidos de aluminio ($Al_2O_3$) que pueden llegar hasta 10%, al igual que los óxidos de calcio (CaO), se da cuenta, que la caracterización entregada de la escoria, es pobre en resultados. Además, especifican que la escoria también se caracteriza por su alto contenido de hierro, donde los principales componente son la fayalita y la magnetita, además de encontrar óxidos de calcio, aluminio ($CaAl_2O_4$), silicato de zinc ($Zn_2SiO_4$) y óxidos de cobre hierro ($CuFe_2O_4$). Es por esto, que se destaca que la metodología empleada para la caracterización de la escoria de la fundición Ventanas, al ser de carácter exclusivamente documental, se considera una limitación a la hora de la entrega de resultados, pues no se ha corroborado la composición de la escoria de la fundición Ventanas de Codelco con análisis de laboratorio, por lo que, realmente no se puede asegurar que la composición entregada sea la correcta, es decir, la composición de la escoria podría no ser la misma que se ha especificado, puesto que es parte de un análisis realizado hace algunos años, y eso podría variar con el tiempo que lleva depositada la escoria. Sin embargo, los valores de composición utilizados en este trabajo constituyen un punto de partida o primera aproximación a establecer un potencial teórico de valorización de la escoria de la fundición Ventanas.

Asimismo, se determinó que la cantidad de escoria acumulada en el escorial de la Fundición Ventanas es de 4.133.065 toneladas, la cual, corresponde a la cantidad disponible para ser valorizada, esta cantidad difiere en 320.380 toneladas con la cantidad entregada por la empresa, lo cual se podría deber a los vacíos encontrados en los reportes de sustentabilidad de cada año de Codelco, luego del año 2020 la empresa dejó de información la generación de sus residuos mineros masivos, en este caso de la escoria y otros.

Con respecto a lo anterior, se destaca que la escoria no clasifique como residuo peligroso, puesto que, esto le permite ser considerada como un subproducto de la minería secundaria de cobre, mostrando un alto potencial para ser valorizada. Es decir, permite buscar una opción viable de un nuevo uso, ya sea, de reciclaje, reutilización y/o de recuperación de algún elemento valioso presente en ella. Esto quedó expuesto, en el documento realizado por Cochilco en el año 2021, el cual se titula *“Identificación de oportunidades mediante la implementación de la Economía Circular en minería secundaria del cobre”*, donde se presentan las principales oportunidades identificadas para este tipo de residuo minero

masivo, entre las que destacan la evaluación del uso de escoria como material de construcción, recuperación del cobre contenido en la escoria mediante flotación, estabilización de suelos, entre otros. Además, este estudio presentó las principales barreras encontradas para llevar a cabo este tipo de proyectos, destacando la *incertidumbre geológica y geoquímica*, pues no existe claridad sobre el tipo y cuantía de recursos mineros presentes; el *bajo conocimiento en tecnologías,* pues se subraya que se requiere profundizar tanto en la comprensión de las tecnologías como en el reconocimiento y reprocesamiento de la escoria; la *carencia de normativa*, ya que a pesar de que existe una sólida y robusta normativa en materia de disposición de residuos mineros, existe una necesidad de avanzar hacia normativas que regulen el reprocesamiento u otro uso de estos residuos mineros; y, también se destaca el *desconocimiento del posible impacto ambiental*, puesto que no hay consenso del impacto que podría generar el retratamiento de estos residuos. No obstante, se identificaron como oportunidades para el escoria, el potencial de exploración, el interés en la economía circular, la producción sostenible de materia primas, el impulso de la minería secundaria y que la industria minera en el país podría ser considerada de clase mundial.

Cabe señalar, que la minería en Chile se presenta como una oportunidad prometedora para implementar un modelo de economía circular, especialmente a través de la minería secundaria que involucra la reutilización de residuos mineros. Esto ha quedado en evidencia, ya que, cada vez son más las tendencias globales que apuntan hacia una producción limpia y sostenible de materias primas. Es por esto, que, como se ha especificado a lo largo de este informe, tanto en Chile como a nivel mundial, se han buscado opciones viables en los que se les pueda brindar un uso a la escoria, ya sea la extracción de metales, por medio de flotación o lixiviación, como se especificó en el documento; o como material de construcción.

En el caso de la flotación autores como Valderrama et al., (2018) han indicado que este método es técnica y económicamente superior a otros procesos empleados para la recuperación de cobre contenido en las escorias. Un ejemplo de aplicación de flotación que se está llevando a cabo hoy en Chile a nivel industrial, es la recuperación de cobre desde la escoria de cobre en la Planta Matta de la FHVL. Sin embargo, en este trabajo se ha privilegiado la exploración de métodos o tecnologías con un menor grado de sofisticación del proceso y que minimizan la generación de residuos secundarios, particularmente el uso de la escoria de cobre como agregado pétreo en caminos básicos permitiría el aprovechamiento integral de la escoria extraída desde el escorial a través de un proceso cuyo principio se basan en cambios físicos para lograr la reducción del tamaño de partícula y la selección de una granulometría deseada.

Es importante mencionar, que, aunque el escenario que se presenta en el documento se basa en datos teóricos se logró desarrollar y proponer un modelo de proceso que se ajusta a las especificaciones requeridas en el volumen N°5 del manual de carreteras. Es decir, con el modelo propuesto, se logra conseguir la granulometría requerida para los áridos, en este

caso la escoria (pues reemplazaría ese material) en la construcción de sello cape seal, lechada asfáltica y TSS.

# 7. CONCLUSIONES

Con el desarrollo de este trabajo, se logró caracterizar la escoria de cobre de la Fundición Ventanas de Codelco disponible para ser valorizada, esto mediante contacto directo con la empresa, y a través de revisión bibliográfica, resultando en una composición porcentual de 45-50% de óxido de hierro; 0,80-0,84% de cobre; 0,2-0,4% de óxido de calcio; 0,5-0,6% de azufre; 0,07-0,010% de arsénico y 0,3-0,5 [ppm] de plomo. Además, se logró determinar la cantidad potencial de escoria acumulada, resultando en 4.133.065 toneladas.

Por otra parte, se logró identificar y seleccionar las diferentes técnicas aplicables para la valorización de la escoria de la fundición Ventanas de Codelco, destacando los procesos de reciclaje, reutilización y recuperación de elementos valiosos de la escoria, identificando además las ventajas y desventajas que estas tecnologías aportan tanto a las empresas que quisieran implementarlas como al medioambiente.

Asimismo, una vez seleccionada la tecnología que mejor se ajusta al proceso de valorización para el material de estudio, se incorporó una modificación que buscaba dar cumplimiento a los requerimientos de granulometría detallados en el capítulo N°5 del Manual de Carreteras, aportando de esta forma a la viabilidad técnica del proceso propuesto.

Cabe señalar, que se pudo evaluar ambientalmente, a nivel de prefactibilidad, la viabilidad del proceso de valorización seleccionado, aportando así a la circularidad de la empresa, esto mediante la tasa de valorización de residuos, con la cual se obtuvo la razón entre las cantidades totales de residuos no peligrosos valorizados y la cantidad total de residuos no peligrosos generados, resultando en un valor de 12,2%, es decir, al cabo de un año, se valorizaría casi un 504.000 toneladas de la escoria acumulada. En cuanto a la determinación de costos a nivel de prefactibilidad, se logró determinar los costos asociados a la implementación del diseño conceptual de la tecnología, resultando en 2192,78 [UF], lo cual se tomó como costos de inversión del proceso, con esto, se pudo llevar a cabo una evaluación económica mediante un flujo de caja, y el calculo del Valor Actual Neto y la Tasa Interna de Retorno, resultando en que el proyecto es económicamente factible.

Finalmente, con el desarrollo del presente trabajo, se logró proponer un proceso de valorización de la escoria de Fundición Ventanas de Codelco bajo el concepto de economía circular, lo cual da solución a la acumulación de escoria en el escorial de la cuprífera, permitiendo disminuir la acumulación de este residuo, y por ende, la escoria deja de ser considerada un residuo, y puede comenzar a ser considerada un subproducto, lo cual apunta a una minería, tanto extractiva como productiva, sustentable, a través de la gestión adecuada de este pasivo ambiental.

# 8. REFERENCIAS

Betancourt, D. F. (24 de noviembre de 2018). *Cómo hacer una matriz de priorizaación.* Recuperado el agosto de 2023, de https://www.ingenioempresa.com/matriz-de-priorizacion/#:~:text=Tambi%C3%A9n%20denominada%20matriz%20de%20criterios,criterios%20deber%C3%ADa%20ser%20la%20mejor.

Candia, C. V. (2020). *Estudio técnico-económico para un proceso "zero waste" en el procesamiento de escorias de cobre para la producción de arrabio y cemento portland.* Recuperado el 01 de noviembre de 2023, de http://repositorio.udec.cl/bitstream/11594/465/1/Tesis_Estudio_tecnico.pdf

Centro Nacional del Medio Ambiente. (2005). *Programa de Control de Monitoreo de Calidad de Aire Nacional.* Recuperado el 09 de diciembre de 2023, de https://sinca.mma.gob.cl/uploads/documentos/6d53c86e48db1bf8d783c932cae50404.pdf

CNN Chile. (31 de mayo de 2023). *CNN Chile.* Recuperado el 16 de julio de 2023, de https://www.cnnchile.com/search/fundicion%20ventanas/

Codelco. (2005). *Reporte de sustentabilidad.* Recuperado el 01 de noviembre de 2023, de https://www.codelco.com/prontus_codelco/site/docs/20160311/20160311171724/codelco_reporte2005.pdf

Codelco. (2006). *Reporte de sustentabilidad.* Recuperado el 01 de noviembre de 2023, de https://www.codelco.com/prontus_codelco/site/docs/20160311/20160311171708/reporte2006.pdf

Codelco. (2007). *Reporte de sustentabilidad.* Recuperado el 01 de noviembre de 2023, de https://www.codelco.com/prontus_codelco/site/docs/20160311/20160311171654/reportecodelco2007.pdf

Codelco. (2008). *Reporte de sustentabilidad.* Recuperado el 01 de noviembre de 2023, de https://www.codelco.com/prontus_codelco/site/docs/20160311/20160311171639/reporte_2008.pdf

Codelco. (2009). *Reporte de sustentabilidad.* Recuperado el 01 de noviembre de 2023, de https://www.codelco.com/prontus_codelco/site/docs/20160311/20160311171621/reporte2009.pdf

Codelco. (2010). *Reporte de sustentabilidad.* Recuperado el 01 de noviembre de 2023, de https://www.codelco.com/prontus_codelco/site/docs/20160311/20160311171608/reporte_codelco_2010.pdf

Codelco. (2011). *Reporte de sustentabilidad.* Recuperado el 01 de noviembre de 2023, de https://www.codelco.com/prontus_codelco/site/docs/20160311/20160311171551/reporte_codelco_2011_mayo_baja.pdf

Codelco. (2012). *Reporte de sustentabilidad.* Recuperado el 01 de noviembre de 2023, de https://www.codelco.com/reporte2012/

Codelco. (2012). *Reporte de Sustentabilidad.* Recuperado el 01 de diciembre de 2023, de https://www.codelco.com/residuos-mineros-masivos/reporte2012/2013-04-17/181121.html

Codelco. (2013). *Reporte de sustentabilidad.* Recuperado el 01 de noviembre de 2023, de https://www.codelco.com/nuestro-desempeno-en-sustentabilidad/reporte2013/2013-04-23/101940.html

Codelco. (2014). *Reporte de sustentabilidad.* Recuperado el 01 de noviembre de 2023, de https://www.codelco.com/prontus_codelco/site/docs/20160311/20160311170822/rs_codelco_2014__3_.pdf

Codelco. (2015). *Reporte de sustentabilidad.* Recuperado el 01 de noviembre de 2023, de https://www.codelco.com/prontus_codelco/site/docs/20160407/20160407123110/reporte_sustentabilidad_codelco_2015.pdf

Codelco. (2016). *Reporte de sustentabilidad.* Recuperado el 01 de noviembre de 2023, de https://www.codelco.com/prontus_codelco/site/docs/20170619/20170619085200/reporte_sustentabilidad2016.pdf

Codelco. (2017). *Reporte de sustentabilidad.* Recuperado el 01 de noviembre de 2023, de https://www.codelco.com/prontus_codelco/site/docs/20180614/20180614122058/reporte_sustentabilidad_2017_codelco.pdf

Codelco. (2018). *Reporte de sustentabilidad.* Recuperado el 01 de noviembre de 2023, de https://www.codelco.com/prontus_codelco/site/docs/20190805/20190805110519/reporte_sustentabilidad_2018_codelco.pdf

Codelco. (2019). *Codelco Educa*. Recuperado el 15 de julio de 2023, de https://www.codelcoeduca.cl/codelcoeduca/site/edic/base/port/proceso_productivo.html

Codelco. (2019). *Reporte de sustentabilidad.* Recuperado el 01 de noviembre de 2023, de https://www.codelco.com/prontus_codelco/site/docs/20200701/20200701141033/codelco_reporte2019.pdf

Codelco. (2020). *Reporte de sustentabilidad.* Recuperado el 01 de noviembre de 2023, de https://www.codelco.com/prontus_codelco/site/docs/20210520/20210520085342/rsustentabilidad2020_codelco.pdf

Codelco. (2022). *Codelco*. Recuperado el 16 de julio de 2023, de https://www.codelco.com/operaciones

Codelco. (2023). *Codelco*. Recuperado el 16 de julio de 2023, de https://www.codelco.com/la-fundicion-ventanas-apaga-sus-hornos-tras-58-anos-de-historia

Comisión Chilena del Cobre. (Diciembre de 2019). *Proyección de consumo de agua en la minería del cobre 2019-2030.* Recuperado el 30 de agosto de 2023, de

https://www.cochilco.cl/Listado%20Temtico/proyeccion%20agua%20mineria%20del%20cobre%202019-2030%20VF.pdf

Comisión Chilena del Cobre. (2022). *ANÁLISIS DEL IMPACTO SOCIOECONÓMICO DE LA ACTIVIDAD.* Recuperado el 15 de julio de 2023, de https://www.cochilco.cl/Listado%20Temtico/An%C3%A1lisis%20del%20impacto%20socioeconomico%20de%20la%20actividad%20minera%20a%20nivel%20regional.pdf

Comisión Mundial sobre el Medio Ambiente y Desarrollo. (1987). *Nuestro futuro común.* Recuperado el 15 de julio de 2023, de https://www.ecominga.uqam.ca/PDF/BIBLIOGRAPHIE/GUIDE_LECTURE_1/CMMAD-Informe-Comision-Brundtland-sobre-Medio-Ambiente-Desarrollo.pdf

Consejo Minero. (13 de Enero de 2019). *Consejo Minero.* Recuperado el agosto de 2023, de https://consejominero.cl/chile-pais-minero/aprende-de-mineria/mineria-en-chile/

Consejo Minero. (2022). *Minería en Números* (6ta ed.). Recuperado el 15 de julio de 2023, de https://consejominero.cl/wp-content/uploads/2022/08/LIBRO-Mineria-en-numeros_6taedicion.pdf

Corporación Nacional del Cobre. (2018b). *Exploración: "En búsqueda del metal rojo".* Recuperado el 15 de julio de 2023, de https://www.codelcoeduca.cl/codelcoeduca/site/artic/20181204/asocfile/20181204185608/exploraci__n_media_060119.pdf

Corporación Nacional del Cobre. (2018b). *Extracción. Codelco Educa.* Recuperado el julio de 2023, de https://www.codelcoeduca.cl/codelcoeduca/site/artic/20181204/asocfile/20181204185608/exploraci__n_media_060119.pdf

Corporación Nacional del Cobre. (2018c). *Chancado: "Reduciendo la roca".* Recuperado el 15 de julio de 2023, de https://www.codelcoeduca.cl/codelcoeduca/site/artic/20190109/asocfile/20190109004934/chancado_media_t__cnico_060119.pdf

Corporación Nacional del Cobre. (2019b). *Extracción: "Sacando la materia prima".* Recuperado el 15 de julio de 2023, de https://www.codelcoeduca.cl/codelcoeduca/site/artic/20190109/asocfile/20190109005109/extraccion_media_t__cnico_060119.pdf

Corporación Nacional del Cobre. (2019c). *Molienda: "Todo a la juguera".* Recuperado el 15 de julio de 2023, de https://www.codelcoeduca.cl/codelcoeduca/site/artic/20190109/asocfile/20190109005343/molienda_media_t__cnico_060119.pdf

Corporación Nacional del Cobre. (2019d). *Flotación: "Burbujas de cobre".* Recuperado el 15 de julio de 2023, de

https://www.codelcoeduca.cl/codelcoeduca/site/artic/20190109/asocfile/20190109005132/flotacion_media_t__cnico_060119.pdf

Corporación Nacional del Cobre. (2019e). *Fundición: "Recién salido del horno".* Recuperado el 15 de julio de 2023, de https://www.codelcoeduca.cl/codelcoeduca/site/artic/20190109/asocfile/20190109005205/fundicion_media_t__cnico_060119.pdf

Corporación Nacional del Cobre. (2019f). *Electrorefinación: "Ánodos y cátodos se encuentran".* Recuperado el 15 de julio de 2023, de https://www.codelcoeduca.cl/codelcoeduca/site/artic/20190109/asocfile/20190109005034/electrorefinacion_media_t__cnico_060119.pdf

Corporación Nacional del Cobre. (2019g). *Lixiviación: "El riego".* Recuperado el 15 de julio de 2023, de https://www.codelcoeduca.cl/codelcoeduca/site/artic/20190109/asocfile/20190109005316/lixiviacion_media_t__cnico_080119.pdf

Corporación Nacional del Cobre. (2019h). *Electroobtención: "Obteniendo la máxima pureza".* Recuperado el 15 de julio de 2023, de https://www.codelcoeduca.cl/codelcoeduca/site/artic/20190109/asocfile/20190109005004/electroobtencion_media_t__cnico_060119.pdf

Davenport, W., King, M., Schlesinger, M., & Biswas, A. (2002). *Extractive Metallurgy of Copper* (Vol. IV). Recuperado el 1 de Octubre de 2023, de https://www-sciencedirect-com.bibliotecadigital.uv.cl/science/article/abs/pii/B9780080440293500071

Díaz R., Y., González S., L., & Díaz R., J. (2020). *Caracterización de escoria de cobre secundaria y evaluación de su actividad puzolánica.* Recuperado el octubre de 2023, de https://revistas.sena.edu.co/index.php/inf_tec/article/view/2696/3651

Dirección de Vialidad. (2018). *Especificaciones Técnicas Generales de Construcción.* Recuperado el 26 de Octubre de 2023

Falappa, M. B., Lamy, M., & Vazquez, M. (2019). *De una Economía Lineal a una Circular, en el siglo XXI.* Recuperado el 15 de julio de 2023, de http://planificacion.bdigital.uncu.edu.ar/objetos_digitales/14316/falappa-fce.pdf

Foretica. (2019). *La medición de la Economía Circular.* Recuperado el 1 de agosto de 2023, de https://foretica.org/wp-content/uploads/informe_medida_economia_circular_foretica.pdf

Gálvez, G. (2015). *Prospección y Caracterización de las Escorias de Cobre del.* Tesis . Recuperado el 16 de julio de 2023, de https://repositoriobibliotecas.uv.cl/bitstream/handle/uvscl/2766/Galvez%20Herrera%2c%20Gonzalo_Prospecci%c3%b3n%20y%20caracterizaci%c3%b3n%20de%20las%20escorias%20de%20cobre%20del%20dep%c3%b3sito%20fundici%c3%b3n%20Ventanas.%20Estudio%20de%20factibilidad%

García, N. (abril de 2020). *Biblioteca del Congreso Nacional.* Recuperado el octubre de 2023, de https://obtienearchivo.bcn.cl/obtienearchivo?id=repositorio/10221/28557/1/BCN___Royalty_Minero_analisis_comparado.pdf

Gupta, R., Blessen Skariah, T., Gupta, P., Rajan, L., & Thagriya, D. (2012). *An Experimental Study of Clayey Soil Stabilizeb by Copper Slag.* Recuperado el octubre de 2023, de https://d1wqtxts1xzle7.cloudfront.net/45122152/20150427025905793-libre.pdf?1461736949=&response-content-disposition=inline%3B+filename%3DAN_EXPERIMENTAL_STUDY_OF_CLAYEY_SOIL_STA.pdf&Expires=1698644524&Signature=JSt80ds5RnaU6wXxEBWLyIjIwAAi2H-AN2DckjyXhGt6

Ibarra, V. (31 de mayo de 2023). *Diario Financiero.* Recuperado el 16 de julio de 2023, de https://www.df.cl/empresas/mineria/tras-59-anos-codelco-cierra-fundicion-ventanas-y-gobierno-prepara#:~:text=Por%3A%20Valeria%20Ibarra%20%7C%20Publicado%3A,a%20las%2012%3A12%20hrs.&text=Tras%2058%20a%C3%B1os%20operando%2C%20los,Ventanas%20se%20apagaron%20

INACAP. (2017). *Amortizaciones, Depreciaciones y Provisiones.* Material de profundización. Recuperado el 07 de diciembre de 2023, de https://www.inacap.cl/web/material-apoyo-cedem/alumno/Contabilidad/Contabilidad-Basica%20CCCB01/CCPR03_U5_MP2.pdf

INDUAMBIENTE. (julio de 2022). Escorias con valor. (177), 56 a 59. Recuperado el 16 de julio de 2023, de https://www.induambiente.com/especial/mineria/escorias-con-valor

International Copper Study Group. (2022). Recuperado el 15 de julio de 2023, de https://icsg.org/what-is-copper/

International Copper Study Groupo. (2022). *The World Coppet Factbook.* Recuperado el 15 de julio de 2023, de https://icsg.org/download/factbook2022-pdf/?wpdmdl=7096

Lagos, G. (1997). *Impactos ambientales de la minería en Chile.* Recuperado el 18 de julio de 2023, de https://www.researchgate.net/profile/Gustavo-Lagos-6/publication/242415121_Impactos_ambientales_de_la_mineria_en_Chile/links/53ee004f0cf2981ada1743eb/Impactos-ambientales-de-la-mineria-en-Chile.pdf

Mejías, Y. E. (2017). *Utilización de escoria de cobre de Codelco Ventanas como agregado pétreo para tratamientos superficiales asfálticos simples en la región de Valparaíso.* Recuperado el 07 de diciembre de 2023, de https://repositorio.usm.cl/bitstream/handle/11673/14088/3560900231483UTFSM.pdf?sequence=1&isAllowed=y

Metso. (2023). *Metso.* Recuperado el Octubre de 2023, de https://www.metso.com/es/portafolio/chancador-de-mandibula-serie-c-nordberg/

Ministerio de Salud. (2004). *Biblioteca del Congreso Nacional de Chile.* Recuperado el julio de 2023, de https://www.bcn.cl/leychile/navegar?idNorma=226458

Ministerio del Medio Ambiente. (2016). *Ley 20.920 "ESTABLECE MARCO PARA LA GESTIÓN DE RESIDUOS, LA RESPONSABILIDAD EXTENDIDA DEL PRODUCTOR Y FOMENTO AL RECICLAJE".* Ley. Recuperado el 15 de julio de 2023, de https://www.bcn.cl/leychile/navegar?idNorma=1090894

Ministerio del Medio Ambiente. (2018). *Cuarto Reporte del Estado del Medio Ambiente.* Recuperado el 08 de diciembre de 2023, de https://sinia.mma.gob.cl/wp-content/uploads/2019/01/8-residuos-pdf.pdf

Ministerio del Medio Ambiente. (2018). *Economía circular*. Recuperado el julio de 2023, de https://mma.gob.cl/economia-circular/

Muguira, A. (2020). ¿Qué es la escala de Likert y cómo utilizarla? *QuestionPro*. Recuperado el 1 de agosto de 2023, de QuestionPro: https://www.questionpro.com/blog/es/que-es-la-escala-de-likert-y-como-utilizarla/

Nazer, A., Castillo, M., López, A., Ortíz, L., & Pavez, O. (2021). *Uso de escoria de cobre de un vertedero abandonado en mezclas asfálticas.* Recuperado el 01 de noviembre de 2023, de https://www.scielo.cl/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0718-28132021000200091#:~:text=La%20escoria%20de%20cobre%20se,fabricaci%C3%B3n%20de%20morteros%20y%20hormigones.

Nazer, A., Fuentes, S., Castillo, P., González, L., Pavez, O., & Varela, O. (10 de Octubre de 2012). Baldosas de escorias de cobre. Innovaciónen producción limpia. *Red Iberoamericana de Ingeniería de Proyectos*. Recuperado el 30 de septiembre de 2023, de https://www.researchgate.net/publication/266684808_Baldosas_de_escorias_de_cobre_Innovacion_en_produccion_limpia

Nazer, A., Pavez, O., & González, L. (2011). *Caracterización de las escorias de cobre y los efetos medioambientales del depósito abandonado en sector Playa Negra, región de Atacama, Chile.* Recuperado el 09 de diciembre de 2023, de https://www.artigos.entmme.org/download/2011/caracteriza%C3%A7%C3%A3o/2135%20-%20Nazer,A.-CARACTERIZACI%C3%93N%20DE%20LAS%20ESCORIAS%20DE%20COBRE%20Y%20LOS%20EFECTOS%20MEDIOAMBIENTALES%20DEL%20DEP%C3%93SITO%20ABANDONADO%20EN%20SECTOR%20PLAYA%20NEGRA,%20RE

Nazer, A., Pavez, O., Rojas, F., & Aguilar, C. (2010). *Una Revisión de los Usos de las Escorias de Cobre.* Recuperado el 18 de octubre de 2023, de https://www.researchgate.net/profile/Amin-Nazer-3/publication/266684698_UNA_REVISION_DE_LOS_USOS_DE_LAS_ESCORIAS_DE_COBRE/links/5437a66d0cf2590375c537e7/UNA-REVISION-DE-LOS-USOS-DE-LAS-ESCORIAS-DE-COBRE.pdf

Nazer, A., Payá, J., Borrachero, M., & Monzó, J. (2016). *Caracterización de escorias de cobre de fundiciones chilenas del Siglo XIX.* Recuperado el 12 de agosto de 2023, de https://revistademetalurgia.revistas.csic.es/index.php/revistademetalurgia/article/view/1396/1583#:~:text=Las%20escorias%20de%20cobre%20estudiadas,3%20(5%2D8%25).

Observatorio de la deuda en la Globalización. (abril de 2003). Deuda ecológica ¿Quién debe a quién? 72. Recuperado el 15 de julio de 2023, de https://www.uv.mx/orizaba/cosustenta/files/2013/09/1.-Russi-D.-et-al.-2003_Deuda-ecologica-Quien-debe-a-quien.pdf

Pardo Vera, C. A. (2018). *Utilización de Escoria de Cobre como Agregado Pétreo para Solución de Caminos Básicos de la Región de Valparaíso.* Tesis. Recuperado el octubre de 2023

Parlamento Europeo. (24 de mayo de 2023). Economía circular: definición, importancia y beneficios. 4. Recuperado el 15 de julio de 2023, de https://www.europarl.europa.eu/news/es/headlines/economy/20151201STO05603/economia-circular-definicion-importancia-y-beneficios#:~:text=La%20econom%C3%ADa%20circular%20es%20un,de%20los%20productos%20se%20extiende.

Ramírez, P. (26 de septiembre de 2022). *Economía 3.* Recuperado el 07 de diciembre de 2023, de Van y TIR: Concepto, diferencias y cómo calcularlos: https://economia3.com/van-tir-concepto-diferencias-como-calcularlos/

Salazar, Ó. (2020). *Euro Funding.* Recuperado el 07 de diciembre de 2023, de ¿Qué es la escala de madurez tecnológica?: https://euro-funding.com/es/blog/que-es-la-escala-de-madurez-tecnologica-trl/#:~:text=La%20escala%20de%20Madurez%20Tecnol%C3%B3gica%20o%20Technology%20Readiness%20Level%20(TRL,ser%20desplegada%20en%20el%20espacio.

Sánchez, J. M., & Enríquez, S. M. (1996). *Impacto ambiental de la pequeña y mediana minería en Chile.* Recuperado el 16 de julio de 2023, de http://biblioteca.unmsm.edu.pe/redlieds/recursos/archivos/pequenamineria/chile/impacto-ambiental.pdf

Sepúlveda, C. A. (2006). *UTILIZACIÓN DE ESCORIAS DE FUNDICIÓN PARA LA PRODUCCIÓN DE.* Memoria. Recuperado el septiembre de 2023, de https://repositorio.uchile.cl/bitstream/handle/2250/104445/sepulveda_c.pdf?sequence=4

Servicio de Impuestos Internos. (01 de enero de 2003). *SII.* Recuperado el 07 de diciembre de 2023, de https://www.sii.cl/pagina/valores/bienes/tabla_vida_enero.htm

Servicio Geológico de los Estados Unidos. (enero de 2023). *Science for a changing world*. Recuperado el 15 de julio de 2023, de https://pubs.usgs.gov/periodicals/mcs2023/mcs2023-copper.pdf

Sistema de Información Ambiental. (2021). *Calidad del Aire.* Recuperado el 16 de julio de 2023, de https://sinia.mma.gob.cl/wp-content/uploads/2021/04/14-calidad-del-aire.pdf

Sociedad Nacional de Minería. (2021). *SONAMI*. Recuperado el 15 de julio de 2023, de https://www.sonami.cl/v2/informacion-de-la-mineria/

Superintendencia del Medio Ambiente. (2013). *Informe de Fiscalización Ambiental.* Recuperado el 15 de julio de 2023, de https://snifa.sma.gob.cl/General/Descargar/1404180814

Superintendencia del Medio Ambiente. (2015). *Informe de Fiscalización Ambiental.* Recuperado el julio de 2023, de https://snifa.sma.gob.cl/General/Descargar/1104007965

Urzúa, F. (30 de marzo de 2022). *Chipax.* Recuperado el 08 de diciembre de 2023, de ¿Qué es el flujo de caja y cuál es su importancia?: https://www.chipax.com/blog/que-es-el-flujo-de-caja-y-cual-es-su-importancia/

USEPA. (junio de 2023). *Residuos Peligrosos*. Recuperado el 29 de agosto de 2023 , de https://www.epa.gov/hw/special-wastes

Valderrama, L., González, M., Santander, M., & Zazzali, B. (2018). *Recuperación de Cobre Contenido en Escoria de Cobre Mediante Flotación.* Recuperado el octubre de 2023, de https://www2.ifrn.edu.br/ojs/index.php/HOLOS/article/view/7118/pdf

# 9. ANEXOS

## 9.1. ANEXO 1: COTIZACIÓN DE LAS MAQUINARIAS Y EQUIPOS REQUERIDOS

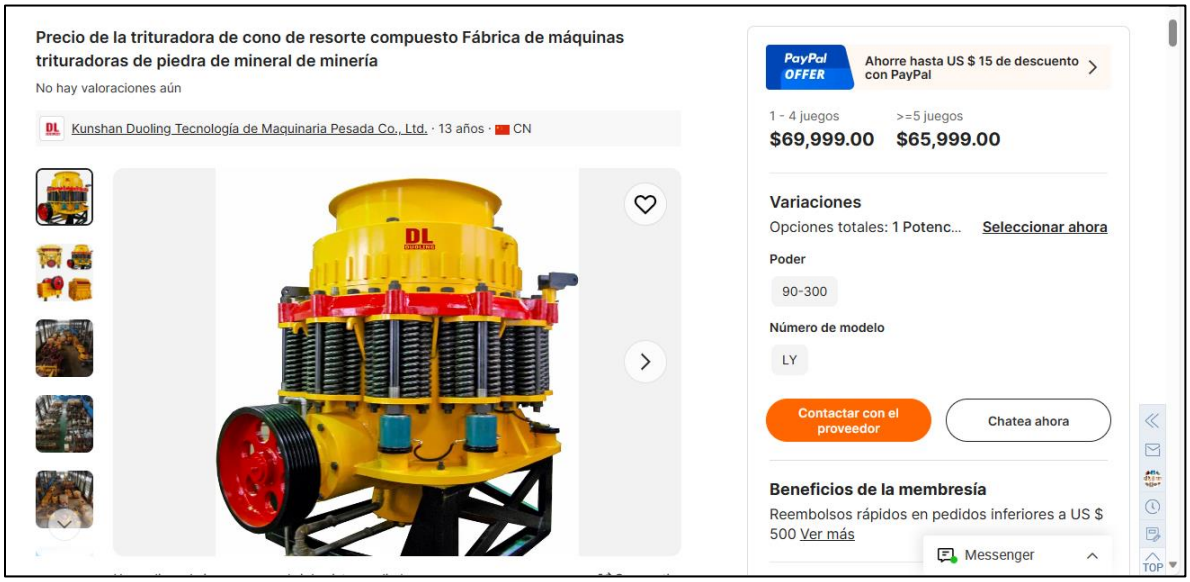


**Figura 8.1:** *Cotización chancador de cono en la tienda Alibaba.*

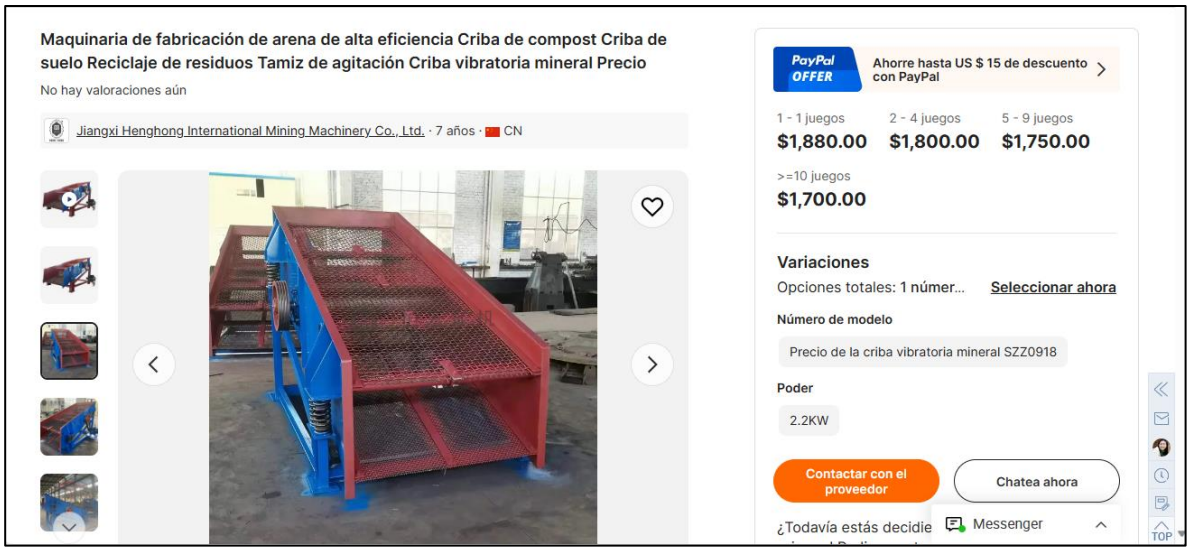


**Figura 8.2:** *Cotización tamizador vibratorio en la tienda Alibaba.*

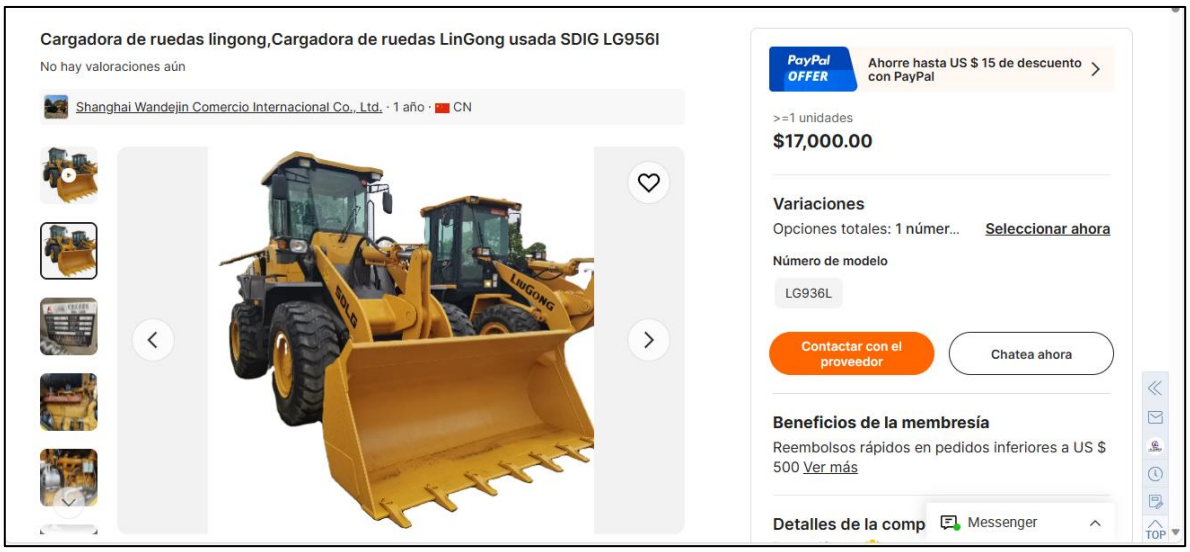


**Figura 8.3:** *Cotización excavadora la tienda Alibaba.*

## 9.2. ANEXO 2: DATOS UTILIZADOS EN EL FLUJO DE CAJA

### 9.2.1. Ingresos

#### *9.2.1.1. Ventas del servicio*

$$VS = 449{,}08[m^3] \times 300\left[\frac{días}{año}\right] \times 0{,}80\left[\frac{UF}{m^3}\right]$$

$$VS = 107.779{,}2\ \left[\frac{UF}{año}\right]$$

### 9.2.2. Egresos

#### *9.2.2.1. Mano de obra*

$$Sueldo\ anual\ \ chancador = 2[personas] \times 26{,}50\left[\frac{UF}{persona * mes}\right] \times \frac{12\ [meses]}{1[año]} = 636\ \left[\frac{UF}{año}\right]$$

$$Sueldo\ anual\ \ excavadora = 2[personas] \times 24{,}83\left[\frac{UF}{persona * mes}\right] \times \frac{12\ [meses]}{1[año]} = 595{,}92\ \left[\frac{UF}{año}\right]$$

$$Sueldo\ anual\ \ ing.en\ proceso = 1[persona] \times 38{,}01\left[\frac{UF}{persona * mes}\right] \times \frac{12\ [meses]}{1[año]} = 456{,}12\ \left[\frac{UF}{año}\right]$$

#### *9.2.2.2. Depreciación*

$$Chancador = \frac{1.688{,}98}{8} = 211{,}12$$

$$Tamizadora = \frac{45{,}36}{8} = 5{,}67$$

$$Excavadora = \frac{458{,}44}{8} = 57{,}31$$

#### *9.2.2.3. Capital de trabajo*

| | Total ventas año 1 | Mes 1 | Mes 2 | Mes 3 | Mes 4 | Mes 5 | Mes 6 | Mes 7 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Ingresos operacionales | 107.779,2 | - | 8.981,6 | 8.981,6 | 8.981,6 | 8.981,6 | 8.981,6 | 8.981,6 |
| Egresos operacionales | -1.771,66 | -1.771,66 | -1.771,66 | -1.771,66 | -1.771,66 | -1.771,66 | -1.771,66 | -1.771,66 |
| Total | - | -1.771,66 | 7.209,94 | | | | | |

5.438,2 Capital de trabajo

#### 9.2.2.4. Utilidades antes del impuesto

$$utilidad\ antes\ de\ impuesto = venta\ del\ servicio - (mano\ de\ obra + depreciación)$$
$$= 107.779{,}2 - (1.688{,}04 + 274{,}1)$$
$$= 105.817{,}06$$

#### 9.2.2.5. Impuestos:

$$impuestos = utilidad\ antes\ de\ impuesto * impuesto\ a\ la\ renta\ de\ primera\ categoría$$

$$I° = 105.817{,}06 * 0{,}27$$

$$I° = 28.570{,}61\ UF$$

#### 9.2.2.6. Utilidades después del impuesto

$$utilidad\ neta\ después\ de\ impuesto = utilidad\ antes\ de\ impuesto - impuestos$$
$$= 105.817{,}06 - 28.570{,}61 =$$
$$= 77.246{,}45$$

#### 9.2.2.7. Flujo de caja total

$$flujo\ total = utilidad\ neta\ después\ de\ impuesto + depreciación$$

$$flujo\ total = 77.246{,}45\ UF + 274{,}1\ UF$$

$$flujo\ total = 77.520{,}55\ UF$$

### 9.2.3. Cálculo VAN y TIR

| | PERIODOS (AÑOS) | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | 0 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 |
| **INGRESOS** | | | | | | | | | |
| VENTA DEL SERVICIO | $ - | $ 107.779 | $ 107.779 | $ 107.779 | $ 107.779 | $ 107.779 | $ 107.779 | $ 107.779 | $ 107.779 |
| VENTA DE ACTIVOS | $ - | $ - | $ - | $ - | $ - | $ - | $ - | $ - | $ 293 |
| **EGRESOS** | | | | | | | | | |
| MANO DE OBRA | $ - | $ 1.688 | $ 1.688 | $ 1.688 | $ 1.688 | $ 1.688 | $ 1.688 | $ 1.688 | $ 1.688 |
| MATERIALES | $ -137 | $ - | $ - | $ - | $ - | $ - | $ - | $ - | $ - |
| DEPRECIACIÓN | $ - | $ 274 | $ 274 | $ 274 | $ 274 | $ 274 | $ 274 | $ 274 | $ 274 |
| TECNOLOGIAS A IMPLEMENTAR | $ -2.193 | $ - | $ - | $ - | $ - | $ - | $ - | $ - | $ - |
| CAPITAL DE TRABAJO | $ -5.438 | $ - | $ - | $ - | $ - | $ - | $ - | $ - | $ - |
| UTILIDAD ANTES DE IMPUESTO | $ - | $ 105.817 | $ 105.817 | $ 105.817 | $ 105.817 | $ 105.817 | $ 105.817 | $ 105.817 | $ 106.110 |
| IMPUESTOS (27%) | $ - | $ 28.571 | $ 28.571 | $ 28.571 | $ 28.571 | $ 28.571 | $ 28.571 | $ 28.571 | $ 28.650 |
| UTILIDAD NETA DESPUÉS DE IMPUESTO | $ - | $ 77.246 | $ 77.246 | $ 77.246 | $ 77.246 | $ 77.246 | $ 77.246 | $ 77.246 | $ 77.461 |
| FLUJO DE CAJA | $ -7.768 | $ 77.521 | $ 77.521 | $ 77.521 | $ 77.521 | $ 77.521 | $ 77.521 | $ 77.521 | $ 77.735 |

**Figura 9.1**: *Captura de pantalla del desarrollo de flujo de caja del proyecto*

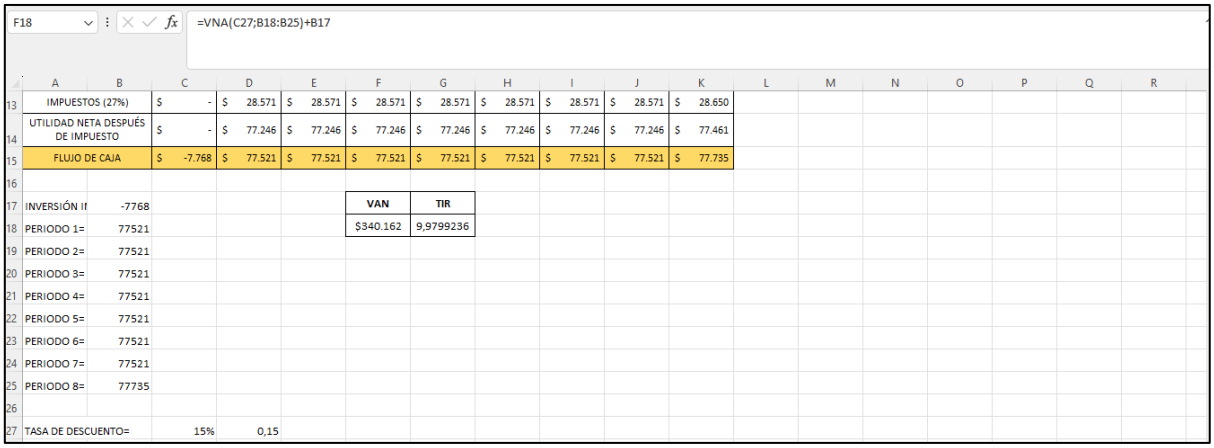


**Figura 9.2**: *Captura de pantalla del cálculo de la VAN y TIR realizado con Excel.*