



FACULTAD DE INGENIERÍA

ESCUELA DE INGENIERÍA EN MEDIOAMBIENTE

INGENIERÍA AMBIENTAL

ESCORIAS METALÚRGICAS:

OPORTUNIDADES Y DESAFÍOS EN SU VALORACIÓN Y REUTILIZACIÓN

**TRABAJO DE TITULACIÓN PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERO
AMBIENTAL**

AUTOR: Natán Elías Johnson González

PROFESOR GUÍA: María Lorena Álvarez Sánchez

Diciembre 2025, Valparaíso, Chile

RESUMEN

La gestión de las escorias metalúrgicas, residuos masivos generados por la industria del cobre en Chile, representa un desafío ambiental y de ocupación territorial significativo. Se estima que, anualmente, se producen aproximadamente 11,44 millones de toneladas de escoria de cobre, sumándose a más de 70 millones de toneladas ya acumuladas que, en su mayoría, son dispuestas en botaderos, generando un pasivo ambiental considerable. Esta práctica contrasta con el enfoque de economías avanzadas, donde las escorias se valorizan y reintegran en la economía circular, usándose junto a cementos, hormigones y otras aplicaciones.

El presente trabajo de título se propone identificar oportunidades, aplicaciones y desafíos para la implementación sostenible de las escorias metalúrgicas en Chile, partiendo de la base que la clasificación legal de las escorias en el país es de "*residuo minero masivo*" lo cual impide su valorización a gran escala y su utilización como sustituto de áridos naturales. La extracción de éstos impacta negativamente el medio ambiente, pudiendo los áridos artificiales convertirse en una alternativa viable y sostenible en diversas aplicaciones, aprovechando al máximo sus propiedades fisicoquímicas.

La revisión bibliográfica a nivel internacional demostró que países exitosos implementaron mecanismos legales de reclasificación de las escorias mediante *End-of-Waste* y no esperaron décadas de validación técnicas.

El análisis de factores reveló que múltiples elementos habilitadores (propiedades técnicas superiores como absorción de agua de 0,13% versus 1-5% en áridos naturales, dureza de 6-7 Mohs versus 5-6 convencional, y aplicaciones internacionales exitosas con hasta 80% de sustitución de escoria por áridos naturales) permanecieron neutralizados por ausencia de normativas que lo cataloguen como subproducto , configurando una dinámica donde la restricción legal anuló completamente los factores positivos. El trabajo reúne antecedentes que propone el uso de algunas escorias en reemplazo de los áridos que se utilizan actualmente.

La publicación de norma NCh 3894:2025 representó un punto de inflexión que destrabó proyectos bloqueados durante años. Esta norma permite abordar dos problemas simultáneamente, por una parte, evitar la acumulación de escoria en depósitos que de por si acarrear el riesgo de amenazar la continuidad operacional de las fundiciones; por otra parte, la utilización de áridos artificiales contribuye a la preservación de las cuencas en su estado natural evitando la extracción excesiva de áridos y por tanto reestablecer los equilibrios del ecosistema.

AGRADECIMIENTOS

Quisiera expresar mi más profundo agradecimiento a todas las personas e instituciones que hicieron posible la realización de este trabajo de titulación.

En primer lugar, agradezco a mi profesora guía, María Lorena Álvarez Sánchez, por su orientación, paciencia y dedicación durante todo el desarrollo de esta investigación.

A los miembros de la comisión evaluadora, por su tiempo, disposición y valiosos aportes que enriquecieron significativamente este trabajo.

A todos los profesores de la Escuela de Medio Ambiente de la Universidad de Valparaíso, cada uno contribuyó de manera única a mi formación profesional. De cada clase, de cada conversación, aprendí algo que hoy forma parte de quien soy como futuro ingeniero.

A mi profe, por su guía durante este proceso y por enseñarme que el aprendizaje va más allá de lo académico. Su apoyo fue más importante de lo que las palabras pueden expresar.

Un especial reconocimiento a Sylvana, mi tutora de práctica en el Ministerio de Obras Públicas, quien no solo me facilitó el acceso al tema de esta investigación, su guía y confianza fueron invaluable.

Agradezco también a todos los profesionales que colaboraron generosamente con esta investigación: al alcalde de Catemu, al Director de la Escuela de Ingeniería Química de la PUCV, y a todos quienes compartieron su tiempo y conocimientos para enriquecer este trabajo.

A mis abuelitas y abuelitos, por estar siempre ahí para mí, por su amor incondicional y por ser un pilar fundamental en mi vida.

A mi madre, por su amor, su fortaleza y su constante apoyo. A mi padre, por todo su esfuerzo y sacrificio para que pudiera estudiar y cumplir mis sueños. Sin su dedicación, nada de esto habría sido posible.

A mi hermano, por enseñarme tanto, no solo con sus aciertos sino también con sus experiencias. De él aprendí lecciones valiosas que me ayudaron a transitar mi propio camino.

A mis compañeros de carrera, por esas largas noches de estudio compartidas, por el apoyo mutuo en los momentos difíciles y por hacer de esta experiencia universitaria algo memorable.

Finalmente, a mi pareja, por su apoyo incondicional durante toda la carrera. En los momentos más difíciles, pensar en ella me daba las fuerzas necesarias para seguir adelante. Su presencia ha sido fundamental en este camino.

A todos ustedes, mi más sincero agradecimiento.

INDICE

1	INTRODUCCIÓN	1
1.1	Generación de escorias metalúrgicas.....	3
1.2	Experiencia internacional en valorización de escorias	3
1.3	Marco Regulatorio de las escorias	4
1.4	La paradoja de la economía circular en la minería chilena.....	4
2	PROBLEMA	5
3	OBJETIVOS.....	6
3.1	Objetivo general.....	6
3.2	Objetivos específicos.....	6
4	METODOLOGÍA.....	7
4.1	Búsqueda y selección de literatura científica y técnica	7
4.1.1	Análisis y síntesis de la información recopilada	8
4.2	Descripción y caracterización de la escoria de cobre generadas en Chile	9
4.3	Identificación de factores facilitadores e impeditivos.....	10
4.4	Propuesta de alternativa de valorización para la V región	11
5	RESULTADOS	13
5.1	Valorización de las escorias de cobre.....	13
5.1.1	Aplicaciones en el sector de la construcción e ingeniería civil	13
5.1.2	Aplicaciones como abrasivo industrial.....	15
5.1.3	Recuperación de metales	15
5.1.4	Aplicaciones en la agricultura y mejoramiento de suelos	16

5.1.5	Tratamiento de aguas residuales	16
5.1.6	Marcos regulatorios internacionales	17
5.2	Descripción de las escorias de cobre generadas en Chile	19
5.2.1	Distribución geográfica y fundiciones operativas	19
5.2.2	Volúmenes de producción y acumulación de escorias	20
5.2.3	Flujo de las escorias de cobre en el circuito de fundición	21
5.2.4	Tipos de enfriamiento y formas físicas	23
5.2.5	Caracterización de las escorias de cobre	24
5.2.6	Propiedades físicas y mineralogía de las escorias de cobre	25
5.3	Factores facilitadores de la valorización de escoria en Chile.....	25
5.3.1	Propiedades técnicas del material	25
5.3.2	Validación técnica mediante proyectos piloto	26
5.3.3	Presión ambiental sobre extracción de áridos naturales	26
5.4	Factores que impiden la valorización de escoria en Chile	27
5.4.1	Factor regulatorio como barrera principal.....	27
5.4.2	Heterogeneidad composicional de las escorias chilenas	28
5.4.3	Factores económicos y logísticos	29
5.4.4	Barreras socioculturales y de percepción	30
5.5	Propuesta de alternativa de reutilización sostenible y circular para las escorias de la V región	31
5.5.1	Contexto y necesidad.....	31
5.5.2	Experiencias de valorización de escorias de cobre en Chile.....	33
5.5.3	Propuesta de alternativa para la V Región.....	40
5.5.4	Balance cuantitativo de escorias vs áridos naturales para la región de Valparaíso	44

5.5.5	Cuantificación del impacto de sustitución en el proyecto Quintero-Puchuncaví.....	48
5.5.6	Análisis económico-logístico: el factor densidad y radio de competitividad.....	50
6	DISCUSIÓN.....	52
7	CONCLUSIONES	56
8	BIBLIOGRAFÍA.....	58
9	ANEXOS	66

INDICE DE FIGURAS

Figura 5.1: Diagrama del proceso pirometalúrgico de las escorias de cobre	22
Figura 5.2: Tipos de escoria de cobre según su forma física y proceso de enfriamiento.	24
Figura 5.3: Escorial de fundación Chagres, Catemu	32
Figura 5.4: Uso de la escoria en proyectos promovidos por Codelco.....	34
Figura 5.5: Maceteros de escoria en la plaza Villa el Sol, Catemu.....	35
Figura 5.6: Baldosas de escoria en la plaza Villa el Sol Catemu	36
Figura 5.7: Baldosas y maceteros de escoria en la plaza Villa el Sol Catemu	38

INDICE DE TABLAS

Tabla 5.1: Comparación de marcos regulatorios para valorización de escorias metalúrgicas.....	19
Tabla 5.2: Fundiciones de cobre en Chile y su distribución geográfica.....	20
Tabla 5.3: Generación y acumulación de escorias de cobre en Chile	21
Tabla 5.4: Promedio de composición química (% en peso) de componentes en escorias de cobre	24
Tabla 5.5: Concentraciones máximas permisibles según el DS N°148.....	27
Tabla 5.6: Composición química de arena y gravilla utilizados para fabricación de baldosas de concreto	43
Tabla 5.7: Porcentajes de elementos químicos nocivos (D.S.N°148) de las baldosas de concreto...43	
Tabla 5.8: Estimación de generación de escoria Fundición Chagres y stock acumulado desde el periodo 2018 hasta el 2025.....	45
Tabla 5.9: Inventario de escorias de cobre disponibles en la Región de Valparaíso.....	45
Tabla 5.10: Estimación de demanda regional de escoria según aplicación y porcentaje de sustitución.....	47
Tabla 5.11: Comparación consumo de materiales Proyecto Quintero-Puchuncaví en ejecución	50

1 INTRODUCCIÓN

El proceso de la globalización ha permitido una mayor circulación de bienes, capitales e información entre países, transformando las relaciones comerciales internacionales. Este proceso ha dado lugar a la consolidación de distintos organismos que superan barreras nacionales los cuales establecen normas de comercio global, aunque esto también ha reducido el margen de acción que los distintos países tiene para diseñar políticas autónomas (Organización Mundial del comercio [OMC],2020). En términos económicos, la apertura comercial ha impulsado el crecimiento del PIB y atrae la inversión extranjera, no obstante, al mismo tiempo se profundizan las diferencias de ingresos entre países ricos y pobres, como también al interior de cada sociedad (Banco Mundial, 2020). La incorporación de cadenas productivas internacionales ha generado oportunidades laborales, aunque frecuentemente bajo condiciones de precariedad y alta fluctuación e incertidumbre en los mercados financieros internacionales (Organización Internacional del Trabajo [OIT] ,2025).

Ambientalmente, este fenómeno global presenta una contradicción. Por un lado, ha facilitado la cooperación internacional para abordar problemas compartidos como el cambio climático. Y, por otra parte, la necesidad de abastecer mercados crecientes ha intensificado la extracción en masa de recursos naturales, ejerciendo una presión cada vez mayor en los distintos ecosistemas.

Por otra parte, el cambio climático se ha transformado en una de las principales amenazas a escala mundial. Las emisiones acumuladas de Gases de efecto invernadero (GEI) están elevando la temperatura a nivel global, generando impactos como sequías prolongadas, erosión acelerada de los suelos, ascenso del nivel oceánico y eventos de extremas temperaturas (Administración Nacional de Aeronáutica y el Espacio [NASA]. 2025). Las consecuencias recaen de manera desproporcionada sobre los países menos desarrollados en los cuales surgen desplazamientos poblacionales, se ve amenazada la economía y se ven exacerbados conflictos por el acceso a recursos básicos como el agua (Global Choices ,2025).

Los desafíos impuestos por el climático han impulsado una transformación energética global, donde la transición hacia fuentes renovables y tecnologías bajas en carbono ha elevado la demanda por minerales estratégicos. La electrificación del transporte, el desarrollo de sistemas de almacenamiento de energía y la digitalización de las industrias demandan volúmenes cada vez mayores de recursos minerales como el litio, el níquel y especialmente, el cobre. Se estima que la demanda global de minerales estratégicos podría triplicarse hacia 2050 (Banco Mundial, 2020). En consecuencia, las explotaciones mineras a nivel mundial han crecido de forma acelerada, tanto en volumen como en superficie intervenida, generando nuevas presiones sobre territorios frágiles y comunidades locales.

En Chile la expansión de la gran minería metálica, concentrada principalmente en las regiones del norte, ha traído consigo impactos sociales y ambientales considerables. Entre estos, se ha documentado la disminución sostenida de reservas hídricas, conflictos por el acceso al agua entre comunidades rurales

e industrias. A esto se suman emisiones atmosféricas provenientes de los procesos de chancado, transporte y fundición, así como la generación de grandes volúmenes de residuos sólidos, como relaves y/o materiales estériles que se acumulan en el territorio durante décadas (Servicio Nacional de Geología y Minería [SERNAGEOMIN], 2023). Adicionalmente se ha detectado la presencia de metales pesados tanto en suelos, techos de casas y cuerpos de agua que ponen en riesgo la salud de los ecosistemas y las personas (Painecur et al., 2022).

Frente a esta realidad, la legislación ambiental chilena ha experimentado avances importantes. La promulgación de la Ley 19.300 en 1994 constituyó un gran hito al reconocer el derecho de las personas a vivir en un medio ambiente libre de contaminación, dando paso a instrumentos como el Sistema de Evaluación de Impacto Ambiental (SEIA) y posteriormente, la creación de instituciones especializadas como la Superintendencia del Medio Ambiente y los Tribunales Ambientales (Ministerio del Medio Ambiente [MMA], 2016; Biblioteca del Congreso Nacional, 1994). Más recientemente, la Ley 20.920 incorporó el principio de Responsabilidad Extendida del Productor (REP), estableciendo obligaciones específicas para los generadores de residuos y fomentando la economía circular, incluyendo algunos de los residuos industriales y mineros (MMA, 2016).

A pesar de estos avances, la gestión de residuos mineros continúa representando uno de los principales problemas ambientales nacionales. Según el catastro más reciente del Servicio Nacional de Geología y Minería, existen 836 depósitos de relaves concentrados en las regiones de Coquimbo y Atacama, en los cuales se le depositan de manera anual aproximadamente 500 toneladas extras provenientes mayoritariamente de la minería del cobre (SERNAGEOMIN, 2024). El manejo inadecuado de estos materiales puede generar degradación de suelos, contaminación de aguas tanto superficiales como de napas subterráneas, y alteraciones irreversibles en los ecosistemas que los rodean. Esta problemática demanda una planificación territorial más integrada, el fortalecimiento del marco normativo ambiental y la adopción de nuevas tecnologías más sostenibles con el fin de transformar estos pasivos ambientales en oportunidades productivas (Vidal Olmedo, 2025).

Dado que Chile concentra aproximadamente el 24% de la producción mundial de cobre (Comisión minera del Cobre [COCHILCO], 2024), el país no solo lidera en la extracción del metal, sino también la generación de los residuos asociados a su procesamiento. Esta posición preponderante del mercado del cobre tiene implicancias directas en la economía del país. Según el consejo minero, en el año 2024, la minería aportó de manera directa un 11,7% del Producto Interno Bruto (PIB), cifra que asciende al 20% al considerar los efectos multiplicadores en distintos sectores como el transporte, manufactura y servicios conexos (Consejo minero, 2025). En palabras sencillas se puede decir que una de cada cinco unidades monetarias producidas en la economía chilena proviene de la actividad minera, lo que demuestra una vez más la importancia de la minería en nuestro país.

La magnitud de las actividades mineras-metalúrgicas lleva necesariamente la generación de grandes volúmenes de subproductos y residuos. La explotación de yacimientos requiere remover rocas estériles, bombear millones de litros de agua subterránea y superficial y consumir significativas cantidades de energía para triturar, concentrar y fundir el material metálico (SERNAGEOMIN, 2023). Se

suma a lo anterior la fase de fundición y refinación, ya sea en altos hornos o en hornos de arco eléctrico, donde mediante reacciones químicas a temperaturas superiores a 1200 °C se separan impurezas minerales de la fase metálica pura, originando una fracción residual vítrea o semi-vítrea conocida como escoria (Sánchez, 2023; Gorai y Shosh, 2003).

1.1 Generación de escorias metalúrgicas

El cobre existe en la naturaleza asociado al azufre y al oxígeno. Es así como los pórfidos cupríferos se encuentran en las capas subterráneas del suelo. En Chile, los minerales sulfurados presentes son: la calcopirita ($CuFeS_2$), la bornita (Cu_5FeS_4), la calcosina (Cu_2S) y la Covelina (CuS).

Para recuperar el cobre presente en el concentrado de otras especies minerales se utiliza la pirometalurgia, proceso en el cual se agrega fundentes para generar 2 fases que se separan el metal líquido gracias a su diferencia de densidad, obteniendo cobre anódico como producto principal, ácido sulfúrico como subproducto y escorias como residuo. Esta última, al enfriarse rápidamente, se cristaliza parcialmente y atrapa compuestos no metálicos en su estructura (Piatak y Parsons, et al 2015). De este modo se genera un residuo conocido como escorias. Su rápida solidificación produce una estructura mayoritariamente amorfa, sólida y poco propensa a reaccionar químicamente (Gorai y Shosh, 2003).

Mundialmente, se genera anualmente una cantidad aproximada de 400 millones de toneladas de escorias metalúrgicas asociadas a la fundición de metales (Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico de España [MITECO], 2021).

En Chile, los procesos de fundición de cobre generan escorias metalúrgicas en volúmenes que superan la producción del metal mismo. Estas escorias, bajo el marco regulatorio chileno actual, se depositan mayoritariamente como un pasivo ambiental (Wiche et al., 2023; Sánchez, 2023). Las escorias presentan distintas composiciones según el yacimiento de origen del mineral y el tipo de mena tratada. (Consejo minero, 2025; SERNAGEOMIN, 2024).

1.2 Experiencia internacional en valorización de escorias

A nivel internacional, diversas economías avanzadas redefinieron las escorias pasando de ser un residuo a materias primas secundarias de alto valor, incorporándolas exitosamente en aplicaciones industriales. En la Unión Europea, Estados Unidos y Japón, las escorias de alto horno y de fundición de cobre se utilizan en producción de cementos, en sustitución de áridos naturales en hormigones, materiales cerámicos y vidrios industriales, logrando reducciones de hasta el 40% de las emisiones de CO₂ durante la fabricación de cemento sin sacrificar propiedades mecánicas (MITECO, 2021). La normativa europea que estableció el fin de la categoría de residuo permitió que, tras procesos de molienda, lavado y estabilización, ciertas fracciones de escoria fueran directamente comercializadas como áridos artificiales (Falsafi et al., 2023).

1.3 Marco Regulatorio de las escorias

A pesar del potencial de valorización de las escorias para su procesamiento y aplicaciones, la implementación a gran escala de algunas de estas estrategias en Chile enfrenta barreras significativas, principalmente debido a la falta de un marco regulatorio que diferencia las escorias de cobre de otros residuos mineros masivos, lo que permitiría así su clasificación como subproducto o material reutilizable para incentivar su valorización. Algunas empresas mineras chilenas como Codelco han avanzado en proyectos piloto y se han orientado hacia una regulación que permita el uso de escorias en la construcción.

1.4 La paradoja de la economía circular en la minería chilena

La experiencia internacional demuestra de forma contundente que las escorias metalúrgicas lejos de ser un desecho son una materia prima secundaria viable (Phiri et al., 2022). Esta realidad contrasta marcadamente con la situación en Chile. A pesar de que el país ha avanzado en su legislación ambiental, incorporando principios como la ley REP y el fomento a la economía circular 2040 (MMA, 2021), existe aún una desconexión crítica en cuanto a la gestión de residuos mineros masivos.

Chile, siendo líder en la generación de sus residuos asociados a la minería, mantiene a las escorias bajo la categoría de pasivo ambiental. Esta falta de un marco regulatorio específico que las reconozca como un subproducto con potencial de valorización genera una paradoja: mientras el discurso público y legal avanza hacia la sostenibilidad, en la práctica se perpetúa un modelo de explotación lineal que acumula gigantescos volúmenes de material- *más de 70 millones de toneladas históricas* - con valor económico y ambiental demostrado en otras latitudes. (SERNAGEOMIN 2023).

El escenario actual de la minería del cobre en Chile presenta un desafío crítico y una oportunidad no resuelta. Por lo tanto, es necesario avanzar en resolver esta paradoja, haciendo más expedito los procesos normativos junto con las acciones para evitar la acumulación de las escorias, derivándolas a un uso adecuado en un marco de una economía circular que este en línea con un desarrollo sostenible.

2 PROBLEMA

Chile es reconocido históricamente como líder en la producción de cobre. A pesar de las fluctuaciones en su participación en el mercado global mantiene el primer lugar en el ranking mundial.

En la naturaleza, el cobre sulfurado está acompañado de sulfuros de hierro, los cuales son separados para formar una corriente de cobre metálico, una corriente gaseosa con altos contenidos de SO₂ el que se conduce a una Planta de Ácido y una fase vítrea que es la escoria, compuesto formado por hierro, sílice y óxidos metálicos que hoy en día se almacena en grandes espacios habilitados para ello, constituyendo un gran pasivo ambiental.

En Chile, a pesar del significativo volumen de escorias metalúrgicas generada por la industria del cobre, persiste la existencia de impedimentos legales para su uso, como consecuencia de su clasificación como un residuo minero masivo. Esto ha provocado que este residuo, que podría ser catalogado como subproducto no haya sido valorado adecuadamente en el país, quedando confinada en botaderos, perpetuando así un modelo de explotación lineal que desincentiva su recuperación y reutilización a gran escala, contradiciendo los principios de la economía circular.

3 OBJETIVOS

3.1 Objetivo general

Realizar un diagnóstico de oportunidades, aplicaciones y desafíos para la implementación de alternativas de valorización de escorias de cobre en Chile.

3.2 Objetivos específicos

1. Recopilar literatura científica y técnica que permita realizar un diagnóstico respecto de la valorización de escorias metalúrgicas.
2. Caracterizar las escorias de cobre chilenas, incluyendo la tasa de producción de estas.
3. Identificar los factores que favorecen y/o impiden la valorización de las escorias de cobre en Chile.
4. Proponer una alternativa de reutilización sostenible y circular para las escorias de la V Región, basado en el análisis de experiencias documentadas en Chile

4 METODOLOGÍA

El presente trabajo de título es una investigación de tipo descriptiva y diagnóstica, basada principalmente en la revisión de literatura científica, técnica y normativa, tanto a nivel nacional como internacional, orientada a proponer alternativas de reutilización sostenible de la escoria.

4.1 Búsqueda y selección de literatura científica y técnica

Con el fin de establecer un marco de referencia técnico y regulatorio que permita realizar un diagnóstico sobre la valorización de escorias en Chile, se realizó una revisión bibliográfica de literatura científica y técnica, en primer lugar, se buscó información en revistas y publicaciones electrónicas de acuerdo con palabras claves establecidas tanto en español como en inglés que se indican a continuación:

- **Español:** Escoria, escoria de cobre, desechos mineros, valorización de escorias, economía circular minera, silicato de hierro, residuos metalúrgicos, áridos artificiales.
- **Inglés:** Copper slag, metallurgical slag, slag valorization, iron silicate, end-of-waste, circular economy

Las bases de datos especializadas utilizadas fueron principalmente *Scopus*, *Web of Science*, *ScienceDirect* y el catálogo de revistas científicas de la Universidad de Valparaíso. Adicionalmente, se utilizaron herramientas de inteligencia artificial (IA) como Gemini IA (alineado con Google *Scholar*) para explorar bases de datos en función de las palabras claves predefinidas para esta investigación. Asimismo se consultaron fuentes técnicas e institucionales:

- Servicio Nacional de Geología y Minería (SERNAGEOMIN)
- Ministerio del Medio Ambiente (MMA)
- Comisión Chilena del Cobre (COCHILCO)
- Consejo Minero de Chile
- Instituto Nacional de Normalización (INN)
- Corporación de Desarrollo Tecnológico (CDT)
- Corporación Alta Ley
- Banco Mundial
- Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económicos (OCDE)
- Unión Europea (directivas y reglamentos)
- Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico de España (MITECO)

Los criterios de selección que se aplicaron para los documentos potencialmente útiles fueron los siguientes:

- Documentos que mencione escorias metalúrgicas

- Documentos sobre valorización de escorias metalúrgicas.
- Estrategias implementadas a nivel internacional
- Marcos regulatorios sobre escorias
- Caracterizaciones físicas, químicas y mineralógicas de escoria de cobre.
- Idiomas: español, inglés.

4.1.1 Análisis y síntesis de la información recopilada

A partir de la base documental establecida en la anteriormente, se realizó una síntesis de las experiencias internacionales de valorización y de los marcos regulatorios que la han facilitado.

Para sistematizar las experiencias internacionales identificadas en la revisión bibliográfica, se elaboró una síntesis estructurada de cada aplicación de valorización documentada, considerando:

- Tipo de aplicación específica
- País o región donde se implementó
- Escala de implementación
- Tecnología o proceso empleado
- Parámetros técnicos relevantes
- Beneficios ambientales o económicos reportados

La información recopilada se organizó y agrupó en base a los siguientes criterios establecidos en base a la revisión bibliográfica:

1. **Materiales de construcción:** Aplicaciones que involucran el uso de escorias en cemento, hormigón, morteros y materiales prefabricados, ya sea como sustituto parcial de cemento, como árido o como adición puzolánica.
2. **Pavimentos y carreteras:** Uso de escorias en capas de base, sub-base, mezclas asfálticas, tratamientos superficiales y otras aplicaciones viales.
3. **Materiales cerámicos:** Incorporación de escorias en la fabricación de ladrillos, baldosas y otros productos cerámicos.
4. **Protección de infraestructura:** Uso en estructuras de protección costera, fluvial o hidráulica (rompeolas, tetrápodos, protección de lechos).
5. **Aplicaciones industriales:** Uso como abrasivo (*granallas de sandblasting*), fundentes o insumos para otros procesos industriales.
6. **Recuperación de metales:** Procesos físicos, químicos o térmicos para extraer metales residuales de valor (cobre, hierro, molibdeno, oro, plata).
7. **Aplicaciones agrícolas:** Uso como enmienda de suelos, corrector de pH, fuente de micronutrientes o mejoradores de estructura del suelo.
8. **Tratamiento de efluentes:** Aplicaciones como adsorbente, precipitante o catalizador en tratamiento de aguas residuales industriales o domésticas.

En cada categoría se realizó una síntesis que incluyó los principios técnicos básicos que fundamentan su uso, las experiencias documentadas en la literatura internacional, entre otras características dependiendo de la aplicación.

Paralelamente al análisis de las aplicaciones identificadas, se revisaron documentos que describen los marcos legales y normativos que regulan el uso de escorias en los diferentes países y regiones en donde se documentaron aplicaciones exitosas o en países en donde la escoria ya este insertada al mercado.

Se identificaron y analizaron los siguientes aspectos de los marcos regulatorios:

1. **Clasificación legal del material**
2. **Mecanismos de reclasificación:** Existencia de procedimientos administrativos o legales que permitan que un material derivado de residuos deje de ser considerado residuo y adquiera estatus de producto comercializable.
3. **Requisitos técnicos para valorización:** Normas técnicas, estándares de calidad, protocolos de caracterización, límites de contaminantes, ensayos de lixiviación y otros requisitos que deben cumplirse para habilitar el uso de escorias en diferentes aplicaciones.
4. **Institucionalidad regulatoria:** Organismos responsables de autorizar, fiscalizar y certificar el uso de materiales secundarios derivados de residuos industriales.
5. **Incentivos o barreras económicas:** Políticas públicas que facilitan u obstaculizan la valorización (impuestos, subsidios, certificaciones, restricciones)

4.2 Descripción y caracterización de la escoria de cobre generadas en Chile

La información se obtuvo mediante la revisión y análisis de datos publicados en la literatura científica y técnica recopilada anteriormente.

Se identificaron las fundiciones de cobre operativas en Chile mediante la consulta de documentos oficiales del sector minero, informes de empresas productoras y publicaciones de organizaciones sectoriales.

Para cada fundición identificada se registró:

- Nombre de la instalación
- Empresa operadora
- Región administrativa
- Estado operativo (activa o cerrada)
- Capacidad de producción de cobre fino (toneladas/año)

Posteriormente se estimó los volúmenes de producción de escorias mediante el siguiente procedimiento:

1. **Obtención de datos de producción nacional de cobre:** Se consultaron las estadísticas oficiales de producción de cobre fino publicadas por organismos nacionales para los años recientes.
2. **Identificación de ratios de generación:** Se revisó la literatura técnica nacional e internacional para identificar el ratio promedio de generación de escoria por tonelada de cobre producido en procesos de fundición, expresado en toneladas de escoria por tonelada de cobre fino.
3. **Cálculo de generación anual:** Se multiplicó la producción nacional de cobre por el ratio de generación identificado para estimar el volumen anual de escoria generada en Chile.
4. **Estimación del stock histórico acumulado:** Se recopiló información disponible en documentos técnicos y publicaciones sectoriales sobre el stock total acumulado de escorias depositadas históricamente en el país y la superficie aproximada ocupada por estos depósitos.

La caracterización química y mineralógica se realizó mediante la compilación y análisis de datos publicados en estudios previos, identificando estudios académicos que reportaron caracterizaciones químicas de fundiciones chilenas. Se extrajeron datos de composición química y características mineralógicas.

En el caso de la caracterización de propiedades físicas se recopiló y sistematizó información publicadas, registrándose lo siguiente:

- Densidad (g/cm^3) y gravedad específica
- Dureza (escala Mohs)
- Absorción de agua (%)
- Formas físicas disponibles (piedra, granulado, polvo fino)
- Color y apariencia
- Métodos de enfriamiento

A manera de contexto se elaboró una descripción técnica de parte del proceso de fundición de cobre, enfocado directamente en el flujo de las escorias dentro del circuito productivo. Esta información fue generada en apoyo de información técnica de manuales de operacionales, documentos de empresas y publicaciones especializadas en metalurgia extractiva del cobre. Adicionalmente se incluyó un diagrama del proceso para facilitar la comprensión del flujo de materiales.

4.3 Identificación de factores facilitadores e impeditivos

Esta etapa tuvo como propósito identificar y clasificar los factores que condicionan la valorización de escorias en Chile. El análisis se realizó mediante la revisión crítica de la literatura recopilada.

Posterior a la recopilación de material del capítulo 4.1, se establecieron 4 ejes o dimensiones en los cuales se enfocó el análisis de factores:

- **Eje regulatorio:** Factores relacionados con el marco normativo vigente, clasificación legal de las escorias en la legislación ambiental chilena, existencia o ausencia de mecanismos de reclasificación, requisitos de permisos, trazabilidad y fiscalización.
- **Eje técnico:** Factores relacionados con las propiedades físicas, químicas y mineralógicas del material, heterogeneidad composicional entre diferentes fuentes, riesgo potencial de lixiviación de contaminantes, disponibilidad de normas técnicas nacionales y protocolos de certificación de calidad.
- **Eje económico:** Factores relacionados con costos de procesamiento, transporte, almacenamiento, disposición versus valorización, competitividad económica frente a áridos naturales, distancia entre sitios de generación y mercados de consumo.
- **Eje sociocultural y de percepción:** Factores relacionados con la aceptación social de proyectos de valorización, percepción de riesgos ambientales o sanitarios por parte de comunidades locales, nivel de información disponible para la ciudadanía e información real que maneja la ciudadanía.

Para cada uno de los ejes mencionados anteriormente se realizó un proceso de revisión de documentos específicos que aborde cada eje para extraer información clave respecto de argumentos o evidencias que describan barreras o facilitadores para la valorización de escoria.

Dependiendo de la información extraída se identificó como facilitador, aquellos elementos que favorezcan o impulse la valorización y como factores impeditivos, los que obstaculizan, limitan o impiden la valorización.

Posteriormente con los factores tanto facilitadores como impeditivos identificados y clasificados, se realizó una búsqueda en la literatura extra en base a estos factores para fundamentar de manera más robusta y posteriormente hacer una priorización de los factores para determinar cuáles constituyen las barreras principales y los facilitadores relevantes, priorización que se basó en:

- Frecuencia de mención en la literatura
- Énfasis dado por los documentos técnicos
- Impacto potencial sobre la viabilidad de proyectos de valorización
- Consenso entre diferentes fuentes y en la consulta a actores claves.

4.4 Propuesta de alternativa de valorización para la V región

Esta etapa tuvo como propósito desarrollar una propuesta de alternativa de reutilización sostenible y circular para las escorias de la Región de Valparaíso.

Se realizó una búsqueda específica de casos prácticos, proyectos piloto, experiencias de valorización y actores relevantes, tanto a nivel nacional como regional.

Para la búsqueda de casos nacionales, se llevó a cabo una nueva búsqueda dirigida a experiencias concretas o proyectos piloto de valorización de escorias de cobre en el territorio chileno, así también se buscó la existencia de productos que incluyan escoria de cobre. Además, se indago sobre actores fundamentales de los distintos proyectos piloto y estrategias de valorización.

Se realizaron 2 entrevistas semiestructuradas entre septiembre y octubre de 2025, distribuidas según los siguientes perfiles: a) Productores de Escoria (Minería), (b) Investigadores de Proyectos (Académicos), (c) Ejecutores o Municipalidad

La elección de entrevistados se realizó bajo el criterio de informantes con experiencia directa en proyectos de valorización en la Región de Valparaíso. Los contactos se hicieron en forma directa o mediante correo institucional.

Se elaboraron pautas diferenciadas en formato y alcance según la relación del entrevistado con el tema (anexos 1 y 2)

Entrevistas Semiestructuradas (Abiertas): Se aplicaron a los Investigadores (director de la escuela de ingeniería Química de la Pontificia Universidad Católica de Valparaíso) Y al alcalde del municipio de Catemu.

Previo a cada entrevista, se solicitó consentimiento del entrevistado, explicando el propósito académico del trabajo y el uso de la información. Se acordó con cada entrevistado si su nombre y cargo serían citados explícitamente o si preferían anonimato.

Para la construcción de la propuesta de valorización de la escoria se establecieron criterios basados en las entrevistas e ideas obtenidas a partir de la revisión bibliográfica.

Se estimará una oferta potencial de sustitución de escoria por áridos y también una demanda de áridos para la V región. Con el fin de estimar un balance oferta-demanda.

5 RESULTADOS

5.1 Valorización de las escorias de cobre

La valorización de escorias metalúrgicas, particularmente las provenientes de la fundición de cobre, han sido objeto de múltiples investigaciones y aplicaciones industriales en diversos países. A nivel internacional, las escorias dejaron de ser consideradas únicamente como residuos para transformarse en materias primas secundarias con aplicaciones validadas en múltiples sectores industriales. A continuación, se presentan las principales estrategias de valorización identificadas en la literatura internacional.

5.1.1 Aplicaciones en el sector de la construcción e ingeniería civil

5.1.1.1 Reemplazo de áridos en hormigones y morteros

La escoria de cobre ha sido utilizada como reemplazo parcial del agregado fino en hormigones y morteros, esta llega a reemplazar hasta un 80% de los áridos naturales y el estudio de Romo Zazueta (2010) reportó aumentos en la resistencia mecánica con estas sustituciones. Además, se ha verificado que su molienda mejora la resistencia mecánica cuando se emplea como aditivos en cementos.

Al-Jabri et al. (2009) incorporaron escoria de cobre molida como reemplazo parcial del cemento en rangos del 10% al 30%, alcanzando resistencias a la compresión equivalentes o superiores a las mezclas de control con cemento Portland puro. Investigaciones realizadas en morteros con 15% de escoria como sustituto del cemento mostraron incrementos de hasta 12% en la resistencia a los 28 días (Jiang et al., 2018).

La escoria de cobre granulada, debido a su bajo contenido de óxido de calcio (CaO) y su estado vítreo, ha sido clasificada como puzolana¹ industrial por la Norma Europea de 1992, autorizando su incorporación en cementos hasta en un 15% en peso. Se ha comprobado que morteros con rangos desde 10 % y hasta 30% de escoria cumplen con los tiempos de fraguado y las resistencias mecánicas exigidas por la normativa mexicana (Romo Zazueta, 2010).

Pacheco-Torgal et al. (2012) evaluaron en España el comportamiento de hormigones con 20% de escoria de cobre como sustituto de árido fino, sometidos a ciclos de hielo-deshielo y exposición a sulfatos. Los resultados indicaron resistencia comparable o superior a la de hormigones convencionales.

¹ La actividad puzolánica corresponde a la capacidad de ciertos materiales silíceos o aluminosilicatos de reaccionar, en presencia de humedad, con el hidróxido de calcio liberado principalmente en la creación del cemento, formando así compuestos con propiedades cementantes

En la fabricación de cemento, la incorporación de escoria de cobre evita la necesidad de añadir hierro adicional y puede modificar la temperatura de fusión de la mezcla. También ha demostrado compatibilidad en morteros sustituyendo el cemento portland, alcanzando propiedades mecánicas similares o superiores y ha sido utilizada en las elaboraciones de hormigones especiales tales como hormigones de protección radiológica (Orizola Gómez, 2006).

5.1.1.2 Material para carreteras y pavimentos asfálticos

Las escorias han sido utilizadas en la construcción de carreteras debido a su capacidad para soportar tráfico pesado, su resistencia a bajas temperaturas y su permeabilidad al agua (Sánchez, 2023). La escoria ha sido aplicada en capas asfálticas delgadas como tratamientos superficiales simples, lechadas asfálticas y sellos tipo *cape seal* (Pardo Vera, 2018). En estas aplicaciones se han reportado mejoras en la textura superficial y la durabilidad del pavimento (Pardo Vera, 2018).

Wu et al. (2025) demostraron que gracias a la angularidad de las escorias de cobre y su alto contenido en Fe_2O_3 y SiO_2 el asfalto ofrece una mejor resistencia a la abrasión y a su comportamiento frente a cargas verticales y laterales.

En Chile se pavimentaron 2000 m² de un estacionamiento para buses con una mezcla asfáltica compuesta en un 20% por escorias de cobre de la ex fundición de Ventanas Codelco (Codelco, 2025).

5.1.1.3 Uso en ladrillos y materiales cerámicos

En la fabricación de ladrillos también se ha utilizado como materia prima escoria de cobre, posterior a un proceso de trituración y molienda (Santacruz-Torres & Torres-Agredo, 2019). Investigaciones han demostrado que incorporar hasta un 15 % de escoria en ladrillos cerámicos puede mejorar su resistencia a la compresión y permitir la inmovilización de elementos como plomo, arsénico y selenio (Herrera Vásquez et al, 2021). Un proyecto piloto de Anglo American utilizó 1000 kilos de escoria de cobre de la fundición Chagres en la construcción de baldosas para una plaza urbana (CNN Chile, 2024)

5.1.1.4 Protección de infraestructuras Hidráulicas y Costeras

La escoria de cobre ha sido utilizada en obras de protección de lechos fluviales, puertos y sectores costeros. Particularmente en Chile se ha reportado el uso de escoria para construir tetrápods o rompeolas, dado que se aprovecha la densidad, la baja permeabilidad y la estabilidad frente a corrientes de agua (Nazer et al, 2016; Sánchez, 2023).

5.1.2 Aplicaciones como abrasivo industrial

El *sandblasting*² es otra aplicación que se le da a la escoria de cobre, utilizándola en la limpieza y decapado de superficies metálicas (W Abrasives, s.f.). En Chile, MASERVI S.A fabrica y comercializa granallas abrasivas de escoria de cobre libres de polvo y sílice, las cuales son ampliamente utilizadas en astilleros maestranzas y plataformas marinas de Sudamérica y el Caribe (Maservi, s.f).

5.1.3 Recuperación de metales

Como se mencionó en capítulos anteriores la escoria de cobre contiene metales residuales de alto valor como oro (Au), plata (Ag) y molibdeno (Mo), además de cobre (Cu) en formas sulfuradas, oxidadas o como partículas metálicas libres (Sánchez, 2023). Para extraer las escorias de alta ley se emplean dos métodos principales:

1. Flotación con colectores sulfhídricos (xantatos): los xantatos se adsorben selectivamente sobre las partículas de cobre sulfurado, permitiendo su arrastre en espuma y separación de la fase silicatada. De esta forma se obtiene un concentrado con un 20-25% de cobre (Valderrama et al., 2018).
2. Reducción con coque: la escoria se somete a un tratamiento térmico en presencia de coque, que actúa como reductor y transforma los óxidos de cobre en metal, el cual se sedimenta para su recuperación (Sánchez, 2023).

Ambos procesos pueden reducir aún más el contenido de cobre en las escorias, llegando a un cobre residual del 0,06%. En cuanto al molibdeno, que se asocia a la magnetita en la fase oxidada, se realiza una oxidación controlada que rompe la unión Mo-Fe, liberando el molibdeno para su posterior recuperación (Sánchez, 2023).

El Laboratorio *Research in Powder Metallurgy* (RPM) de la USM, liderado por el Dr. Claudio Aguilar, inició en 2019 un proyecto Fondef titulado “Obtención de polvos de aleaciones metálicas ricas en hierro a partir de escorias de descarte de fundición de cobre”, en el cual ha demostrado la viabilidad de extraer más del 98 % del hierro presente en la escoria y convertirlo en polvos de alta pureza (USM 2023)

² *Proceso de limpieza y preparación de superficies en base a partículas abrasivas con el fin de eliminar contaminantes, pinturas y óxidos o en algunos casos generar la textura superficial adecuada para recubrimientos posteriores*

5.1.4 Aplicaciones en la agricultura y mejoramiento de suelos

Una investigación (Zakharova et al., 2024) evaluó la aplicación de escoria de convertidor y lodos de alto horno ³ en el ámbito agrícola. Los resultados indicaron que la incorporación de estos materiales funcionó como una fuente de micronutrientes y un desoxidante para suelos ácidos.

Las concentraciones utilizadas en el experimento de laboratorio fueron de 0,8 g·kg⁻¹ de escoria. Con esto se observó un incremento en el rendimiento de la avena cultivada en los suelos tratados con estos residuos. Adicionalmente, se documentó una mejora en las propiedades del suelo. El estudio también reveló que la aplicación de escoria contribuyó a la sorción e inmovilización de plomo en la capa superior del suelo (Zakharova et al., 2024).

5.1.5 Tratamiento de aguas residuales

Según el estudio de Leiva-Guajardo et al. (2024), la escoria de cobre puede ser utilizada en el tratamiento de aguas contaminadas, aprovechando sus propiedades como la resistencia al desgaste, angularidad, alta densidad y su carácter hidrofílico para neutralizar la toxicidad de los metales presentes. La escoria actúa como un adsorbente y precipitante para la eliminación de contaminantes. La precipitación es a menudo el mecanismo principal de remoción, especialmente con altos valores de pH, en donde se forman hidróxidos metálicos. La hidrólisis de la escoria convierte los óxidos en hidróxidos, y el intercambio iónico puede ocurrir cuando el calcio en la escoria es intercambiado por metales pesados (Leiva-Guajardo et al., 2024).

Además, en el mismo estudio se menciona que la escoria de cobre funciona como catalizador en reacciones tipo Fenton ⁴ para el tratamiento de aguas residuales, mejorando la oxidación del peróxido de hidrógeno, persulfato y permanganato de potasio para la degradación de contaminantes orgánicos. También, puede actuar como fotocatalizador tipo Photo-Fenton⁵ bajo irradiación solar para la reutilización de aguas residuales, no obstante, a pesar de su eficacia existe un riesgo de contaminación secundaria si grandes cantidades de metales pesados o compuestos orgánicos son adsorbidos en la escoria durante los procesos de tratamiento (Leiva-Guajardo et al., 2024).

³ Los lodos de altos hornos son de escorias de acero

⁴ Reacción tipo Fenton: *Proceso de oxidación avanzada en el que se usa peróxido de hidrógeno en presencia de iones de hierro para generar radicales de hidroxilo, los cuales son especies altamente reactivas capaces de degradar contaminantes orgánicos en agua* (Machado et al., 2023)

⁵ Reacción tipo Photo-Fenton: *Reacción que combina la luz UV con el proceso de Fenton, intensificando la producción de radicales oxidantes* (Machado et al., 2023)

5.1.6 Marcos regulatorios internacionales

5.1.6.1 Modelo Europeo: Directiva marco de residuos y end-of-waste

La Unión Europea ofrece el ejemplo más robusto de un marco regulatorio moderno y basado en la ciencia para la gestión de escorias. La Directiva 2008/98/CE sobre residuos, conocida como la Directiva Marco de Residuos (DMR), establece la piedra angular de la política de gestión de residuos de la UE (Unión Europea, 2008). Esta directiva impone una estricta jerarquía de residuos que guía las prioridades de gestión: prevención, preparación para la reutilización, reciclado, valorización para otros fines y, por último, la eliminación (Comisión Europea, 2020).

El mecanismo habilitador clave para la valorización de materiales industriales estables como la escoria es el concepto de *End-of-Waste* (EoW) o "Fin de la Condición de Residuo". Este proceso regulatorio permite que los materiales considerados residuos, una vez que han sido sometidos a un tratamiento suficiente de recuperación, pierdan su estatus legal de residuo y se convierten en Materias Primas Secundarias (Environment and Resources Authority [ERA], s.f.).

El Artículo 6 de la DMR establece cuatro criterios fundamentales que deben cumplirse para que un material obtenga el estatus EoW: (a) uso común y específico para propósitos probados; (b) existencia de un mercado o demanda efectiva; (c) cumplimiento de los requisitos técnicos y legales aplicables a los productos convencionales; y (d) garantía de que su uso no generará impactos adversos para la salud humana o el medio ambiente (ERA, s.f.).

En la Unión Europea, la escoria de cobre (técnicamente, silicato de hierro) no es considerada un residuo. En cambio, está clasificada como un "mineral producido industrialmente" y se encuentra registrada bajo el reglamento REACH (Registro, Evaluación, Autorización y Restricción de Sustancias y Mezclas Químicas) (Corporación Alta Ley, 2024). El principio fundamental de REACH es que la clasificación de una sustancia se basa en evidencia científica rigurosa sobre sus propiedades y los riesgos asociados a su ciclo de vida completo.

5.1.6.2 Casos específicos: Alemania y Países Bajos

Alemania y Países Bajos son referentes en la regulación de residuos minerales para su uso en aplicaciones de construcción. El enfoque regulatorio de estas naciones se centra en la evaluación del riesgo ambiental, priorizando la protección del suelo y las aguas subterráneas (MITECO, 2021).

El marco normativo alemán establece estándares de calidad técnica y ambiental rigurosos para los materiales de construcción que contienen residuos minerales. El estándar alemán impone valores límite de lixiviación para diversos metales pesados. Un estudio comparativo reveló que las concentraciones detectadas para tres de los cuatro metales pesados regulados en el estándar alemán (Cobre, Molibdeno y Antimonio) excedían consistentemente los límites cuando se analizaban muestras de escoria de cobre sin tratamiento previo (MITECO, 2021).

Por ejemplo, el límite alemán para el Cobre es de 0,055 mg/l (L/S 2), mientras que las muestras de escoria analizadas arrojaron resultados de hasta 0,5130 mg/l (MITECO, 2021). Esta diferencia evidencia que, debido a los límites establecidos, algunas escorias que podrían considerarse materiales de construcción viables deben someterse a tratamientos previos para cumplir con la normativa alemana.

Países Bajos posee un marco avanzado para la regulación de residuos minerales utilizados en la construcción, diferenciando claramente dos niveles de calidad ambiental: el Nivel Objetivo, que representa la calidad ambiental necesaria para la funcionalidad total del suelo o las aguas, y niveles de referencia más altos que definen las acciones necesarias en caso de contaminación (MITECO, 2021). El éxito regulatorio de Países Bajos se refleja en su papel como un nodo activo de la economía circular para materiales pesados, siendo un importador neto de macadam⁶ y desechos industriales valorizados de escoria (Observatorio de Complejidad Económica, 2025)

5.1.6.3 Modelo Japonés: valorización integrada

Japón representa un enfoque alternativo caracterizado por la inversión en procesos tecnológicos sofisticados que maximizan la recuperación de energía a partir de residuos, produciendo como subproducto escorias y metales de alta calidad (Japan Association for SMEs Working Environs, s.f.). El objetivo práctico es la reinserción inmediata de los materiales fundidos en la cadena productiva.

Aunque la información disponible no proporciona detalles específicos sobre si Japón utiliza la nomenclatura legal formal "Subproducto" o "Fin de Residuo" comparable a la estructura de la DMR europea, la práctica industrial demuestra una madurez regulatoria que facilita la valorización total. En lugar de centrarse en la prohibición o restricción a través de límites normativos estrictos, el sistema se enfoca en la innovación tecnológica para producir una escoria de suficiente inocuidad y calidad para su uso directo en la construcción o como input industrial (Sociedad Japonesa de Gestión de Residuos, citado en Residuos Profesional, 2021).

5.1.6.4 Tabla comparativa de marcos regulatorios

La tabla 5.1 presenta un resumen comparativo de los marcos regulatorios que facilitaron la valorización de escorias en economías desarrolladas en contraste con el marco regulatorio chileno.

⁶ *tipo de pavimento para carreteras y vías que utiliza escoria*

Tabla 5.1: Comparación de marcos regulatorios para valorización de escorias metalúrgicas Fuente: Elaboración propia a partir de Unión Europea (2008), MITECO (2021), Corporación Alta Ley (2024), CDT (2024).

País/Región	Clasificación Legal	Mecanismo de Reclasificación	Criterios Técnicos Clave	Estado de Implementación
Unión Europea	Mineral producido industrialmente (REACH)	End-of-Waste	4 criterios: uso específico, mercado, cumplimiento técnico, inocuidad ambiental	Industrial masivo
Alemania	Material de construcción (condicionado)	End-of-Waste + estándares nacionales	Límites muy estrictos de lixiviación (Cu: 0,055 mg/l)	Industrial con controles rigurosos
Países Bajos	Material secundario valorizable	Niveles de calidad ambiental	Nivel Objetivo + niveles de referencia diferenciados	Industrial masivo, importador neto
Japón	Subproducto industrial	Integración en cadena productiva	Pureza y calidad para uso directo	Industrial integrado
Chile	Residuo minero masivo no peligroso	NO EXISTE	NCh3894:2025 (técnico, sin efecto legal de reclasificación)	Piloto (bloqueado por barrera legal)

5.2 Descripción de las escorias de cobre generadas en Chile

5.2.1 Distribución geográfica y fundiciones operativas

En Chile operan formalmente 5 fundiciones de concentrado de cobre, se excluye ventanas dado que actualmente no está operativa. Las 6 fundiciones se distribuyeron geográficamente según se detalla en la tabla 5.2 Estas instalaciones fueron responsables de la gran mayoría de la producción formal de escoria de fundición de cobre en el país.

Tabla 5.2: Fundiciones de cobre en Chile y su distribución geográfica Fuente: CDT (2024), Corporación Alta Ley (2024).

Fundición	Empresa	Región	Estado Operativo	Capacidad (ton Cu/año)
Chuquicamata	Codelco	Antofagasta	Activa	500.000
Alto Norte	Glencore	Antofagasta	Activa	130.000
Potrerrillos	Codelco	Atacama	Activa	180.000
Caletones	Codelco	O'Higgins	Activa	360.000
Chagres	Anglo American	Valparaíso	Activa	150.000
Ventanas	Codelco	Valparaíso	Cerrada (2023)	--

Las fundiciones activas se concentraron principalmente en la zona norte del país (regiones de Antofagasta y Atacama), con presencia adicional en la zona central (O'Higgins y Valparaíso). La fundición Ventanas cesó sus operaciones en el año 2023 tras décadas de actividad.

5.2.2 Volúmenes de producción y acumulación de escorias

La producción nacional de cobre alcanzó los 5,2 millones de toneladas de cobre fino en 2023 (Consejo Minero, 2025). En 2024, esta cifra aumentó a 5,5 millones de toneladas métricas finas (Cochilco, 2024; Consejo Minero, 2025).

Por cada tonelada de cobre fino producido en fundiciones, se generaron entre 2,2 y 2,3 toneladas de escoria, dependiendo de la eficiencia del proceso y el tipo de horno empleado (Universidad Técnica Federico Santa María [USM], 2023; Reporte Minero, 2025). Este ratio está ampliamente documentado en la literatura nacional e internacional. (Shi et al., 2008; Gorai et al., 2003).

En base a lo anterior, considerando la producción de 2024, se estimó una generación de aproximadamente 11,44 millones de toneladas métricas de escoria (Consejo Minero, 2025; Sánchez, 2023). Esto sumado al stock histórico estimado de distintas fuentes de 70 millones de toneladas métricas, llegando a un total de más de 81 millones de toneladas métricas, ocupando una superficie estimada de más de 15.000 hectáreas de territorio nacional (Consejo Minero, 2025; Reporte Minero, 2025; Sánchez, 2023).

La tabla 5.3 resume los volúmenes de producción y acumulación de escoria de cobre en Chile.

Tabla 5.3: Generación y acumulación de escorias de cobre en Chile

Parámetro	Valor	Fuente
Producción nacional de cobre (2023)	5,2 millones ton/año	Consejo Minero (2025)
Producción nacional de cobre (2024)	5,5 millones ton/año	Cochilco (2024), Consejo Minero (2025)
Ratio de generación de escoria	2,2 - 2,3 ton escoria / ton Cu	La Tercera (2024), USM (2023), Reporte Minero (2025)
Generación estimada 2024	~11,44 millones ton	Consejo Minero (2025), Sánchez (2023)
Stock histórico acumulado	> 81 millones de toneladas	Consejo Minero (2025), Reporte Minero (2025)
Superficie ocupada por depósitos	> 15.000 hectáreas	Consejo Minero (2025), Sánchez (2023)

5.2.3 Flujo de las escorias de cobre en el circuito de fundición

El proceso de fundición del cobre se caracteriza por un circuito integrado donde las escorias (antes de su depósito final) no son simplemente desechos, si no que, se gestionan internamente y se reciclan de manera estratégicamente para maximizar la recuperación de cobre y minimizar las pérdidas.

El proceso comienza en el Horno Flash o Convertidor Teniente, donde se introducen los concentrados de cobre-hierro y azufre junto con los distintos fundentes (principalmente sílice) y un flujo de aire enriquecido, a temperaturas entre 25-35°C. Luego de la reacción exotérmica de la producción de dióxido de azufre dentro de los hornos las fases fundidas alcanzan los 1200-1250 °C. En este punto el concentrado líquido se separa en dos fases generando la mata de cobre o eje de cobre y la escoria primaria, la cual está compuesta por una mezcla de óxidos de hierro, sílice y magnetita (Reporte Minero, 2025). No obstante, una temperatura inadecuada impide una correcta separación de la fase rica en cobre y la escoria. Luego cuando sangra⁷ se obtiene un "revuelto", que puede contener hasta un 40% de cobre. Este material se lleva a escorial, pero se bota en un sector denominado "escoria revuelta". Este material se puede reciclar al proceso como carga fría para regular la temperatura de los convertidores Peirce Smith.

La escoria primaria se envía a los hornos de limpieza de escorias los cuales dependiendo de la fundición pueden ser hornos basculantes (HLE) y/o eléctricos (HELE). Durante esta limpieza se adiciona coque o carbón y en ocasiones sílice adicional para controlar la viscosidad y favorecer la reducción de magnetita.

⁷ Sangrar en el contexto de la pirometalurgia es vaciar o drenar el material fundido del horno

La mata de cobre o el eje obtenido se remite a convertidores Teniente o Peirce Smith, en donde se obtiene el cobre blíster con una pureza mayor al 99% y se genera una nueva escoria rica en magnetita con un contenido metálico que puede oscilar entre 6 y 15 %, por lo que estas escorias secundarias son redirigidas hacia los hornos de limpieza con el fin de maximizar la recuperación de metal fino (Díaz Fuentes, 2023). Dependiendo de las composiciones las escorias primarias y secundarias se pueden tratar en el mismo horno de limpieza o por separado. Como resultado de la limpieza se logra una separación de dos fases, una conocida con el metal blanco con un contenido de cobre de 70% aproximadamente y una escoria descartable o final con un contenido menor al 1% (Codelco Educa,2019). El proceso descrito se esquematiza en la figura 5.1.

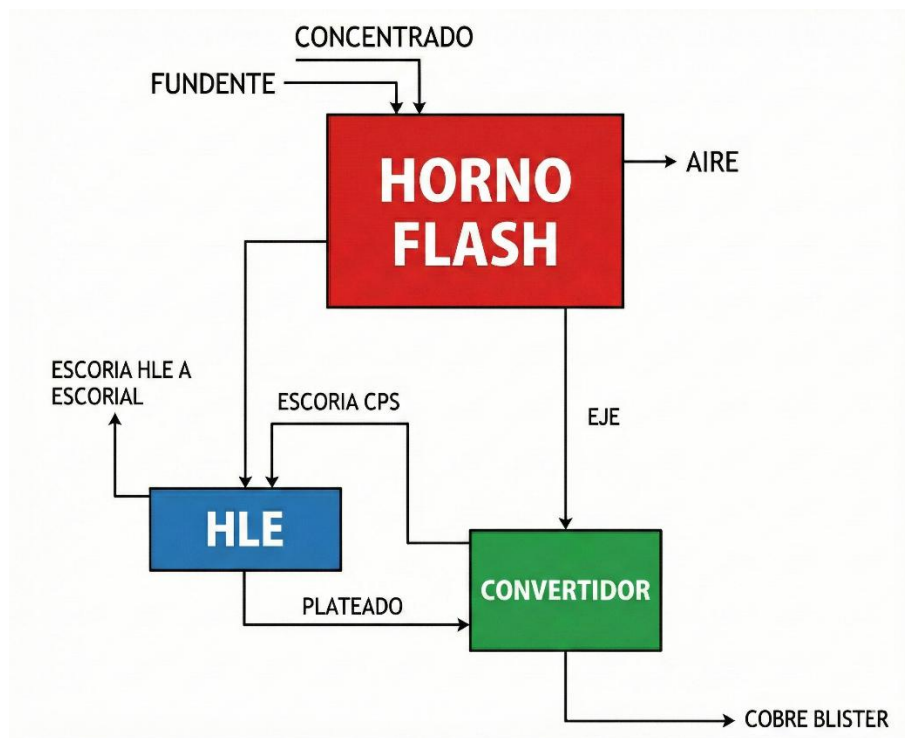


Figura 5.1: Diagrama del proceso pirometalúrgico de las escorias de cobre Fuente: Elaboración propia basada en Davenport et al. (2002).

En paralelo al tratamiento térmico, algunas fundiciones han implementado proceso de flotación de escorias. No obstante, este proceso se utilizó para tratar escorias más antiguas o de menor ley metálica (Corporación Alta Ley, 2024).

Una vez agotadas las posibilidades de recuperación de cobre, es decir la obtención de las escorias finales o mal conocidas como descartables, la escoria se vierte en zonas de acopio donde puede ser lavada y a su vez enfriada.

5.2.4 Tipos de enfriamiento y formas físicas

Existen dos métodos principales de enfriamiento para las escorias de cobre, cada uno con efectos distintos sobre las propiedades del material. El enfriamiento rápido o brusco el cual implica un choque térmico de la escoria fundida, a menudo vertiéndola en un pozo de granulación con agua, o el enfriamiento lento, el cual permite que la escoria se solidifique más gradualmente, ya sea dejando secar al aire o en grandes recipientes como ollas (MITECO, 2021).

El enfriamiento de la escoria es crucial ya que influye directamente en sus propiedades. La velocidad de solidificación determina la microestructura final del material, afectando tanto estructura interna, la textura y la distribución de fases dentro de la matriz vítrea o cristalina.

El enfriamiento lento, o también llamado controlado, se lleva a cabo en recipientes como ollas o crisoles permitiendo una solidificación progresiva de la escoria fundida. Esta tasa de enfriamiento favorece la cristalización de la matriz silicatada, permitiendo el desarrollo de fases minerales bien definidas. La estructura resultante es compacta y con mayor proporción de componentes cristalinos, lo que en simples palabras es un material con mayor tamaño de grano y textura interna menos homogénea (Hunt Recabarren, 2017).

Por el contrario, el enfriamiento brusco, generalmente efectuando mediante granulación con agua genera una solidificación casi instantánea de la escoria fundida. Esta rápida interrupción del proceso térmico impide el desarrollo de cristales, la cual da lugar a una matriz amorfa de carácter vítreo. Las partículas obtenidas presentan una textura homogénea, con escasa diferenciación mineralógica y una estructura interna desordenada. El resultado es una escoria de alta proporción vítrea sin desarrollo de fases cristalinas bien definidas (Hunt Recabarren, 2017).

El enfriamiento por aire, donde la escoria se expone al ambiente para que se enfríe de forma natural. De esta manera se generan condiciones térmicas intermedias entre las del enfriamiento lento y el brusco. El resultado estructural puede combinar características amorfas con inicios de cristalización localizada, dependiendo del gradiente térmico alcanzando en distintas zonas del volumen fundido. Este método puede dar lugar a escorias con una matriz predominante amorfa, pero con presencia de estructuras parcialmente ordenadas (Hunt Recabarren, 2017).

Las escorias de cobre pueden presentarse en diversas formas físicas dependiendo de su procesamiento post-fusión o del enfriamiento. La figura 5.2 muestra los tres tipos más comunes de escoria de cobre, con una breve descripción de sus características físicas, según su forma de enfriamiento (Corporación Alta Ley, 2024).



Figura 5.2. Tipos de escoria de cobre según su forma física y enfriamiento.
Fuente: Corporación Alta Ley (2024)

5.2.5 Caracterización de las escorias de cobre

Las escorias de fundición de cobre generadas en Chile varían en composición específica según la fuente del mineral procesado y las condiciones operativas de cada fundición. No obstante, en general comparten características generales como subproductos del proceso pirometalúrgico de sulfuros de cobre.

Nazer et al. (2016) identificaron cuatro tipos de escorias procedentes de fundiciones chilenas, y señalan que están predominantemente compuestas por óxidos de hierro (Fe_2O_3) y sílice (SiO_2), lo que las clasifica como escorias ferro-silicatadas. A partir de estas 4 escorias analizadas, se calculó un promedio de su composición química, el cual se presenta en la tabla 5.3. Por otra parte, dentro del informe creado por Wiche et al. (2024) se caracterizaron específicamente escorias provenientes de fundición Ventanas y Chagres, resultados los cuales también se incluyeron en la tabla 5.4 para efectos comparativos.

Tabla 5.4: Tabla 5.4: Promedio de composición química (% en peso) de componentes en escorias de cobre
Fuente: Adaptado de Nazer et al. (2016) y Wiche et al. (2024)

Componente	Fórmula	Promedio (%)	Ventanas (%)	Chagres (%)
Sílice	SiO_2	42,94	19,08	30,40
Óxido de hierro	Fe_2O_3	26,41	68,85	--
Óxido de calcio	CaO	15,39	2,07	1,60
Óxido de aluminio	Al_2O_3	7,43	2,59	5,60
Óxido de magnesio	MgO	1,70	0,95	0,80
Óxido de potasio	K_2O	1,26	0,55	1,20
Óxido de sodio	Na_2O	0,85	0,75	1,20
Óxido de cobre (II)	CuO	0,81	--	0,30
Pentóxido de fósforo	P_2O_5	0,64	0,06	--
Óxido de zinc	ZnO	0,67	2,26	--
Óxido de manganeso	MnO	0,60	--	--
Trióxido de azufre	SO_3	0,34	0,73	--
Dióxido de titanio	TiO_2	0,35	0,31	--
Óxido de bario	BaO	0,30	--	--
Trióxido de diarsénico	As_2O_3	0,27	--	0,09
Otros (< 0,20 %)	—	0,62	--	--

La heterogeneidad composicional observada fue significativa. Por ejemplo, el contenido de Fe_2O_3 en Ventanas (68,85%) fue notablemente superior al promedio (26,41%), mientras que su contenido de SiO_2 (19,08%) fue considerablemente inferior al promedio (42,94%). Esta variabilidad reflejó diferencias en los minerales procesados, los fundentes utilizados y las condiciones operativas específicas de cada fundición.

5.2.6 Propiedades físicas y mineralogía de las escorias de cobre

Las escorias de cobre se presentan como materiales sólidos e inorgánicos con colores que varían entre negro, marrón rojizo y gris, y con una superficie de apariencia vítrea. Las escorias granuladas muestran estructuras vesiculares, mientras que las enfriadas por aire exhiben superficies lisas y brillantes. Las partículas fracturadas revelan una geometría angular muy similar a áridos naturales (Hunt Recabarren, 2017; Totalprodinter, 2025).

La densidad de las escorias de cobre oscila entre $3,0 \text{ g/cm}^3$ y $5,0 \text{ g/cm}^3$, dependiendo de su contenido en hierro, la gravedad específica típica se sitúa entre $3,5$ y $3,8 \text{ g/cm}^3$ y en caso de escorias enfriadas por aire el rango se amplía a $2,8$ y $3,8 \text{ g/cm}^3$. La dureza de las escorias de cobre varía entre 6 y 7 Mohr (Hunt Recabarren, 2017).

La capacidad de absorción de agua de las escorias depende del método de enfriamiento en donde las escorias granuladas al ser más porosas tienen una mayor capacidad de absorción que las escorias que se enfrían por aire, pero en general la capacidad de absorción de la escoria de cobre es típicamente muy baja con un 0,13% de absorción (Hunt Recabarren, 2017).

Por último, en cuanto a la mineralogía y estructura interna, las escorias de cobre presentan composiciones variables que puede ir desde estructuras predominantes amorfas (vítreas) hasta estructuras con un cierto grado de cristalinidad. Las fases minerales mayoritarias identificadas en estas escorias incluyen fayalita, magnetita, cristobalita y clinoferrrosilita. El contenido de fase vítrea depende fuertemente del método de enfriamiento. En condiciones de enfriamiento brusco, las escorias pueden alcanzar entre un 75 % hasta un 95% de fase vítrea, mientras que, en enfriamiento lento, este valor puede disminuir hasta un 45%, lo que indica un mayor grado de cristalización en la escoria (Hunt Recabarren, 2017; Orizola Gómez, 2006).

5.3 Factores facilitadores de la valorización de escoria en Chile

5.3.1 Propiedades técnicas del material

Las escorias de cobre chilenas presentaron propiedades técnicas documentadas anteriormente en la caracterización de las escorias en la sección 5.3. En cuanto a propiedades físicas, la absorción de agua registro valores de 0,13% promedio, significativamente inferior al rango 1-5% típico de los rangos naturales (Hunt Recabarren, 2017); la dureza se situó entre 6 y 7 en la escala de Mohr, mientras que los áridos naturales presentan 5-6; la densidad varía entre $3,5$ y $3,8 \text{ g/cm}^3$, superior a los $2,6$ - $2,7 \text{ g/cm}^3$ de

áridos convencionales. El contenido de fase vítrea en escorias granuladas alcanzó entre 75% y 95% (Hunt Recabarren, 2017; Orizola Gómez, 2006).

Estas propiedades, al ser técnicas y comparativamente superiores a las de los áridos naturales, coinciden con las características aprovechadas en las aplicaciones internacionales (Capítulo 5.1) y constituyen un factor determinante para su uso en construcción, pavimentos y como material puzolánico en Chile.

5.3.2 Validación técnica mediante proyectos piloto

En Chile se ejecutaron proyectos piloto que constituyen un factor favorable para la valorización de las escorias. Estos proyectos, que se ya se mencionaron o se documentaron más a profundidad en las siguientes secciones, incluyeron aplicaciones en pavimentación, recuperación de metales y materiales cerámicos. Estas prácticas son relevantes porque validaron la viabilidad técnica de la escoria en el territorio nacional. Además, acreditan la capacidad local, donde las empresas, universidades y centros de investigación son capaces y poseen el conocimiento para implementar estos procesos. Finalmente, se confirmó la voluntad empresarial y se evidenció el interés de la industria minera por invertir recursos en desarrollo e investigación para lograr, finalmente, valorizar la escoria.

En conjunto, estos actores redujeron la incertidumbre técnica asociada a la implementación de iniciativas que ya se lograron en otros territorios y probaron que la valorización es una alternativa concreta y técnicamente viable para el país.

5.3.3 Presión ambiental sobre extracción de áridos naturales

La explotación de áridos naturales en Chile presentó problemas significativos de sostenibilidad y legalidad. Como se contextualizó en la introducción, cerca del 60% de los áridos provinieron de extracciones informales que operaron sin control ambiental (Requena, 2022).

Esta situación constituyó un factor habilitador para la valorización de escorias por tres razones:

- i. Los costos ambientales de la extracción convencional no fueron internalizados en el precio de mercado, lo que mantuvo artificialmente bajo el precio de áridos. El endurecimiento progresivo de la fiscalización y regulación ambiental aumentaría estos costos, mejorando la competitividad relativa de las escorias valorizadas.
- ii. La restricción de áreas de extracción por motivos ambientales redujo la oferta disponible de áridos naturales en ciertas regiones, generando oportunidades de mercado para materiales alternativos.
- iii. La problemática visible de la extracción ilegal creó una narrativa política favorable para la búsqueda de alternativas sostenibles, facilitando potencialmente la aceptación social y política de reformas regulatorias que habilitaran el uso de escorias como sustitutos de áridos naturales.

5.4 Factores que impiden la valorización de escoria en Chile

5.4.1 Factor regulatorio como barrera principal

Posterior a un análisis profundo y sistemático de los distintos factores que frenan a la valorización de las escorias de cobre en Chile, surgió una conclusión unánime entre expertos de la industria, la academia y el sector público; el principal obstáculo que existe para revalorizar la escoria es de carácter o naturaleza normativa, no técnica (Corporación Alta Ley, 2024). Organizaciones y centros técnicos han señalado que, comparado con algunos países de la OCDE, en Chile el problema no es tanto la imposibilidad técnica sino la ausencia de un marco jurídico y procedimientos claros que permitan la transformación de la escoria en un insumo comercializable.

5.4.1.1 Clasificación legal

El decreto supremo N°148 (Reglamento Sanitario sobre Manejo de Residuos Peligrosos) establece el marco regulatorio para los residuos en Chile. En el caso particular de la escorias metalúrgicas, son mencionadas en el artículo 23, el cual crea un régimen de excepción para los residuos mineros masivos.

En este artículo, en la letra e, indica explícitamente que las "las escorias" "no serán consideradas peligrosos" (Ministerio de Salud, 2003).

Esta clasificación por defecto como "no peligroso" las exime de la "presunción de peligrosidad" del Artículo 18. Sin embargo, el propio Artículo 23 otorga a la Autoridad Sanitaria la facultad de verificar esta condición "toda vez que lo estime oportuno", mediante un método específico: "Lixiviación por Precipitación Sintética" (Ministerio de Salud, 2003).

Es importante detenerse en esta prueba, ya que su única función es establecer si el material es peligroso o no. Es decir, permite a la autoridad verificar si la escoria mantiene su estatus de residuo no peligroso o, al no cumplir con la prueba, debe gestionarse como un residuo peligroso. En la tabla 5.5 se muestran las concentraciones máximas permisibles (CMP) de elementos químicos inorgánicos para una prueba de toxicidad por lixiviación.

Tabla 5.5: Concentraciones máximas permisibles según el DS N °148

Elemento CMP	CMP [mg/l]
Arsénico (As)	5
Cromo (Cr)	5
Plomo (Pb)	5
Mercurio (Hg)	0,2
Selenio (Se)	1
Bario (Ba)	100
Cadmio (Cd)	1
Plata (Ag)	5

El punto crítico de la normativa chilena radica en que el D.S. N°148 no contiene un procedimiento de "fin de la condición de residuo" (*end-of-waste*) equivalente al que sí existe en la Unión Europea. Vale decir, aunque una escoria cumpla con los requisitos técnicos y de seguridad, no hay en el reglamento sanitario un mecanismo claro y específico que permita considerar legalmente la escoria como un subproducto.

Este reconocimiento legal (residuo no peligroso) no es equivalente a que el material sea considerado como subproducto o materia prima, solo hace que la escoria no sea considerada peligrosa, lo que, para los efectos comerciales, no habilita la escoria con circulación libre para el mercado, ya que sigue bajo el régimen de gestión de residuos y no establece un marco claro para su valorización.

En contraste, en la Directiva Marco de Residuos de la UE (*Waste Framework Directive*) disponen criterios y mecanismos —el concepto de *end-of-waste*— por los cuales materiales recuperados dejan de ser considerados residuos cuando cumplen condiciones técnicas, ambientales y de mercado. La ausencia de un mecanismo análogo y de criterios nacionales armonizados en Chile es una de las causas prácticas por las que la escoria, aun cuando técnicamente inocua, sigue enfrentando requisitos administrativos y restricciones para su uso masivo (Unión Europea, 2008).

5.4.1.2 El efecto de la gestión de permisos

La condición administrativa de residuo se traduce, en la práctica, en una carga de permisos, trazabilidad y monitoreo que incrementa costos y plazos. Si bien estos controles son necesarios para garantizar la protección ambiental y sanitaria, la gestión de permiso actual permite entender en parte las iniciativas de valorización se han mantenido en escala de proyecto piloto. Grandes mineras (p. ej. Anglo American, Codelco) pueden absorber dichos costos en proyectos demostrativos con componentes Investigación y desarrollo, pero actores del mercado de la construcción que requieren suministros masivos y continuos encuentran el modelo inviable frente a un régimen de permisos que no diferencia adecuadamente entre residuos según su peligrosidad (CDT, 2024; Anglo American, 2024).

En conjunto, el desafío no radica en la existencia de controles per se, sino, en la ausencia de mecanismo de "fin de la condición de residuo" que permitan con demostración previa, reclasificar materiales caracterizados y estables como subproductos comercializables.

5.4.2 Heterogeneidad composicional de las escorias chilenas

Como se ha señalado en el presente documento, las escorias de fundición presentan variabilidad en su composición, que depende de diferentes factores. Esta variabilidad, si bien no constituyó una limitación técnica para el uso del material (como lo demostraron las aplicaciones internacionales con escorias igualmente heterogéneas), requirió la implementación de sistemas de control de calidad y certificación por lote de producción.

El factor técnico más sensible que justifica la cautela regulatoria es el riesgo de lixiviación, es decir, la potencial liberación de elementos contaminantes (como metales pesados) al ambiente cuando la escoria se utiliza en aplicaciones a cielo abierto o embebida en infraestructura (Pares & Álvarez, 2022). La investigación internacional sugiere que este riesgo puede mitigarse y controlarse; se ha constatado que elementos como el Cu, Fe y Zn, aunque presentes en la escoria, exhiben concentraciones prácticamente nulas en el lixiviado cuando el material se encuentra embebido en una matriz de mortero (MITECO, 2021).

5.4.3 Factores económicos y logísticos

5.4.3.1 Barreras logísticas y costos de transporte

Las barreras logísticas constituyen un impedimento económico fundamental que restringe la competitividad de la escoria a mercados dentro de un radio geográfico limitado. Se identifican cuatro factores estructurales que limitan la viabilidad económica de la valorización:

Primero, la mayor densidad de la escoria ($2,5 \text{ t/m}^3$) comparada con áridos naturales ($1,6 \text{ t/m}^3$) genera una penalización de 56% en los costos de transporte por unidad de volumen (Gorai et al., 2003). Los costos de flete representan típicamente 30-50% del precio final puesto en obra para distancias superiores a 20 km (CDT, 2024), por lo que cada kilómetro adicional incrementa desproporcionadamente el costo de la escoria frente a áridos convencionales.

Segundo, la extracción de áridos naturales ocurre en proximidad inmediata a los puntos de consumo (5-15 km): lechos de ríos, canteras periurbanas o depósitos aluviales locales. Esta ventaja estructural otorga a los áridos vírgenes una posición económica dominante. Mientras la escoria debe transportarse desde fundiciones ubicadas por criterios metalúrgicos, los áridos se extraen estratégicamente cerca de cada mercado. Estudios de competitividad determinan que materiales alternativos mantienen viabilidad económica dentro de radios de 30-50 km; más allá de este umbral, el sobrecosto de transporte los hace estructuralmente no competitivos (CDT, 2024).

Tercero, la ausencia de economías de escala impide la optimización logística. Los proyectos piloto operan con volúmenes reducidos, insuficientes para justificar infraestructura especializada: plantas de procesamiento *in-situ*, centros de acopio estratégicos, flotas dedicadas, o contratos de largo plazo con tarifas reducidas. Sin demanda continua y masiva, cada proyecto enfrenta costos marginales elevados que impiden competir con la industria consolidada de áridos naturales.

Cuarto, las limitaciones de infraestructura restringen la movilización masiva. El tránsito continuo de camiones de alto tonelaje hacia obras dispersas territorialmente enfrenta: capacidad limitada de puentes en rutas secundarias, restricciones de tráfico pesado en zonas urbanas, pavimentación deficiente en caminos rurales de acceso a obras, y ausencia de alternativas ferroviarias para transporte de áridos (CDT, 2024).

La consecuencia de estas barreras es que la escoria mantiene competitividad económica dentro de un radio limitado desde las fundiciones (aproximadamente 40-50 km según condiciones locales), pero pierde viabilidad en mercados más distantes donde los áridos naturales extraídos localmente mantienen ventaja de costos, pese a las superiores propiedades técnicas de la escoria. Cuando el costo total de la escoria supera el precio de áridos naturales locales en un mercado específico, el proyecto de valorización carece de viabilidad económica en ese segmento, independientemente de sus beneficios ambientales o desempeño técnico superior.

5.4.3.2 Costos de disposición versus valorización

Para las empresas mineras, la valorización transforma un costo operativo asociado a la disposición final en una nueva línea de ingresos a través de la venta de un subproducto con valor agregado (Reporte Minero, 2025). Sin embargo, la viabilidad económica depende de la proximidad a mercados, volumen disponible y demanda local de áridos.

Los costos de permisos, trazabilidad y monitoreo ambiental exigidos por el DS 148 pueden hacer que, en ciertos casos, sea más económico disponer en botaderos autorizados que valorizar (Centro de Estudios del Cobre y la Minería [CESCO], 2024). La gestión de permisos para cada uso específico puede generar costos administrativos y plazos que pueden extenderse por meses, mientras que la disposición controlada representa un proceso estandarizado con costos conocidos.

Esta barrera económica afecta diferencialmente según el contexto: fundiciones cercanas a mercados con alta demanda de áridos pueden absorber estos costos regulatorios, mientras que fundiciones en zonas remotas o con abundancia de áridos naturales baratos enfrentan una ecuación donde los costos de cumplimiento sumados al transporte hacen económicamente inviable la valorización (CDT, 2024; CESCO, 2024).

5.4.4 Barreras socioculturales y de percepción

5.4.4.1 Percepción Pública y "Incerteza Tóxica"

Uno de los desafíos más sutiles pero importantes para la valorización es la percepción pública. El término "residuo minero" a menudo evoca imágenes negativas y puede generar desconfianza en las comunidades, que no necesariamente distinguen entre la escoria (un material estable y vitrificado) y otros residuos como los relaves, que pueden presentar mayores riesgos ambientales si no se gestionan adecuadamente (Servicio Nacional de Geología y Minería [SERNAGEOMIN], 2018).

Esta falta de información clara puede conducir a un estado de "incerteza tóxica", una ansiedad persistente en las comunidades locales sobre los posibles riesgos para la salud y el medio ambiente (Centro de Investigación para la Gestión Integrada del Riesgo de Desastres [CIGIDEN], 2024). Esta incertidumbre prospera en la ausencia de información confiable y evidencia visible de seguridad, constituyendo una barrera social significativa para la implementación de proyectos de valorización a gran escala.

5.5 Propuesta de alternativa de reutilización sostenible y circular para las escorias de la V región

Posterior a los análisis realizados en los capítulos anteriores, donde se caracterizaron las propiedades fisicoquímicas de las escorias de la Región de Valparaíso, se revisaron aplicaciones internacionales exitosas, y se identificaron distintos factores para la valorización de escorias en Chile. El presente capítulo documenta las experiencias concretas que se han desarrollado en el país y en base a ellas, proponer una alternativa de valorización específica para la V Región.

5.5.1 Contexto y necesidad

5.5.1.1 Demanda de áridos en la industria de la construcción

La industria de la construcción en Chile presentó una demanda significativa de áridos. La demanda proyectada alcanzó los 17,1 millones de metros cúbicos anuales, de los cuales cerca del 60% provinieron de extracciones informales, evidenciando que la capacidad de producción formal fue inferior a la demanda real (Requena, 2022). Esta brecha entre la oferta formal y la demanda total genera un mercado potencial significativo para materiales alternativos como pueden ser las escorias valorizadas.

5.5.1.2 Problemática de la extracción Informal de Áridos

La extracción de áridos, aunque regulada por diversos cuerpos legales (Ley Orgánica de Municipalidades, D.L. N° 3.063, Ley N° 11.402 y DFL N° 850/DOH, Ley 19.300 y D.S. N°40/SEA, Código de Aguas), enfrenta problemas de fiscalización. Las extracciones informales operan sin control ambiental, exacerbando impactos negativos que incluyen pérdida de biodiversidad, afectación a comunidades aledañas, cambios en la morfología de los cauces que aumentan el riesgo de inundaciones y erosión de riberas (Wiche et al., 2023; Zapata Rodríguez, 2017; Arróspide et al., 2018). Ya en 2001, la Comisión Nacional de Áridos, en colaboración con el MOP, MINVU y la Cámara Chilena de la Construcción, había sistematizado antecedentes que demostraban la creciente presión sobre estos recursos y la necesidad de una gestión más robusta (Ministerio de Vivienda y Urbanismo et al., 2001).

La solución del problema planteado anteriormente estaría en vías de solución a través de un proyecto de ley en tramitación que intenta establecer procedimientos más estrictos de fiscalización, crear sanciones, trazabilidad, certificación del origen de los áridos, estableciendo un registro público de extracción a cargo de la Dirección de obras hidráulicas, y fijar planes de cierre para las faenas. La aprobación de esta normativa incrementará los costos y la carga administrativa asociada a la extracción de áridos naturales, haciendo aún más necesaria la búsqueda de alternativas sustentables.

5.5.1.3 Pasivo ambiental de escorias en la V región

En este contexto convergen dos necesidades ambientales: por un lado, reducir la extracción de áridos naturales para mitigar sus impactos ambientales y, por otro, valorizar las escorias metalúrgicas de cobre que actualmente se acumulan como pasivos ambientales. La figura 5.3 muestra el escorial de la fundación Chagres Ubicado en la V región. En general los escoriales provocan un impacto ambiental causando la erosión de pendientes, un aumento de la concentración de sulfatos en cuencas agrícolas y una alteración del paisaje natural (Wiche et al., 2023; Sánchez, 2023).



Figura 5.3: Escorial de Fundación Chagres, Catemu

La utilización de escorias como reemplazo de áridos en construcción y obras viales representa una solución de economía circular que podría abordar simultáneamente ambas problemáticas (Cámara Chilena de la Construcción, 2024).

5.5.1.4 Publicación de la norma Técnica NCh3894:2025

Un hito fundamental en el camino hacia la valorización ocurrió a finales de agosto del año 2025, cuando se publicó la Norma Chilena NCh3894:2025, titulada "Áridos artificiales en base a escorias de fundición del proceso pirometalúrgico del cobre – Clasificación, caracterización y orientaciones para su uso como

material de construcción" (Instituto Nacional de Normalización [INN], 2025). Por primera vez, Chile contó con un marco técnico oficial que estandarizó el uso de las escorias como áridos artificiales.

Esta norma fue el resultado de un esfuerzo colaborativo entre el Ministerio de Minería, el Ministerio de Obras Públicas, empresas mineras, de construcción, centros académicos y tecnológicos (Corporación Alta Ley, 2025). La norma estableció especificaciones técnicas para la utilización de escorias en morteros, hormigones, mezclas asfálticas, prefabricados y obras viales. Además, proporcionó definiciones, clasificaciones según granulometría, requisitos físicos y químicos, y orientaciones de uso para distintas aplicaciones constructivas, en línea con las mejores prácticas internacionales (INN, 2025).

La publicación de la NCh3894:2025 proporcionó la certeza técnica y la trazabilidad que el mercado de la construcción requiere, representando un avance significativo en la transición desde una lógica normativa prescriptiva hacia una normativa en donde cualquier material que cumpla con las características técnicas definidas puede ser utilizado en construcción.

5.5.2 Experiencias de valorización de escorias de cobre en Chile

A continuación, se documentan las investigaciones, proyectos piloto y aplicaciones de escorias de cobre que se han desarrollado en Chile, con especial énfasis en la Región de Valparaíso.

5.5.2.1 Negocios establecidos

Como parte de la investigación se consideró documentar también las empresas que actualmente comercian productos con escoria. La revisión identificó que el sector de abrasivos industriales presenta la comercialización más consolidada y de mayor escala, existiendo diferentes empresas que lo ofrecen al mercado, dentro de ellas la más notable y con más información disponible es MASERVI S.A. Otros usos documentados (pavimentación, hormigón) se han mantenido en escala piloto o con autorizaciones específicas caso a caso, sin constituir aún líneas comerciales establecidas

Como se citó anteriormente MASERVI S.A. es un fabricante chileno especializado en granallas minerales abrasivas derivadas de la escoria de cobre. La empresa promueve su producto como alternativa ecológica y segura, destacando que está libre de polvo y sílice (MASERVI, s.f.). MASERVI obtiene su materia prima de un escorial de la cuarta región en Ovalle, sector recoleta, escorial el cual tiene más de 200 años.

5.5.2.2 Codelco-División Ventanas

Codelco, División de Ventanas, ha declarado su intención de lograr la reclasificación legal de la escoria de cobre de "residuo" a "subproducto" (Minería Chilena, 2025). La declaración anterior se ve reflejada en distintos proyectos que se han llevado a cabo de los cuales se entregan antecedentes a continuación:

La empresa llevó a cabo un piloto de pavimentación en Puchuncaví, en la que se pavimento una plataforma de acceso para autobuses de 2.000 metros cuadrados dentro de la instalación de la División Ventanas (Mining Press, 2025). Las especificaciones técnicas del proyecto son las siguientes:

- Capa de asfalto de aproximadamente 8 centímetros de espesor
- 20% del árido natural fue sustituido por escoria de cobre (Mining Press, 2025)
- Total de 200 toneladas de escoria reutilizadas (Codelco, 2025)
- La mezcla fue sometida a análisis de propiedades químicas, mecánicas y pruebas de estabilidad ambiental (Mining Press, 2025)

El proyecto fue llevado a cabo por la empresa constructora Pavimentos Quilín. La supervisión científica fue en alianza con la Pontificia Universidad Católica de Valparaíso (PUCV) y el laboratorio de la dirección de vialidad de la región de Valparaíso del Ministerio de Obras Públicas.

Además, Codelco llevo a cabo construcción de una plazoleta, en Quintero y en Puchuncaví, donde se utilizaron materiales con escoria, se fabricaron baldosas y mobiliario urbano como bancos y maceteros (Codelco, 2025).

Mas recientemente se iniciaron proyectos piloto de pavimentación con escoria de cobre en Quintero y en Puchuncaví, iniciativa que contempla la pavimentación de 624 metros lineales, contando con 10 metros de ancho y la instalación de 1.248 metro de soleras. La base granular de esta pavimentación tendrá una preparación entre 40 y 50 % de escoria de cobre y la carpeta asfáltica de 5 cm contiene hasta un 30% del mismo material (Codelco, 2025). Asimismo, Codelco también confirma que posterior a su finalización se dará paso a mejoramiento del camino los pescadores, en donde tendrá el mismo estándar constructivo. La figura 5.4 muestra el uso de la escoria en estos proyectos.



Figura 5.4: Uso de la escoria en proyectos promovidos por Codelco
Fuente: Codelco,2025

De igual manera los proyectos fueron llevado a cargo por empresa Pavimentos Quilín, en conjunto con Codelco.

5.5.2.3 Universidad Tecnológica Metropolitana (UTEM)

Una investigación encabezada por el Dr. Marcos Díaz, de la Universidad Tecnológica Metropolitana (UTEM), en colaboración con la Universidad de Concepción, ha documentado el uso de Escoria de Fundición de Cobre como reemplazo de áridos en hormigones. En el estudio se compararon el rendimiento de las escorias de cobre con áridos reciclados de demolición, señalando que estos últimos se limitan a reemplazos del 20% al 25% para mantener la resistencia, mientras que las escorias de cobre se ensayaron hasta el 100% y el hormigón resultante superó la resistencia del hormigón con árido natural. Además, se menciona que el material puede ser utilizado directamente de los escoriales sin necesidad de una molienda intensiva. (Colegio de Constructores Civiles e Ingenieros Constructores, Septiembre 2025)

5.5.2.4 Anglo American- Fundación Chagres

Anglo American es otro actor importante que ha desarrollado proyectos de reutilización de escoria en infraestructura pública. Como se citó anteriormente en el documento, Anglo American en conjunto a la Municipalidad de Catemu, rehabilitaron un espacio público utilizando una tonelada de escoria en la construcción de maceteros (70% escoria) y losas (30% escoria) (Anglo American, 2024). En la figura 5.5 y 5.6 se puede apreciar los maceteros y las baldosas respectivamente.



Figura 5.5: Maceteros de escoria en la plaza Villa el Sol, Catemu



Figura 5.6: Baldosas de escoria en la plaza Villa el Sol, Catemu

Sumado a esto, recientemente Anglo American estableció una alianza con empresa *Profund* y el MOP/DGOP para desarrollar soluciones de pavimentación con escoria y residuos mineros (Reporte Minero, 2025; MOP, 2024).

5.5.2.5 Pontificia Universidad Católica de Chile: almacenamiento térmico

Investigadores de la UC estudiaron el uso de la escoria de cobre como medio para el almacenamiento de energía térmica. Se evaluó la posibilidad de reemplazar las sales fundidas o agua por escoria, ya que estos materiales son utilizados en los sistemas de almacenamiento térmico, no obstante, estas sustancias presentan restricciones en los niveles de temperatura de operación. Con la escoria mejoraron la distribución del calor que se almacena reduciendo hasta un 80% las pérdidas de calor al ambiente (Radio Agricultura PUCV, 2024).

5.5.2.6 Experiencias en la región de Valparaíso.

Del conjunto de entrevistas realizadas, se desprenden los testimonios de dos actores protagónicos, que permitieron profundizar en estas experiencias. Estas visiones que construyen el núcleo de este análisis corresponden a:

1. **La Perspectiva Municipal y de Implementación:** Proveniente de la máxima autoridad de la comuna de Catemu, territorio donde se desarrolló uno de los primeros proyectos piloto de uso de escoria (Proyecto Villa del Sol).
2. **La Perspectiva Académica y de Validación:** Aportada por el director de la Escuela de Ingeniería Química de la PUCV, institución que entregó la validación técnica para el proyecto de Catemu y que actualmente lidera nuevas líneas de investigación.

5.5.2.7 Entrevista con director de la Escuela de Ingeniería química de la PUCV

El Director de la Escuela comentó que el tema social es uno de los más controversiales que debieron superar al momento de llevar a cabo los distintos proyectos y agregó *"trajimos gente de comunidades a la Universidad a ver como se hacían las pruebas para que observaran los detalles de su aplicación. Cuando la gente vino vió que las cosas se estaban haciendo bien con equipo y gente dedicada se dieron cuenta que no le están vendiendo algo que no es verdad"*. En referencia a la aceptación social que tuvo el proyecto, el Director concluyó que *"los objetivos eran principalmente sociales y fueron positivos, con muy buena aceptación de comunidad"*.

Posteriormente recalcó la importancia social, ya que menciona que *"aunque la ley ha avanzado, tiene que estar la aprobación social también. No porque esté la Ley esto se va a poder aplicar automáticamente"*, haciendo referencia a la aprobación de la NCh3894:2025

Por otra parte, a la consulta sobre proyectos que está llevando a cabo la PUCV, el director comento el desarrollo de un proyecto alineado con la Facultad de Ciencias del Mar para arrecifes artificiales que controlan erosión en playas u oleajes fuertes, utilizando *tetrápods* que llevan escoria. El experto agregó que *"están quedando mucho más pesadas y es lo que se busca ya que a pesar de que son grandes, la marea igual las mueve"*.

Las muestras están siendo probadas en Quintay, Curaumilla, en una *"piscina donde meten las muestras con agua de mar"* para observar colonización de biomasa (algas, moluscos, peces) comparada con estructuras de hormigón tradicional. No obstante, comenta que *"en agua de mar cambia todo"* dado que podría generar *"condiciones de corrosión especial y reacción con fierro"*. El agua de mar con fluctuaciones de temperatura y otros iones agresivos (como yodo) podría afectar su durabilidad, por lo que *"es necesario evaluar esta situación"*.

En general señala que la adecuaciones técnicas depende del tipo de aplicación:

Con relación a la aplicación en lugares de alto transito indico que: *"La capa superficial debería ser de un material que minimice la posibilidad de que algo quede en exposición"*. Para asfaltos o baldosas de alto tránsito se debe *"darle un acabado diferente arriba para que resista más"*.

Para ello una alternativa seria *"darle un acabado con material tradicional para que la sensación y el efecto sean iguales, no se vea la diferencia, pero el grueso de la masa sea de escoria"*.

En torno a consideraciones granulométricas, el experto comentó que mediante pruebas se *"comprobó que la granulometría fina no funcionaba bien. Funcionaba la gruesa"*.

"Es la gravilla la que se reemplaza por escoria, no la arena. Hay arena, gravilla y otras cosas. La gravilla que son cositas de cuarto pulgar para arriba (1/4 pulgada) Eso funciona muy bien, pero ahí le dio problema que la arena fuera más densa".

"energéticamente llegar a arena con escoria es muy caro (...) para llegar a gravilla, tú necesitas chancarla. Que el chancado es mucho más rústico (...) energéticamente llegar a arena con escoria es muy caro".

Finalmente, el Director termina la entrevista con una idea a considerar:

"Las minas tienen la característica de que las vetas buenas se van acabando, y después hay que ir a buscar más lejos. Hay un momento en que la mina va a quedar tan lejos de la Fundición que el transporte va a ser muy caro con camiones gigantes. Entonces, transportar escoria desde un lugar más cercano, solo por el factor transporte, va a convenir económica y ambientalmente".

5.5.2.8 Proyecto Villa el sol, Catemu

El proyecto piloto en Catemu (figura 5.7) sienta un precedente en el tema. Esta iniciativa es una de las primeras iniciativas que se llevaron a cabo con escoria. Según la entrevista con el alcalde de Catemu (octubre 2025), el contacto con Anglo American se estableció en el segundo semestre de 2021 a través de la encargada del tema medioambiental de la Fundición.



Figura 5.7: Baldosas y maceteros de escoria en la plaza Villa el sol, Catemu

Anglo American comenzó a impulsar el uso de escoria como reemplazo de áridos en un proceso que data de 7 a 10 años. Según el alcalde *"pasaron más de 10 años y nunca habían conseguido la aprobación"*.

En periodo previo y en el periodo de espera la empresa realizó estudios con universidades locales y se hizo la validación con experiencias internacionales incluyendo Alemania, Nueva Zelanda y Sudáfrica.

De acuerdo con la información del entrevistado el proceso de aprobación del proyecto de escoria tomó más de 4 años desde que Anglo American comenzó las gestiones. Posteriormente se hicieron reuniones con Seremi de Salud (provincial y regional), Seremi de Medio Ambiente, Ministerio de Minería y Congreso Nacional. Finalmente se realizaron los trabajos y la plaza fue inaugurada en el primer semestre del año 2024.

El municipio aplica el material mayoritariamente en pavimentos, pero también en el hermoseamiento de lugares como plazas y otros sitios públicos.

Para Villa del Sol, Anglo American trabajó con un artesano/orfebre especializado en materiales de cemento fabricando figuras, perfiles, jardineras y bancas en la entrada.

5.5.2.9 Contexto ambiental de la comuna Catemu

Catemu enfrenta dos condiciones medioambientales complejas: saturación por Material Particulado 10 (MP10) y latencia por CO₂ relacionado con emisiones de fundición.

En cuanto a la problemática del MP10 el alcalde señaló que *"el tema del MP10 es un problema complejo"*. Salvo el casco urbano y Cerrillo, la zona rural de Catemu no tiene alcantarillado. *"Cuando no hay alcantarillado, Vialidad no me permite pavimentar, porque luego voy a tener que romper para poder poner alcantarillado"*.

La solución tradicional del municipio es aplicar anualmente una capa de "estabilizado" (mezcla de gravilla con arena y tierra). No obstante, se menciona que su duración es limitada: *"cuando baja el agua con fuerza se lleva todo el material que le da la estabilidad (la tierra) y se pierde"*. Material costoso que debe aplicarse anualmente como parte del plan de invierno. Dentro de esta pregunta el alcalde se explayó en otro tema donde identificó la extracción de áridos como un problema en la caja del río Aconcagua. Al respecto menciona *"en la parte que nosotros administramos no lo hemos permitido y cuando recibo denuncias de que hay una máquina, nosotros intervenimos de inmediato"*.

5.5.2.10 Magnitud del pasivo ambiental de la escoria

Según alcalde *"solo Anglo tenía 9 hectáreas completas de pilas de silicato y hubo que pedir ampliación de ese espacio hasta 11 a 12 hectáreas, dado que no tenían dónde seguir acumulando"*.

Adicionalmente a esto, en la entrevista realizada al Director de la Escuela de la Ingeniería Química de la Católica, advirtió lo siguiente: *"puede llegar a un futuro no muy lejano donde la planta no puede operar porque tiene que hacer una nueva declaración de impacto ambiental para poder habilitar nuevos espacios para la escoria"*.

5.5.2.11 El nuevo proyecto de la comunidad de Catemu

En relación con el problema de ser zona saturada por MP10 considera que la solución tradicional que le dio resultados y logro reducir la emisiones de MP10 en el sector centro resultó ser con un costo elevado. Por otra parte, agregó que *"mi intención siempre poder mejorar el tema de las calles con ESCORIA"*. A continuación, explica el proceso sugerido para la aplicación en las calles con escoria:

1. Aplicación de escoria gruesa en parte baja para nivelar terreno
2. Aplicación de capa de tierra sobre escoria gruesa
3. Aplicación de escoria chancada (fina) en superficie

Y describe lo siguiente: *"la escoria chancada se pone de tal forma que parece que fuera asfalto. Queda parejo, se comporta extraordinario para el agua. La absorbe completo, porque tiene la capa de tierra y tiene la otra capa que le permite siempre filtrar. No se lleva el material, se va apretando cada vez más con el uso"*. Por lo tanto, se deduce de sus palabras que la experiencia fue exitosa y requiere controles por algunos años. Donde su ejemplo es el estacionamiento del estadio de Anglo American.

No obstante, el alcalde menciona que *"la Seremi provincial inicialmente no permitía más que un uso muy marginal 1,8 toneladas, era muy poquito para el proyecto que yo necesitaba, que era mejorar todas las calles, era poquísimo, y ahí se entrampó, se trabó"*.

Posteriormente el alcalde comenta que hace un mes le aprobaron la cantidad que se requerirá para este proyecto el que contempla aproximadamente 180 toneladas de escoria para *"mejorar todas las calles de los sectores rurales que no están pavimentadas"*. Ejecución que está proyectada para noviembre de 2025. Finalmente comenta que Anglo American provee material gratuitamente y el municipio asume costos de maquinaria (moto niveladora y compactadora) y personal.

Alcalde: *"Ese va a ser el impacto más grande que va a tener el uso de escoria [el proyecto de calles rurales], porque yo no voy a poder pavimentar por lo menos 3 a 5 años más"*.

Conclusión del alcalde respecto al tema: *"Es un win-win. En efecto es inocuo, efectivamente se puede utilizar para muchas cosas"*. Considera que el uso de escoria *" es complementario en todo lo que nosotros hemos hecho para aumentar las medidas de defensa del río"*.

5.5.3 Propuesta de alternativa para la V Región

Para la realización de la presente propuesta se utilizaron los siguientes criterios.

Criterio 1: Viabilidad técnica demostrada

- Existencia de experiencias exitosas documentadas
- Cumplimiento de requisitos técnicos
- Compatibilidad con características de escorias de la V Región

Criterio 2: Seguridad ambiental validada

- Cumplimiento de límites del D.S. °148 en ensayos de lixiviación
- Comportamiento favorable en aplicaciones similares

Criterio 3: Aceptación social

- Baja controversia en experiencias previas
- Beneficios visibles para la comunidad
- Precedentes de aceptación en la región

Criterio 4: Pertinencia regional

- Respuesta a necesidades específicas de la V Región
- Contribución a problemáticas locales
- Disponibilidad de actores locales para implementación

5.5.3.1 Estrategia Seleccionada

En base en las experiencias documentadas anteriormente, tanto a nivel nacional como en la propia Región de Valparaíso, se refuerza la alternativa de valorización de escorias de cobre centrada en su uso como reemplazo de áridos naturales en aplicaciones constructivas y viales. Esta estrategia se fundamenta en:

1. La demanda insatisfecha de áridos en la industria de la construcción (17,1 millones m³ anuales, 60% extracción informal)
2. La problemática ambiental de la extracción informal de áridos
3. La magnitud del pasivo ambiental de escorias en la V Región (11-12 hectáreas solo en Anglo American)
4. El marco normativo habilitante proporcionado por la NCh3894:2025
5. Las experiencias exitosas de Codelco, Anglo American y municipalidades

6. La validación académica de la PUCV
7. El aprendizaje obtenido en la aplicación del caso Catemu

5.5.3.2 Viabilidad técnica de la alternativa utilizada

La factibilidad de utilizar escorias de cobre como reemplazo de áridos naturales se fundamenta también en sus características fisicoquímicas favorables.

Composición Químicas: Las escorias consisten principalmente en silicatos de hierro, aluminio y calcio. Las composiciones de las escorias de Fundición Ventana son: Fe_2O_3 (68,85%), SiO_2 (19,08%) y Al_2O_3 (2,59%), con otros óxidos en concentraciones menores al 3%. Estas composiciones minerales son estables y compatible con matrices cementeras.

Propiedades físicas: las escorias presentan características técnicas que en varios aspectos superan a los áridos naturales. Vale decir la densidad real seca es mayor que la de áridos convencionales, lo que puede ser ventajoso en aplicaciones que requieren mayor peso. La absorción de agua es baja, mucho menor que la de áridos naturales, lo que reduce el agua de amasado en mezclas de hormigón. (Wiche et al, 2023)

La escoria tiene propiedades mecánicas estables, resistente a incendios, a condiciones acidas y básicas, es dura y resistente, no absorbe agua, resiste heladas, tiene forma de grano adecuada y no presenta deformaciones lineales (Wiche et al, 2023).

5.5.3.3 Ensayo de lixiviación en Chile

Uno de los aspectos más críticos para la aceptación de las escorias como reemplazo de áridos naturales, es la evaluación de su comportamiento respecto su potencial de lixiviación.

En Chile se realizaron ensayos de lixiviación, particularmente en un informe de territorio circular (2023) se analizaron muestras de las escorias de Fundición Chagres utilizando el método de lixiviación TCLP (*Toxicity Characteristic Leaching Procedure*), que menciona el Decreto Supremo 148. Para este ensayo se elaboraron 5 baldosas de cemento con distintas proporciones de reemplazo de áridos por escoria, en diferentes tamaños. La tabla 5.6 muestra los porcentajes de sustitución.

Tabla 5.6: Composición química de arena y gravilla utilizados para fabricación de baldosas de concreto. Fuente: Wiche et al., 2023

	Arena		Gravilla	
	Árido	Escoria	Árido	Escoria
E1	0%	100%	0%	100%
E2	50%	50%	50%	50%
E3	50%	50%	0%	100%
E4	0%	100%	75%	25%
E5	100%	0%	0%	100%

Con los productos fabricados en las proporciones mencionadas se sometieron a la prueba TCLP con tal de obtener las concentraciones de los elementos nocivos indicados en D.S. N°148. Los resultados se ven en la Tabla 5.7.

Tabla 5.7: Porcentajes de elementos químicos nocivos (D.S. N°148) de las baldosas de concreto. Fuente: Wiche et al., 2023

Elemento	CMP [mg/L] D.S. 148	E1	E2	E3	E4	E5
Plomo	5	<0,0770	<0,0770	<0,0770	<0,0770	<0,0770
Cadmio	1	<0,0165	<0,0165	<0,0165	<0,0165	<0,0165
Cromo	5	<0,0550	0,078	0,084	0,076	0,080
Selenio	1	<0,4400	<0,4400	<0,4400	<0,4400	<0,4400
Arsénico	5	<0,4400	<0,4400	<0,4400	<0,4400	<0,4400
Plata	5	<0,0275	<0,0275	<0,0275	<0,0275	<0,0275

Las escorias demostraron que cumplen con los límites establecidos en el Decreto Supremo 148. Los metales evaluados (arsénico, bario, cadmio, cromo, mercurio, plata, plomo y selenio) presentaron concentraciones muy por debajo de los límites regulatorios chilenos.

Un hallazgo crucial documentado en estudio desarrollado por la Universidad de Concepción es que la lixiviación es significativamente diferente según el estado del material. Los áridos sueltos (aplicados en terraplenes o rellenos no confinados) presentan mayor lixiviación debido a una mayor superficie expuesta al agua y mayor contacto con agentes lixiviantes. En contraste, los áridos ligados en una matriz cementicia (hormigones, morteros, elementos prefabricados) presentan menor lixiviación, ya que la matriz de cemento encapsula las partículas, reduce la exposición al agua, y la alcalinidad del cemento estabiliza los metales. El estudio es explícito al afirmar que "En general se observa que los áridos sueltos lixivian más que los áridos dentro".

5.5.4 Balance cuantitativo de escorias vs áridos naturales para la región de Valparaíso

En los capítulos anteriores se ha documentado la viabilidad técnica de la valorización de escorias de cobre en aplicaciones de construcción y pavimentación, tanto a nivel internacional como en experiencias piloto chilenas. Sin embargo, para evaluar la factibilidad de implementar estas alternativas en la Región de Valparaíso, resulta imprescindible cuantificar tanto la disponibilidad real del material como la magnitud de la demanda regional de áridos que podría ser satisfecha mediante sustitución.

5.5.4.1 Inventario de escorias disponible en la Región de Valparaíso

La Región de Valparaíso concentra históricamente dos fundiciones de cobre que han generado volúmenes significativos de escoria: la Fundición Ventanas de Codelco y la Fundición Chagres de Anglo American.

Fundición Ventanas acumuló durante sus 60 años de operación un stock de aproximadamente 4.500.000 toneladas de escoria antes de su cierre definitivo en mayo de 2023 (Codelco, 2024) y por lo tanto no habría actualmente generación de escoria.

Fundición Chagres, por su parte, mantiene operaciones activas. Al cierre del año 2018, el depósito de escoria contenía 2.188.847 toneladas de material acumulado (Superintendencia del Medio Ambiente, 2018). Para estimar la generación de escoria en la fundición de Chagres durante el periodo 2019-2025, se aplicó el ratio de generación de 1,352 toneladas de escoria por tonelada de cobre anódico producido, ratio el cual se determinó mediante balances de masa⁸(anexo 1) basado en los parámetros entregados por Davenport et al. (2002) y validado con datos operacionales de la Fundición.

Esta ratio de generación de 1,352 toneladas de escoria por tonelada de cobre producido es inferior al rango típico reportado en la literatura de 2,2-2,4 ton escoria/ton Cu (Shi et al., 2008; Gorai et al., 2003). Esta diferencia puede atribuirse a la optimización de procesos de Fundición Chagres, que opera con leyes de concentrado superiores (0,65-0,78% Cu) comparadas con el estándar de la industria chilena (0,4% Cu para Codelco), lo que resulta en menor generación relativa de escoria por unidad de cobre producido. Además de lo anterior, Fundición Chagres prepara la alimentación de sus concentrado con un ratio Cu/S definido para un proceso autotérmico, lo que muchas veces se cumple con la presencia de pirita en el concentrado.

Utilizando los datos de producción de cobre anódico documentados en los reportes operacionales de Anglo American para el período 2019-2024 (Anglo American, 2019-2024), complementados con datos

⁸ Un balance de masa (también llamado balance de materia) es una relación cuantitativa basada en este principio de conservación, donde la masa total que entra a un sistema debe ser igual a la masa total que sale del mismo.

de producción proyectada para 2025 proporcionados mediante comunicación directa con la empresa se calculó la generación anual de escoria, datos los cuales se resumen en la tabla 5.8:

Tabla 5.8: Estimación de generación de escoria Fundición Chagres y stock acumulado desde el periodo 2018 hasta el 2025. Fuente elaboración propia a partir de Anglo American (2019-2024)

Año	Producción cobre anódico (ton)	Generación escoria estimada (ton)	Stock acumulado (ton)
2018 (base)	-	-	2.188.847
2019	118.600	160.940	2.349.787
2020	108.700	147.510	2.497.297
2021	104.800	142.214	2.639.511
2022	106.000	143.842	2.783.353
2023	108.000	146.556	2.929.909
2024	103.700	140.721	3.070.630
2025	150.000	203.550	3.274.180

De acuerdo con esta estimación, al cierre del año 2025 Fundición Chagres habría acumulado aproximadamente 3.274.180 toneladas de escoria en sus depósitos. Con la producción proyectada para 2026 de 159.000 toneladas de cobre anódico (Anglo American, 2025), la generación anual de escoria alcanzaría 215.773 toneladas anuales, equivalente a aproximadamente 216.000 toneladas anuales para efectos de cálculo. La tabla 5.9 resume el inventario de escorias de la V Región:

Tabla 5.9: Inventario de escorias de cobre disponibles en la Región de Valparaíso. Fuente elaboración propia a partir de (Anglo American, 2019-2024) y (Codelco, 2024).

Fundición	Ubicación	Stock acumulado 2025 (toneladas)	Stock acumulado (m³)	Generación anual 2026 (ton/año)
Ventanas (Codelco)	Puchuncaví	4.500.000	1.285.714	0
Chagres (Anglo American)	Catemu	3.274.000	935.430	215.773
TOTAL, REGIONAL		7.774.000	2.221.142	~216.000

Conversión utilizando densidad aparente promedio de 3,5 t/m³ (Gorai et al., 2003; Shi et al., 2008)

Este inventario total de 7,77 millones de toneladas de stock acumulado, complementado con una generación anual continua de 216.000 toneladas, constituye la oferta máxima disponible para programas de valorización en la región.

5.5.4.2 Cuantificación de la demanda regional de áridos

De acuerdo con el análisis territorial del consumo de áridos en Chile (2024) realizado por el Centro de Políticas Públicas de la Pontificia Universidad Católica de Chile, la región de Valparaíso se posiciona como la segunda zona de mayor consumo a nivel nacional. Específicamente, los datos indican que la región demanda un volumen aproximado de 5,7 millones de metros cúbicos m^3 anuales de áridos (Navarrete & Vargas, 2024). Esta cifra se contrasta también con las estimaciones basadas en la actividad económica regional, las cuales relacionan la necesidad de materiales de construcción con el Producto Interno Bruto (PIB) (Navarrete & Vargas, 2024). Bajo esta metodología, la demanda estimada para la región desciende a 4,7 millones de m^3 anuales.

En consecuencia, y con el objetivo de trabajar con un escenario representativo, para los cálculos del presente estudio se utilizó un punto medio entre estos dos valores, lo que establece una demanda base regional de 5,2 millones de m^3 anuales.

No obstante, esta cifra representa la demanda total de áridos para todos los usos constructivos. Para evaluar el potencial de sustitución por escoria, resulta necesario desagregar la demanda por tipo de aplicación, identificando aquellas en las que la sustitución es técnicamente viable según la evidencia documentada en capítulos anteriores.

5.5.4.2.1 Demanda específica por tipo de aplicación

Para determinar la distribución de este volumen, se aplicaron % de desglose de uso a nivel nacional reportados según Navarrete y Vargas (2024), el uso de los áridos se distribuye principalmente en hormigones (46%), rellenos (40%), bases y subbases (10%), pavimentos asfálticos (4%) y carpetas de rodado (<1%).

5.5.4.2.2 Rellenos y terraplenes

Este segmento constituye una de las principales aplicaciones de los áridos en la región, abarcando un 40% del consumo total, lo que equivale a una demanda base de 2.080.000 m^3 anuales. Debido a que las especificaciones técnicas para rellenos son menos restrictivas que para elementos estructurales, la literatura indica que los áridos pueden ser reemplazados por escoria por "volúmenes importantes" sin afectar su desempeño mecánico (Navarrete & Vargas, 2024).

Para este caso considerando la menor exigencia se proyecta una tasa de sustitución del 50%. En donde genera un mercado potencial para la escoria de 1.040.000 m^3 anuales.

5.5.4.2.3 Pavimentación y capas estructurales

Esta categoría agrupa las aplicaciones de ingeniería vial de mayor especificaciones, las cuales suman un 14% de la demanda total. En términos de volumen esto representa una demanda de 728.000 m^3 de áridos.

Aplicando % de sustituciones validados técnicamente en secciones anteriores se obtiene el siguiente potencial de valorización:

- Bases y subbases: Sobre una demanda de 520.000 m³ (10% mercado) y aplicando una sustitución técnica del 40 %, es factible incorporar 208.000 m³ anuales de escoria.
- Mezclas asfálticas: Sobre una demanda de 208.000 m³ (4% del mercado), y con una sustitución del 20%, se puede incorporar 41.600 m³ anuales.

Sumando ambas aplicaciones, ofrecen la posibilidad de reemplazar 249.600 m³ anuales de áridos por escoria.

5.5.4.2.4 Hormigón y prefabricados

La confección de hormigón es la actividad individual de mayor consumo de áridos a nivel nacional. Según los antecedentes técnicos, este sector demanda el 46% del total de áridos, lo que en la Región de Valparaíso se traduce en un requerimiento anual de 2.392.000 m³.

Diversas investigaciones (Shi et al., 2008) han validado el uso de escoria como reemplazo del árido grueso en hormigones estructurales. Planteando un escenario de adopción gradual con una sustitución promedio del 30%, se estima que este sector posee la capacidad de absorber 717.600 m³ anuales de escoria de cobre.

La tabla 5.10 resume el porcentaje estimado en que los áridos pueden ser reemplazados por escoria en aplicaciones de la quinta región.

Tabla 5.10: Estimación de demanda regional de escoria según aplicación y porcentaje de sustitución. Fuente: Demanda total de áridos según Navarrete y Vargas (2024). Porcentajes de sustitución basados en evidencia técnica documentada en secciones anteriores.

Aplicación	Demanda Total de Áridos (m ³ /año)	% Sustitución Estimado	Potencial de Escoria (m ³ /año)
1. Rellenos y Terraplenes	2.080.000	50%	1.040.000
2. Pavimentación y Vialidad	728.000	Variable (20-40%)	249.600
3. Hormigón y Prefabricados	2.392.000	30%	717.600
TOTAL ESTIMADO	5.200.000	-	2.007.200

5.5.4.3 Balance oferta-demanda

La evaluación definitiva respecto a la suficiente existencia de escoria para satisfacer la demanda regional de sustitución requiere contrastar la oferta disponible (stock acumulado más generación continua) con la demanda anual estimada de áridos susceptibles de ser reemplazados por escoria.

Oferta disponible:

- Stock acumulado de escoria al 2025: 7.774.000 toneladas
- Generación anual de escoria en la Fundición Chagres: 216.000 ton/año
- Oferta total: 7,77 millones ton + 216.000 ton/año

Demanda regional:

El potencial de sustitución técnicamente viable alcanza 2.007.200 m³ anuales, equivalente a 7.025.200 toneladas anuales (considerando densidad escoria 3,5 t/m³)

La demanda potencial de sustitución (7 millones ton/año) supera 32 veces la generación anual de Chagres (216.000 ton/año). El stock acumulado de 7,77 millones de toneladas se agotaría en menos de 2 años en el caso que se comenzara a utilizar en todos los proyectos disponibles. No obstante, este escenario teórico es probable que no se cumpla dado que la implementación de nuevos materiales en el rubro de la construcción no es inmediata. Por consiguiente, el resultado más relevante de este balance no es el tiempo de agotamiento teórico, sino la determinación de la Cuota de Mercado de Equilibrio. Al contrastar la generación anual de la fundición Chagres (216.000 ton) con la demanda potencial total (7.025.200 ton) de la cual se estima que Chagres produciría solamente el 3.1 % de escoria.

5.5.5 Cuantificación del impacto de sustitución en el proyecto Quintero-Puchuncaví

La sección anterior estimó la demanda regional agregada en términos anuales. Para cuantificar el impacto real de la sustitución, se compara el consumo de materiales de un diseño tradicional versus el diseño propuesto con escoria de cobre. Se utiliza como ejemplo, el ahorro de áridos naturales en el proyecto de mejoramiento vial Quintero-Puchuncaví que actualmente está en ejecución. Los siguientes cálculos se basan en especificaciones técnicas del proyecto descrito por Codelco (Codelco, 2025).

El proyecto de mejoramiento vial Quintero-Puchuncaví contempla 624 m lineales con 10 m de ancho y 15 cm de grosor (Codelco, 2025). La estructura de pavimento sigue las especificaciones técnicas del Manual de carreteras del MOP (Ministerio de Obras Públicas, 2024) e incluye lo siguiente:

Capa de base granular:

- Dimensiones: 624 m × 10 m × 0,15 m = 936 m³
- Densidad de base granular: 2,2 t/m³

- Consumo total áridos base: $936 \text{ m}^3 \times 2,2 \text{ t/m}^3 = 2.059$ toneladas

Carpeta asfáltica:

- Dimensiones: $624 \text{ m} \times 10 \text{ m} \times 0,05 \text{ m} = 312 \text{ m}^3$
- Densidad mezcla asfáltica: $2,4 \text{ t/m}^3$
- Consumo total mezcla asfáltica: $312 \text{ m}^3 \times 2,4 \text{ t/m}^3 = 749$ toneladas

Consumo total diseño tradicional: $2.059 \text{ ton (base)} + 749 \text{ ton (carpeta)} = 2.808$ toneladas de áridos naturales

Aplicando los porcentajes de sustitución documentados en el proyecto realizado por Codelco y Pavimentos Quilin (Codelco, 2025) (40% en base granular y 30% en carpeta asfáltica) y considerando que la mezcla resultante tiene una densidad ponderada superior debido a la mayor densidad de la escoria ($3,5 \text{ t/m}^3$), se estimó la cantidad de escoria utiliza y la cantidad de áridos utilizados:

Capa de base granular con 40% de sustitución:

- Volumen total: 936 m^3
- Densidad ponderada de la mezcla (60% áridos $2,20 \text{ t/m}^3$ + 40% escoria $3,5 \text{ t/m}^3$): $2,46 \text{ t/m}^3$
- Consumo total base con sustitución: $936 \text{ m}^3 \times 2,46 \text{ t/m}^3 = 2.303$ toneladas
- Escoria (40%): $936 \text{ m}^3 \times 0,40 \times 3,5 \text{ t/m}^3 = 1.310$ toneladas
- Áridos naturales (60%): $936 \text{ m}^3 \times 0,60 \times 2,20 \text{ t/m}^3 = 1.236$ toneladas

Carpeta asfáltica con 30% de sustitución:

- Volumen total: 312 m^3
- Densidad ponderada de la mezcla (70% mezcla $2,40 \text{ t/m}^3$ + 30% escoria $3,5 \text{ t/m}^3$): $2,60 \text{ t/m}^3$
- Consumo total carpeta con sustitución: $312 \text{ m}^3 \times 2,60 \text{ t/m}^3 = 811$ toneladas
- Escoria (30%): $312 \text{ m}^3 \times 0,30 \times 3,5 \text{ t/m}^3 = 328$ toneladas
- Mezcla asfáltica con áridos naturales (70%): $312 \text{ m}^3 \times 0,70 \times 2,40 \text{ t/m}^3 = 524$ toneladas

Consumo total diseño con escoria:

Escoria de cobre: $1.310 \text{ ton (base)} + 328 \text{ ton (carpeta)} = 1.638$ toneladas

Áridos naturales: $1.236 \text{ ton (base)} + 524 \text{ ton (carpeta)} = 1.760$ toneladas

Total, materiales: 3.114 toneladas

La tabla 5.11 resume y compara el material utilizado en el proyecto del proyecto Quintero-Puchuncavi

Tabla 5.11: Comparación consumo de materiales Proyecto Quintero-Puchuncaví en ejecución.

Diseño	Áridos naturales (ton)	Escoria de cobre (ton)	Total materiales (ton)
Tradicional	2.808	0	2.808
Con sustitución (40%/30%)	1.760	1.638	3.114
Ahorros áridos	-1.048 ton	+1.638 ton	+306 ton*

El incremento en masa total (306 ton, equivalente a 10,9%) se debe a la mayor densidad de la escoria (3,5 t/m³) comparada con áridos naturales (2,7 t/m³), aunque el volumen final de pavimento no varía.

Esto se traduce en que el proyecto evitaría la extracción de 1.048 toneladas de áridos naturales, equivalente a una reducción del 37,3% en la demanda de áridos vírgenes para esta obra específica.

5.5.6 Análisis económico-logístico: el factor densidad y radio de competitividad

La escoria de cobre presenta una densidad aparente de 3,5 t/m³, significativamente superior a la densidad de áridos naturales de 2,7 t/m³. Esta diferencia implica que, para transportar el mismo volumen de material, se requiere movilizar 30% más masa en el caso de la escoria. Este % se obtuvo en base al cálculo de ratio de densidades:

Ratio de densidades: $3,5 / 2,7 = 1,30$ → penalización de 30% en peso

Dado que el costo de transporte de materiales granulares se valora principalmente por tonelada-kilómetro, y que representa típicamente el 30-50% del costo final del árido puesto en obra para distancias superiores a 20 km (Corporación de Desarrollo Tecnológico, 2025), esta penalización volumétrica afecta directamente la competitividad económica de la escoria conforme aumenta la distancia de transporte.

5.5.6.1 Radio de competitividad económica

El Análisis de Ciclo de Vida realizado por SOFOFA Hub en 2023, determinó que el reemplazo de áridos naturales por escoria en terraplenes reduce impactos ambientales entre 50% y 89% cuando el transporte es de corta distancia (Granato et al., 2023), pero esta ventaja se ve disminuida conforme aumenta el radio de transporte.

Basándose en estudios de competitividad de áridos reciclados en Chile (CDT, 2024) y experiencias internacionales de valorización de escorias (Shi et al., 2008), se pueden establecer los siguientes radios de competitividad para la escoria de cobre en la Región de Valparaíso:

- Radio altamente competitivo (0-30 km): La escoria resulta económicamente competitiva con áridos naturales, especialmente considerando la crisis de abastecimiento legal en cuencas fluviales. Incluye Valparaíso, Viña del Mar, Concón, Quintero, Puchuncaví (desde Ventanas) y Catemu, Llay-Llay (desde Chagres).
- Radio moderadamente competitivo (30-50 km): La escoria mantiene competitividad en proyectos de infraestructura pública donde se pueden valorizar externalidades ambientales positivas (reducción de extracción en cauces, menor huella de carbono). Incluye Quillota, La Calera, Limache.
- Radio no competitivo (>50-60 km): El sobre costo de transporte por mayor densidad hace que la escoria pierda competitividad frente a fuentes locales de áridos naturales, salvo en proyectos con incentivos específicos o valorización de atributos técnicos superiores. Fuera de este radio quedan San Felipe, Los Andes, Petorca.

6 DISCUSIÓN

La revisión de la literatura internacional demostró que la valorización de escorias metalúrgicas en general no constituye una innovación tecnológica experimental, sino por el contrario una realidad industrial con décadas de operación exitosa en economías avanzadas. Las aplicaciones documentadas en Europa, Estados Unidos y China, donde sustituyen hasta el 80% de áridos naturales por escoria en hormigones sin comprometer las propiedades mecánicas, evidenciaron que existen formas claras y no tan complicadas de valorizar este material. En el caso de China se resuelve juntando las industrias del cemento con las fundiciones.

Sin embargo, el análisis comparativo de marcos regulatorios internacionales reveló también que posiblemente el éxito en otros países no se debe solo a mejores tecnologías, sino a la legislación que permitió reclasificar a las escorias como productos comercializables. Así por ejemplo el concepto de End-of-Waste de la directiva marco de residuos europea se basa en cuatro criterios, que dan un claro marco que proporciona una certeza jurídica que permite clasificar la escoria directamente como mineral producido industrialmente.

De acuerdo con la información bibliográfica revisada se confirma que las escorias generadas en Chile no solo poseen propiedades para ser utilizadas, sino que en varios parámetros supera a las escorias valorizadas en países con marcos reguladores habilitadores. Así por ejemplo la absorción de agua de 0,13% es mucho menor que el rango de un árido natural (1 a 5% de absorción de agua) factor que explica el mejor desempeño de hormigones con escorias. La dureza de 6 a 7 en escala de Mohr es superior al rango de árido convencional. Lo que correlaciona directamente con mayor resistencia a abrasión en pavimentos de alto tráfico. Sin embargo, esta dureza puede presentar problemas en valorizaciones que requiera que la escoria esté en menor tamaño, representando un gasto energético mayor. Por otra parte, la alta proporción de fase vítrea en escorias granuladas, resultado del enfriamiento brusco, habilitó la actividad puzolánica permitiendo la sustitución parcial de otros componentes en el cemento *Portland*. La coincidencia entre propiedades requeridas para aplicaciones exitosas internacionales y propiedades presentes en material chileno sugiere que la implementación podría ser técnicamente viable, sin necesidad de adaptaciones sustanciales.

La generación anual de escorias a nivel nacional equivale al consumo de áridos de una región completa, y el stock acumulado de más de 81 millones de toneladas ocupa más de 15.000 hectáreas de territorio. Esta escala convirtió la valorización en un desafío estratégico nacional, no solo como un problema técnico de fundiciones individuales.

Las distancias entre los lugares donde se almacena la escoria y los puntos en donde se va a dar uso a la escoria determina que las estrategias de valorización deben diferenciarse regionalmente. A manera de ejemplo se puede señalar que las fundiciones Chuquicamata y Alto Norte se ubicaron a 1.400 km de Santiago, mientras Caletones y Chagres se situaron a menos de 150 km del principal mercado de consumo. De esta manera se podría inferir que las fundiciones cercanas a la capital podrían abastecer

el mercado de construcción metropolitano mientras las del norte requieren desarrollar una demanda local.

La heterogeneidad de la composición identificada entre fundiciones, con variaciones significativas en contenido de óxido de hierro que osciló entre 19% y 69% y sílice entre 19% y 43%, planteó inicialmente una barrera técnica. Sin embargo, la comparación con la normativa internacional de áridos naturales reveló que estos también presentan una variabilidad composicional significativa según su origen geológico y fueron regulados de manera exitosa. Se agrega a lo anterior que la norma europea no especificó porcentajes exactos de sílice o calcio sino requisitos de resistencia mecánica, durabilidad y lixiviación, lo que demuestra que la heterogeneidad composicional probablemente no constituyó impedimento técnico insuperable, sino que una característica manejable mediante sistemas de certificación. La brecha crítica identificada no es la variabilidad del material, sino la ausencia de marcos nacionales claros que estandaricen estas propiedades. La publicación de NCh3894:2025 valida esta interpretación. La norma mencionada establece especificaciones mediante requisitos de desempeño (resistencia, durabilidad, lixiviación) independientemente de porcentajes composicionales exactos, incorporando la heterogeneidad mediante rangos de tolerancia. Este enfoque replica el modelo aplicado a áridos naturales geológicamente diversos. El hecho de que la normalización fuera posible sin exigir composiciones uniformes confirma que la barrera histórica no fue técnica sino regulatoria por tanto faltaba el marco que permitiera estandarizar la variabilidad mediante criterios funcionales.

El análisis de factores habilitadores e impeditivos reveló una situación que cuestiona el peso real de cada categoría de factores. Los elementos habilitadores identificados —propiedades técnicas superiores documentadas, magnitud del recurso que fundamenta inversiones en investigación y desarrollo, proyectos piloto exitosos y aceptación social cuando la comunicación fue apropiada— estuvieron presentes durante años sin generar avance industrial. Como evidenció el testimonio del alcalde de Catemu, estos proyectos llevaban años sin tener luz verde exclusivamente por temas legales, a pesar de contar con respaldo técnico y viabilidad económica demostrada. La publicación de NCh3894:2025 en agosto de 2025 generó un cambio inmediato que años de acumulación de factores habilitadores no lograron producir, habilitando inmediatamente la aprobación de 180 toneladas para pavimentación de calles rurales tras más de 10 años de gestiones. El modelo de colaboración validado —empresa provee material, universidad certifica y municipalidad implementa— demostró que cuando convergen validaciones técnicas (PUCV), voluntad política local y compromiso empresarial, la aceptación social es alcanzable mediante una comunicación transparente. De esta manera, a invitación a la comunidad para observar ensayos en laboratorio transformó desconfianza en aceptación informada.

La promulgación de la norma destrabó proyectos que estaban pendientes lo cual demostró que la carencia de la normativa era el factor que impedía la ejecución de los proyectos. Sin embargo, la escalabilidad requiere superar una limitación estructural de los proyectos municipales documentados dado que la cantidad de escoria utilizada son cantidades mínimas en comparación a la generación anual a nivel nacional de escoria que son del orden de 11,44 millones de toneladas.

Por otra parte, el balance cuantitativo desarrollado para la Región de Valparaíso invierte radicalmente la premisa anterior. Es así como la demanda potencial regional de sustitución de áridos por escoria (7 millones de toneladas anuales de escoria) excede en más de 30 veces la generación disponible (216.000 ton/año de escoria). Esta relación contradice la narrativa que ha caracterizado el debate " existe un gran pasivo sin valorizar lo cual es necesario realizar" El stock acumulado de 7,77 millones de toneladas, lejos de representar un excedente permanente, se agotaría en poco menos de 2 año bajo una adopción masiva. La restricción no es ausencia de compradores, sino impedimento regulatorio de acceso a un mercado que existe y demanda activamente el material.

En el punto de equilibrio sostenible —donde la generación anual de escoria en la quinta región iguala es igual al consumo del mercado— sería posible ejecutar aproximadamente 132 proyectos anuales de la magnitud documentada en el caso Quintero-Puchuncaví (1.638 toneladas cada uno). Esta capacidad contrasta con los proyectos implementados históricamente mencionados anteriormente. La diferencia de dos órdenes de magnitud entre capacidad potencial (132 proyectos/año) y ejecución real (1-2 proyectos excepcionales) evidencia que la limitante no radica en disponibilidad material ni en capacidad de absorción del mercado. La restricción es el modelo administrativo que trata cada proyecto como caso excepcional sujeto a autorizaciones específicas del Ministerio de Salud, proceso que puede extenderse durante administraciones completas.

La norma técnica NCh3894:2025 eliminó la barrera de incertidumbre técnica al postular escorias como áridos artificiales con especificaciones estandarizadas, habilitando proyectos en pavimentación, hormigones y obras viales que permanecieron bloqueados durante años. Sin embargo, como norma de carácter general (y voluntaria) no define requisitos específicos para aplicaciones particulares, requiriendo desarrollo de normas complementarias. Además, el Decreto Supremo 148 no incorpora mecanismo formal de fin de condición de residuo, por lo que materiales que cumplen criterios técnicos no cesan definitivamente su clasificación administrativa como residuo.

Las evidencias obtenidas estarían revelando que la valorización de los pasivos mineros trasciende el ámbito técnico-sectorial y se podría considerar como un desafío de política pública. La complejidad del problema se constata en las acciones requeridas para la implementación de estrategias de valorización, las cuales involucran una coordinación del estado. La creación de instancias interministeriales, la gestión de expedientes ante la autoridad sanitaria para la recalificación de materiales y la gestión de convenio entre el sector minero, empresas constructoras y entidades de infraestructura pública, son acciones que demuestran que la gestión de la valorización supera la capacidad y las competencias de un solo sector.

Una visión comparativa internacional con la realidad chilena proporciona una perspectiva reveladora. Chile ha generado evidencia técnica de calidad comparable a la que sustentó marcos como *End-of-Waste* en Europa y Asia como, por ejemplo: ensayos de desempeño en pavimentos (MOP-Anglo American), caracterización fisicoquímica (PUCV), validación en hormigones y certificaciones ambientales (lixiviación TCLP). Estas acciones permanecieron en escala pre-comercial (exceptuando la venta de abrasivos). La experiencia europea demuestra que la reclasificación legal no requirió

necesariamente más evidencia técnica que la ya disponible en Chile, sino una decisión política de habilitar el mercado mediante marcos regulatorios apropiados. Chile estuvo por varios años esperando que la acumulación de evidencia forzara el cambio regulatorio. Mientras países con marcos *End-of-Waste* consolidados operan mercados donde la valorización de escorias representa entre 30% y 80% del consumo de ciertos tipos de áridos (Shi et al., 2008; Phiri et al., 2022), Chile mantiene millones de toneladas anuales de demanda potencial sin acceso al material mientras deposita volúmenes equivalentes como pasivo ambiental. La reciente normativa técnica representa el primer paso en la secuencia correcta, pero requiere complementarse con una posible modificación del DS 148 para incorporar formalmente el fin de condición de residuo.

Lo anteriormente mencionado configura un ecosistema preparado para la transición industrial de la escoria. La paradoja económica en que la disposición resulta más barata que la valorización, contrastada con un comercio constante de abrasivos sin restricciones, demuestra que la barrera no es relativa al material. La presión sobre las cuencas en contraste con la aprobación del material revela que la contradicción establecida responde a factores político-económicos de intereses establecidos. El país enfrentó una diferencia entre un marco legal diseñado para clasificar grados de peligrosidad de residuos y una realidad donde materiales estables demostraron competir de manera exitosa cuando la habilitación legal lo permitió.

La propuesta específica para la Región de Valparaíso se fundamenta en una convergencia territorial única que no se replica en otras zonas mineras del país. El análisis económico-logístico determinó que la mayor densidad de la escoria (3,5 t/m³ versus 2,2 t/m³) limita la competitividad a un radio de 40-50 km. Sin embargo, el 70% de la población regional y el 75% de la actividad constructiva se concentran dentro de este radio desde Chagres o ex-Ventanas, configurando un mercado cautivo natural. Esta condición contrasta radicalmente con las fundiciones del norte mencionadas anteriormente, donde el sobre costo logístico anula la viabilidad económica frente a áridos locales. Valparaíso es el único territorio chileno donde convergen simultáneamente: (a) generación significativa de escoria, (b) mercado masivo dentro del radio competitivo, (c) crisis estructural de abastecimiento con 60% de extracción informal documentada, y (d) infraestructura cementera intermedia que habilita economía circular. Esta especificidad territorial explica por qué una solución viable en Valparaíso no es directamente extrapolable a otras regiones mineras. La saturación de almacenamiento documentada —Anglo American alcanzó 11-12 hectáreas requiriendo ampliación— agrega presión operacional independiente de la rentabilidad del material como producto.

Lo expuesto anteriormente evidencia la necesidad de que el país promueva una colaboración más estrecha y un intercambio de información efectivo entre las entidades gubernamentales y las instituciones de educación superior. Esta sinergia es crucial para agilizar la toma de decisiones conjuntas y alinear las problemáticas a resolver. De este modo, se facilita la transformación de dichos problemas en avances significativos, asegurando al mismo tiempo la protección de ecosistemas naturales, muchos de los cuales son únicos en el mundo.

7 CONCLUSIONES

La revisión de literatura internacional demostró que la valorización de escorias metalúrgicas constituye una realidad industrial consolidada en economías avanzadas, no una innovación experimental. Europa, Estados Unidos y China documentan aplicaciones donde sustituyen hasta 80% de áridos naturales por escoria en hormigones sin comprometer propiedades mecánicas. El análisis comparativo de marcos regulatorios reveló que el éxito internacional no se explica por tecnologías superiores sino por decisiones políticas de reclasificación legal mediante mecanismos de fin de residuo.

Se caracterizaron técnicamente las escorias chilenas confirmando propiedades superiores en parámetros como la absorción de agua, dureza y actividad puzolánica. La producción nacional de escoria alcanza 11,44 millones de toneladas anuales, con un stock acumulado de 81 millones de toneladas distribuido en más de 15.000 hectáreas. Por otra parte, dependiendo del lugar geográfico en que se genere la escoria se manifiestan diferencias: mientras fundiciones del norte enfrentan distancias prohibitivas hacia mercados principales, las fundiciones de zona central presentan ventajas logísticas únicas por su proximidad al mercado metropolitano.

Se identificaron los factores facilitadores para revalorizar la escoria, incluyendo entre ellos propiedades técnicas documentadas, demanda insatisfecha de mercado, proyectos piloto exitosos y aceptación social, todo esto contrastando con el único factor que impide su aplicación: el factor normativo. La publicación de la norma NCh3894:2025 generó cambios que por años no se habían logrado abriendo la posibilidad a proyectos que ya estaban formulados.

El balance cuantitativo oferta-demanda desarrollado para la Región de Valparaíso fundamenta la propuesta mediante evidencia territorial específica. La demanda potencial regional alcanza 7 millones de toneladas anuales, mientras que la generación disponible es de apenas 216.000 toneladas por año, es decir, la demanda excede en más de 30 veces la oferta. Este hallazgo invierte la percepción histórica: no existe un excedente de escoria sin compradores, sino un mercado masivo sin acceso al material debido a restricciones regulatorias. El análisis determinó además que el 70% de la población regional y el 75% de la actividad constructiva se concentran dentro del radio de competitividad económica desde las fundiciones, configurando un mercado cautivo natural que no existe en otras regiones mineras del país. Esta convergencia territorial única posiciona a Valparaíso como el territorio chileno donde las condiciones permiten transición industrial inmediata.

El presente trabajo detectó las principales razones por las cuales Chile siendo uno de los productores mundiales de cobre que genera millones de toneladas anuales de escorias, ha depositado durante décadas un recurso útil transformándolo en un pasivo ambiental en lugar de valorizarlo industrialmente. El diagnóstico reveló que la barrera fundamental no reside en limitaciones técnicas o en ausencia de mercado ni rechazo social, sino en una restricción regulatoria que muestra una ausencia de un marco legal que permita valorizarla adecuadamente. Recién en 2025, la publicación de la norma NCh3894:2025 representó un primer paso al establecer especificaciones claras para uso de escorias

como áridos artificiales, destrabando proyectos que llevaban años en espera. A pesar de este desafío, Chile tiene una gran oportunidad: emplear las escorias provenientes de las fundiciones de cobre como árido artificial. El avance logrado después de años de estancamiento no debe interpretarse como una solución al problema, sino como el inicio de una transición. Este logro de uso de la escoria no solo permite la utilización de un recurso, sino que además impide en parte el proceso de degradación de las cuencas facilitando el equilibrio natural de estos ecosistemas.

8 BIBLIOGRAFÍA

- Al-Jabri, K. S., Hisada, M., Al-Oraimi, S. K., & Al-Saidy, A. H. (2009). *Copper slag as sand replacement for high performance concrete*. *Cement and Concrete Composites*, 31(7), 483–488. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2009.04.007>
- Anglo American. (2019-2025). Reportes operacionales trimestrales. <https://www.angloamerican.com/investors/annual-reporting/quarterly-production-reports>
- Anglo American. (2024, 26 de junio). *Inédito proyecto: Espacio público construido con escorias de cobre*. <https://chile.angloamerican.com/es-es/medios/noticias/pr-2024/2024-06-26>
- Arróspide, F., Mao, L., & Escauriaza, C. (2018). *Morphological evolution of the Maipo River in central Chile: Influence of instream gravel mining*. *Geomorphology*, 306, 182–197. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2018.01.019>
- Banco Mundial. (2020). *Minerals for Climate Action: The Mineral Intensity of the Clean Energy Transition*. <https://www.worldbank.org/en/topic/extractiveindustries/brief/climate-smart-mining-minerals-for-climate-action>
- Biblioteca del Congreso Nacional de Chile. (1994). *Ley 19.300 sobre Bases Generales del Medio Ambiente*. <https://www.bcn.cl/leychile/navegar?idNorma=30667>
- Cámara Chilena de la Construcción. (2024, noviembre). *Proyecciones 2025*. <https://www.ccs.cl/wp-content/uploads/2024/11/Proyecciones2025-CChC-compressed.pdf>
- Cámara Chilena de la Construcción. (2025). *Índice de despacho de cemento*. <https://cchc.cl/indicadores>
- Centro de Estudios del Cobre y la Minería. (2024). *Expertos coinciden en la importancia de clasificar a las escorias como subproducto minero*. <https://cesco.cl/expertos-coinciden-en-la-importancia-de-clasificar-a-las-escorias-como-subproducto-minero/>
- Centro de Investigación para la Gestión Integrada del Riesgo de Desastres . (2024). *Ojos que no ven ¿sociedad que no siente? Relaves mineros y las otras zonas de sacrificio en Chile*. <https://www.cigiden.cl/ojos-que-no-ven-sociedad-que-no-siente-relaves-mineros-y-las-otras-zonas-de-sacrificio-en-chile/>
- CNN Chile. (2024, 3 de agosto). *Escoria minera: Desafíos normativos y avances en reutilización [Video]*. *Minería 360*. https://www.cnnchile.com/m360/escoria-minera-desafios-regulatorios-y-avances-en-reutilizacion-mineria-360_20240803/

- Cochilco. (2024). *Producción chilena de cobre crece 4,9 % en 2024*. Comisión Chilena del Cobre. <https://www.cochilco.cl/web/produccion-chilena-de-cobre-crece-49-en-2024-quebrando-tendencia-a-la-baja-de-los-ultimos-cinco-anos/>
- Codelco. (2024). Expertos alemanes analizarán alternativas para el cierre sustentable del complejo Ventanas. <https://www.codelco.com/expertos-alemanes-analizaran-alternativas-para-el-cierre-sustentable-del>
- Codelco. (2025). *Fundición Ventanas presenta planes piloto que reutilizan escoria de cobre*. <https://www.codelco.com/division-ventanas-presenta-proyectos-piloto-para-reutilizar-la-escoria>
- Codelco. (2025). *Codelco Ventanas inicia nuevos proyectos piloto de pavimentación con escorias*. <https://www.codelco.com/codelco-ventanas-inicia-nuevos-proyectos-piloto-de-pavimentacion-con>
- Codelco Educa. (2019). *Fundición media técnico* [Manual]. https://www.codelcoeduca.cl/codelcoeduca/site/artic/20190109/asocfile/20190109005205/fundicion_media_tecnico_060119.pdf
- Colegio de Constructores Civiles e Ingenieros Constructores. (2025). *De residuo a recurso: la escoria de cobre para hormigones más sostenibles*. <https://colegioconstructores-ingenierosdechile.cl/2025/09/11/de-residuo-a-recurso-la-escoria-de-cobre-para-hormigones-mas-sostenibles/>
- Consejo Minero. (2025). *Cifras actualizadas de la minería*. Santiago, Chile. <https://consejominero.cl/mineria-en-chile/cifras-actualizadas-de-la-mineria/>
- Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (UNFCCC). (2015). *El acuerdo de París*. <https://unfccc.int/es/acerca-de-las-ndc/el-acuerdo-de-paris>
- Corporación Alta Ley. (2024). *Escorias de cobre y economía circular* [Informe]. <https://www.corporacionaltaley.cl/wp-content/uploads/2024/10/Escorias-de-cobre-Economia-Circular-final-publico-2024-10-09.pdf>
- Corporación Alta Ley. (2025). *Nuevo hito en la habilitación de escorias para la construcción: publicación de norma chilena NCh3894:2025*. <https://www.corporacionaltaley.cl/nuevo-hito-en-la-habilitacion-de-escorias-para-la-construccion-publicacion-de-norma-chilena-nch3894-2025/>
- Corporación Alta Ley & Instituto Nacional de Normalización (INN). (2024). *Propuestas técnicas para el uso de escoria de cobre en pavimentos*. Santiago, Chile. <https://www.corporacionaltaley.cl/alta-ley-y-el-inn-trabajan-en-dos-nuevas-normas-tecnicas-para-el-uso-de-escorias-de-cobre-en-la-construccion/>

- Corporación de Desarrollo Tecnológico . (2024). *¿Residuo o subproducto? Por qué es importante valorizar la escoria de fundición en minería*. Recuperado el 4 de julio de 2025, de <https://www.cdt.cl/residuo-o-subproducto-por-que-es-importante-valorizar-la-escoria-de-fundicion-en-mineria/>
- Davenport, W. G., King, M., Schlesinger, M., & Biswas, A. K. (2002). *Extractive metallurgy of copper* (4.ª ed.). Pergamon.
- Díaz Fuentes, D. A. (2023). *Análisis técnico-económico de tecnologías de limpieza de escorias para fundiciones de cobre* [Tesis de pregrado, Universidad Técnica Federico Santa María]. Repositorio Institucional USM. <https://repositorio.usm.cl/handle/11673/57706>
- EDL Clean Blast. (s.f.). *Servicios de chorro abrasivo EDL Clean Blast*. <https://cleanblast.com/wp-content/uploads/2022/04/F1-Abrasives.pdf>
- Environment and Resources Authority [ERA]. (s.f.). *End-of-Waste Criteria*. <https://era.org.mt/topic/end-of-waste-criteria/>
- European Commission. (2020). *Waste Framework Directive*. https://environment.ec.europa.eu/topics/waste-and-recycling/waste-framework-directive_en
- Falsafi, M., Terkaj, W., Guzzon, M., Malfa, E., Fornasiero, R., & Tolio, T. (2023). Assessment of valorisation opportunities for secondary metallurgy slag through multi criteria decision making. *Sustainable Production and Consumption*. Advance online publication. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0959652623009964>
- Felder, R. M., & Rousseau, R. W. (2005). *Principios elementales de los procesos químicos* (3.ª ed.). Limusa Wiley. <https://hdquimicaeiqttotalh.wordpress.com/wp-content/uploads/2018/10/libro-de-balance-felder.pdf>
- Fortune Business Insights. (2024). *Mining Drilling Services Market Size, Share & Growth Report*. <https://www.fortunebusinessinsights.com>
- Global Choices. (2025). *Acción climática para el Ártico*. https://globalchoices.org/?gad_campaignid=20706822204
- Granato, D., Pequeño, F., Donoso, N., & Wiche, P. (2023). Análisis de Ciclo de Vida: Uso de silicato de hierro (escoria de cobre) como reemplazo de áridos en la construcción. Programa Territorio Circular, CORFO & SOFOFA Hub. <https://territoriocircular.sofofahub.cl/wp-content/uploads/2024/03/Analisis-de-Ciclo-de-Vida-Uso-de-silicato-de-hierro-escoria-de-cobre-como-reemplazo-de-aridos-en-la-construccion.pdf>

- Gorai, B. K., & Ghosh, S. K. (2003). *Characteristics and utilisation of copper slag: a review*. Elsevier. <https://moscow.sci-hub.se/877/7a81c89016bae7ccf42918ee6925e3ac/gorai2003.pdf>
- Herrera Vásquez, Y., Carrasco Collantes, F. S., & Muñoz Perez, S. P. (2021). Aprovechamiento de escorias metálicas en ladrillos cerámicos: Una revisión. *Ingeniería: Ciencia, Tecnología e Innovación*, 8(1), 94–105. <https://doi.org/10.26495/ICTI.V8I1.1551>
- Hunt Recabarren, C. C. (2017). *Modelamiento del enfriamiento controlado de escorias de fusión de cobre* (Tesis de Magíster en Ciencias de la Ingeniería, mención Metalurgia Extractiva). Universidad de Chile. <https://repositorio.uchile.cl/bitstream/handle/2250/147400/Modelamiento-del-enfriamiento-controlado-en-escorias-de-fusion-de-cobre.pdf>
- Instituto Nacional de Normalización [INN]. (2025). *Norma Chilena NCh3894:2025. Áridos artificiales en base a escorias de fundición del proceso pirometalúrgico del cobre – Clasificación, caracterización y orientaciones para su uso como material de construcción* <https://ecommerce.inn.cl/nch3894202588158>
- Japan Association for SMEs Working Environs. (s.f.). *Sistema de Generación Eléctrica a partir de Residuos (Horno de fundición por gasificación tipo Shaft)*. <https://www.jase-w.eccj.or.jp/technologies-s/pdf/electricity/E-20.pdf>
- Jiang, Y., Ling, T.-C., Shi, C., & Pan, S.-Y. (2018). *Characteristics of steel slags and their use in cement and concrete—A review*. *Resources, Conservation and Recycling*, 136, 187–197. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2018.04.023>
- Leiva-Guajardo, S. I., Toro, N., Fuentealba, E., Morel, M. J., Soliz, Á., Portillo, C., & Galleguillos Madrid, F. M. (2024). *Contribution of copper slag to water treatment and hydrogen production by photocatalytic mechanisms in aqueous solutions: A mini review*. *Materials*, 17(22), 5434. <https://doi.org/10.3390/ma17225434>
- Machado, F., Teixeira, A. C. S. C., & Ruotolo, L. A.M. (2023). *Critical review of Fenton and photo-Fenton wastewater treatment processes over the last two decades*. *International Journal of Environmental Science and Technology*, 20(12), 13995–14032. <https://doi.org/10.1007/s13762-023-05015-3>
- Maservi. (s.f). *Inicio*. <https://www.maservi.cl/>
- Ministerio de Salud. (2003). *Decreto Supremo N° 148: Reglamento Sanitario Sobre Manejo de Residuos Peligrosos*. <https://www.bcn.cl/leychile/navegar?idNorma=226458>

- Ministerio de Obras Públicas. (2024). Manual de carreteras (Vol. 5: Especificaciones técnicas generales de construcción). Dirección de Vialidad. <https://www.mop.gob.cl/serviciosmop/manual-de-carreteras/>
- Ministerio de Vivienda y Urbanismo, Chile. Ministerio de Obras Públicas. Comisión Nacional de Áridos, & Cámara Chilena de la Construcción. (2001). *Industria del árido en Chile: Tomo I. Sistematización de antecedentes técnicos y ambientales** [Informe]. Corporación de Desarrollo Tecnológico. <https://bibliotecadigital.ciren.cl/items/c29bdea3-8655-41b7-903e-4b7f992b3cd1>
- Ministerio del Medio Ambiente (Chile). (2016). *Ley 20.920: Marco para la gestión de residuos y Responsabilidad Extendida del Productor*. <https://mma.gob.cl>
- Ministerio del Medio Ambiente (Chile). (2021). *Hoja de ruta para un Chile Circular al 2040* [Informe]. <https://economiecircular.mma.gob.cl/wp-content/uploads/2022/01/HOJA-DE-RUTA-PARA-UN-CHILE-CIRCULAR-AL-2040-EN.pdf>
- Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico de España. (2021, julio). *Estudio FCR: escorias VDEF* [Informe]. https://www.miteco.gob.es/content/dam/mitesco/images/es/estudio_fcr_escorias_vdef_julio_21_tcm30-529624.pdf
- Mining Press. (2025, 29 enero). *Escoria de cobre: El innovador sistema de pavimentación en Chile*. <https://miningpress.com/nota/366787/escoria-de-cobre-el-innovador-sistema-de-pavimentacion-en-chile>
- NASA. (s. f.). *Los efectos del cambio climático*. Ciencia NASA. <https://ciencia.nasa.gov/cambio-climatico/los-efectos-del-cambio-climatico/>
- Navarrete, J., & Vargas, F. (2024). Nuevos áridos para la construcción: hacia una economía circular para una industria más sustentable y una infraestructura más resiliente (Temas de la Agenda Pública N° 171). Centro de Políticas Públicas UC, Pontificia Universidad Católica de Chile. <https://politicaspublicas.uc.cl/wp-content/uploads/2024/06/Temas-APP-171.pdf>
- Nazer, A., Payá, J., Borrachero, M.V., Monzó, J. (2016). "Caracterización de escorias de cobre de fundiciones chilenas del Siglo XIX". *Rev. Metal.* 52(4):e083. doi: <http://dx.doi.org/10.3989/revmetalm.083>
- Observatory of Economic Complexity. (s.f.). *Macadam de escoria, escoria o desechos industriales similares en el Comercio de Países Bajos*. <https://oec.world/es/profile/bilateral-product/macadam-of-slag-dross-or-similar-industrial-waste/reporter/nld>
- Organización Internacional del Trabajo (OIT). (2025). *Datos y estadísticas* <https://www.ilo.org/es/datos-y-estadisticas>

- Organización Mundial del Comercio (OMC). (2020). *Informe sobre el Comercio Mundial 2020*. https://www.wto.org/spanish/res_s/booksp_s/wtr20_s/wtr20-5_s.pdf
- Orizola Gómez, S. A. (2006). *Uso de escoria de cobre en cementos* [Memoria para optar al título de Ingeniero Civil, Universidad de Chile]. Repositorio Universidad de Chile. <https://repositorio.uchile.cl/handle/2250/147400>
- Oyarzún, P. (2025, febrero 19). Economía circular y minería sostenible: Iniciativa piloto utiliza escoria de cobre para pavimentar caminos. *El Desconcierto*. <https://eldesconcierto.cl/2025/02/19/economia-circular-y-mineria-sostenible-iniciativa-piloto-utiliza-escoria-de-cobre-para-pavimentar-caminos>
- Pacheco-Torgal, F., & Jalali, S. (2012). *Earth construction: Lessons from the past for future eco-efficient construction*. *Construction and Building Materials*, 29, 512–519. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2011.10.054>
- Painecur, P., Muñoz, A., Tume, P. et al. Distribution of potentially harmful elements in attic dust from the City of Coronel (Chile). *Environ Geochem Health* 44, 1377–1386 (2022). <https://doi.org/10.1007/s10653-021-01164-x>
- Pardo Vera, C. A. (2018). *Utilización de escoria de cobre como agregado pétreo para solución de caminos básicos de la Región de Valparaíso* [Trabajo de título, Universidad de Valparaíso]. Repositorio UV. <https://repositoriobibliotecas.uv.cl/bitstreams/0f04ec88-0b59-44fb-925d-8055af1f49dd/download>
- Pares & Álvarez. (s.f.). *Lixiviación y desafíos con el medio ambiente*. <https://pya.cl/lixiviacion-y-desafios-con-el-medio-ambiente/>
- Phiri, T.C., Singh, P., & Nikoloski, A.N. (2022). The potential for copper slag waste as a resource for a circular economy: A review. *Minerals Engineering*, 172, 107150.
- Piatak, N. M., Parsons, M. B., & Seal, R. R. (2015). Characteristics and environmental aspects of slag: A review. *Applied Geochemistry*, 57, 236–266. <https://doi.org/10.1016/j.apgeochem.2014.04.009>
- Plusmining. (2025, 24 febrero). Chile accounted for 24 % of global copper production in 2024. *Plusmining*. <https://plusmining.com/en/2025/02/24/chiles-share-in-the-global-copper-market-drops-from-30-to-24-in-a-decade/>
- Pontificia Universidad Católica de Valparaíso . (2025). *En Chile diariamente se desecha cobre avaluado en una cifra cercana a los 450 mil dólares*. <https://www.pucv.cl/uuaa/vriea/noticias/nuestros-investigadores/en-chile-diariamente-se-desecha-cobre-avaluado-en-una-cifra-cercana-a>

- Radio Agricultura. (2024). *Usan escoria de cobre para desarrollar almacenamiento térmico*. Pontificia Universidad Católica de Chile. <https://www.uc.cl/academia-en-los-medios/usan-escoria-de-cobre-para-desarrollar-almacenamiento-termico/>
- Reporte Minero. (2025, 24 de abril). *La escoria del cobre: de residuo a oportunidad*. <https://www.reporteminero.cl/noticia/columnistas/2025/04/la-escoria-del-cobre-de-residuo-a-oportunidad>
- Requena, D. (2022, 26 de septiembre). *Áridos, los minerales olvidados en Chile*. *Revista Nueva Minería y Energía*. <https://www.nuevamineria.com/revista/aridos-los-minerales-olvidados-en-chile/>
- Residuos Profesional. (2024). *La Sociedad Japonesa de Gestión de Residuos publica una investigación de la UMH sobre sustitución de arcillas por escorias y cenizas volantes*. <https://www.residuosprofesional.com/investigacion-arcillas-escorias-cenizas/>
- Romo Zazueta, R. T. del. (2010). *Usos y aplicaciones de la escoria de fundición de cobre* [Tesis de licenciatura Universidad de Sonora]. <http://tesis.uson.mx/digital/tesis/docs/20613/Capitulo1.pdf>
- Sánchez, M. (2023). *Caracterización de escorias de cobre y su potencial de valorización*. Comisión Minera. <https://www.comisionminera.cl/wp-content/uploads/2023/03/5-Characterizacion-y-Valorizacion-Escorias-cobre-M.-Sanchez-UAB.pdf>
- Santacruz-Torres, J., & Torres-Agredo, J. (2019). Aprovechamiento de escorias de fundición secundaria de plomo en ladrillos cerámicos. *Ciencia e Ingeniería Neogranadina*. <https://www.redalyc.org/journal/911/91160956002/html/>
- Servicio Nacional de Geología y minería . (2018). *Situación de los relaves mineros en Chile*. <https://www.sernageomin.cl/wp-content/uploads/2018/01/Situacion-de-los-relaves-mineros-en-Chile.pdf>
- Servicio Nacional de Geología y minería . (2023). *Preguntas frecuentes sobre relaves: 530 millones de toneladas anuales*. <https://www.sernageomin.cl/preguntas-frecuentes-sobre-relaves/>
- Servicio Nacional de Geología y Minería. (2024). *Catastro de relaves 2024*.
- Serviex Ltda. (2024). *Minería chilena: desafíos y soluciones logísticas comprobadas*. <https://serviexltda.com/que-establece-la-nch-2190-como-evitar-problemas-legales/b/minera-chilena-desafios-y-soluciones-logisticas-comprobadas>
- Shi, C., Meyer, C., & Behnood, A. (2008). Utilization of copper slag in cement and concrete. *Resources, Conservation and Recycling*, 52(10), 1115-1120. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2008.06.008>

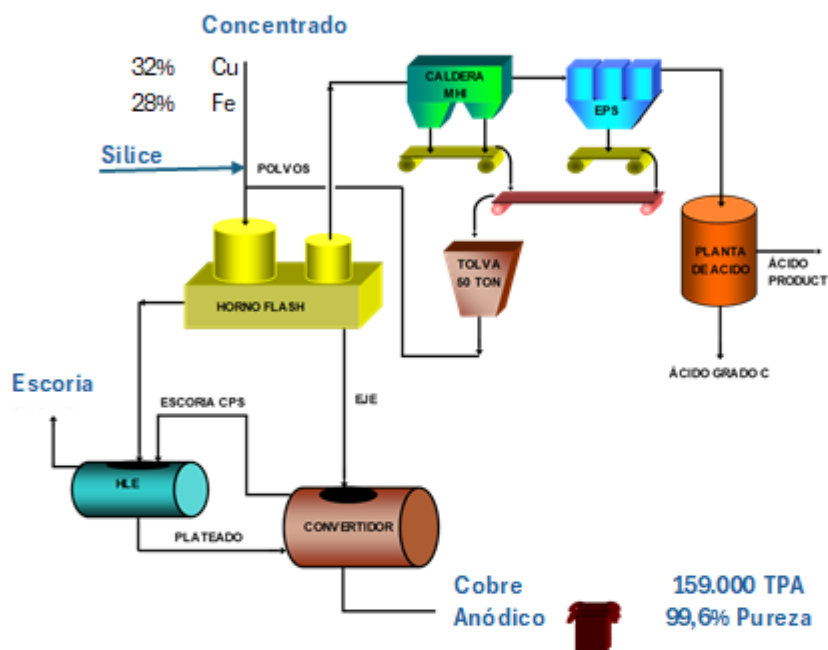
- Superblast. (s.f.). *Copper slag abrasive – Technical data sheet*. https://superblast.com.mx/wp-content/uploads/2017/03/CopperSlag_superblast.pdf
- Totalprodinter Minerales. (2025). *Escoria de Cobre / abrasivo ecológico Negro*. <https://totalprodinter.com/escoria-de-cobre>
- Unión Europea. (2008). *Directiva 2008/98/CE del Parlamento Europeo y del Consejo sobre los residuos*. <https://eur-lex.europa.eu/ES/legal-content/summary/eu-waste-management-law.html>
- USM. (2023). *Innovador proyecto recupera hierro desde desechos de la fundición de cobre*. Universidad Técnica Federico Santa María. <https://postgrado.usm.cl/noticias/innovador-proyecto-recupera-hierro-desde-desechos-de-la-fundicion-de-cobre/>
- Valderrama, L., Santander, M., Pérez, L., & Jara, J. (2018). Recuperación de cobre contenido en escoria de cobre mediante flotación. *HOLOS*, 5, 40-50. <https://doi.org/10.15628/holos.2018.7118>
- Vidal Olmedo, M. J. (2025). *Mayo, mes del reciclaje: Cómo la legislación chilena está impulsando una transición hacia una minería más verde*. *G5 Noticias*. <https://g5noticias.cl/2025/05/21/mayo-mes-del-reciclaje-como-la-legislacion-chilena-esta-impulsando-una-transicion-hacia-una-mineria-mas-verde/>
- W Abrasives. (s.f). *Abrasivo Mineral Ecológico: Escoria de Cobre*. Recuperado el 5 de julio de 2025, de <https://shop-mx.wabrasives.com/blog/post/abrasivos-ceramicos-escoria-de-cobre-copper-slag>
- Wiche, P., Granato, D., & Donoso, N. (2023). *Estado del Arte: Uso de silicato de hierro (escoria de cobre) como reemplazo de áridos en la construcción*. Territorio Circular.
- Wu, Q., Wu, L., Dai, C., ... & Dong, Y. (2025). Utilizing methods of copper smelting slag in wastewater treatment and flue gas cleaning: A review. *Journal of Sustainable Metallurgy*. <https://doi.org/10.1007/s40831-025-01131-1>
- Zakharova et al. (2024). *Metallurgical Waste for Sustainable Agriculture: Converter Slag and Blast-Furnace Sludge Increase Oat Yield in Acidic Soils*. <https://www.mdpi.com/2073-4395/14/11/2642>
- Zapata Rodríguez, P. C. (2017). *Problemas medioambientales en la extracción de áridos en Chile* [Tesis de pregrado, Universidad de Concepción]. Repositorio Udec. <https://repositorio.udec.cl/handle/11594/4424>

9 ANEXOS

Anexo 1. Balance de masa para estimar producción de Fundición Chagres

Dada la situación actual del país, Angloamerican Chile se ha planteado para el año 2026 la producción de 159.000 TPA de cobre anódico con un 99,6% de pureza. Dicha producción con leyes de corte 0,65% a 0,78%, le permiten trabajar con cierta holgura y competitividad, considerando que CODELCO plantea su producción con leyes del 0,4%.

A continuación, se presenta la proyección de generación de escoria para el año 2026



Cu Fino =	159.638,6	TPA
Concentrado alimentado =	498.870,5	TPA
Fierro Alimentado	139.683,7	TPA
Moles Fe =	2498,81	Tonmo/año
Escoria:	Fe_2SiO_2	
Silice requerida	1249,41	Tonmo/año
Escoria producida	215.773	TPA
Volumen Escoria	71.924	m ³ /año
$\frac{\text{Masa Escoria}}{\text{Masa Cu Fino}}$	=	1,352

Anexo 2. Pauta de entrevista a ejecutores de proyecto y/o municipios

Entrevista 1

La presente entrevista es realizada por Natan Johnson González, alumno de la universidad de Valparaíso, que realiza su trabajo de título para optar al título de ingeniero ambiental. **Las respuestas no serán utilizadas con ni otro objetivo.**

Título del trabajo: Escorias metalúrgicas: Oportunidades y desafíos en su valorización y reutilización.

Profesora guía: María Lorena Álvarez Sánchez. Universidad de Valparaíso.

Entrevistado (a).

Nombre y apellidos :

Institución:

Área donde se desempeña:

SE AGRADECE SU COLABORACION

Pregunta1: Para comenzar, ¿cómo se originó el proyecto piloto para la plaza en Villa El Sol?

Pregunta2: Al momento de dar el "visto bueno", por favor ordene del 1 (más importante) al 4 (menos importante) los siguientes criterios en su decisión:

- El respaldo técnico y de seguridad del material (certificados, estudios).
- El nulo o bajo costo del proyecto para la municipalidad.
- El carácter innovador y de sostenibilidad del proyecto.
- El beneficio directo para la comunidad y la imagen de la comuna.

Pregunta 3 : Más allá de la pregunta anterior, ¿cuál fue el factor individual más decisivo para que usted dijera "sí, hagámoslo"? (Marque solo una opción).

Pregunta 4: ¿Qué tan significativo fue el costo logístico (transporte de la escoria) dentro del presupuesto total del proyecto?

Pregunta 5: ¿Qué tan complejo fue el proceso de autorización para el uso de un material clasificado como "residuo minero" por la normativa chilena ?

Pregunta 6 : Si la barrera no es técnica, ¿cuál cree usted que es el verdadero obstáculo que ha frenado esto por 10 años?

Pregunta 7: Ahora que la obra está en uso, por favor evalúe de 1 (Muy Insatisfecho) a 4 (Muy Satisfecho) su nivel de satisfacción con el desempeño del material hasta la fecha:

Pregunta 8 : Basado en la experiencia, por favor evalúe de 1 (No lo consideraría) a 4 (Lo impulsaría activamente) su postura actual sobre ampliar el uso de este material en otras obras públicas de Catemu.

Pregunta 9 : ¿Qué factor necesitaría usted para sentirse más seguro de aprobar futuros proyectos con materiales reciclados?

Pregunta 10: Por favor evalúe de 1 (Totalmente en desacuerdo) a 4 (Totalmente de acuerdo) la siguiente afirmación: "Las municipalidades deberían ser más proactivas para incorporar nuevos materiales reciclados en obras públicas, asumiendo un rol pionero."

Anexo 3. Pauta de entrevista para investigadores de proyectos relacionados a la escoria.

Entrevista 2

La presente entrevista abierta es aplicada por Natan Johnson González. Alumno de la Universidad de Valparaíso, que realiza su trabajo de título para optar al título de Ingeniero Ambiental. **No será utilizada con ningún otro objetivo.**

Título del trabajo: Escorias metalúrgicas: Oportunidades y desafíos en su valoración y reutilización.

Profesora guía: María Lorena Álvarez Sánchez. Universidad de Valparaíso. Chile.

Entrevistado :

Nombre y apellidos:

Institución:

Cargo:

Grado académico:

Línea de investigación:

SE AGRADECE SU COLABORACIÓN.

Pregunta 1

Probablemente usted tiene un equipo de trabajo en que participan colaboradores académicos, Técnicos, y probablemente estudiantes en práctica y tesis. ¿Es así?

Pregunta 2

¿Cuánto tiempo lleva trabajando en el tema de las escorias mineras?

Pregunta 3

Usted me podría relatar ¿cómo es que surge su inquietud por desarrollar esta línea de investigación?

Pregunta 4

¿Qué etapas ha tenido que superar para alcanzar el momento en que actualmente se encuentra su investigación?

Pregunta 5

Usted me podría describir brevemente su proyecto actual

Pregunta 6

Este proyecto es financiado por alguna institución. Señale cuál.

Pregunta 7.

Tengo entendido que los resultados de sus proyectos han sido aplicados con resultados positivos (Plaza de Catemu). ¿Hay otros lugares en que haya sido aplicado? Indique donde.

Pregunta 8

En algunos de esos lugares, ¿su equipo ha evaluado resultados en terreno de esa aplicación?

Pregunta 9

Podría señalar algunos resultados de esa evaluación

Pregunta 10

¿De acuerdo con lo anterior ¿Habría modificaciones técnicas que realizar para ser aplicado en otros lugares?

Pregunta 11

Cree Ud que a falta de permisos impide la valorización de escoria

Pregunta 12

Que tendría que suceder para que la escoria pase de se catalogado residuo a subproducto