

NOTA TÉCNICA N° IDB-TN-2956

Análisis estratégico del desarrollo de capacidades de producción de cobre refinado en Colombia

José Joaquín Jara
José Recabarren
Osvaldo Urzúa
Annie Dufey
Carlos G. Sucre

Banco Interamericano de Desarrollo
División de Energía

Julio 2024



Análisis estratégico del desarrollo de capacidades de producción de cobre refinado en Colombia

José Joaquín Jara
José Recabarren
Osvaldo Urzúa
Annie Dufey
Carlos G. Sucre

Banco Interamericano de Desarrollo
División de Energía

Junio 2024

Catalogación en la fuente proporcionada por la

Biblioteca Felipe Herrera del

Banco Interamericano de Desarrollo

Análisis estratégico del desarrollo de capacidades de producción de cobre refinado en Colombia / José Joaquín Jara, José Recabarren, Osvaldo Urzúa, Annie Dufey, Carlos G. Sucre.

p. cm. — (Nota técnica del BID ; 2956)

1. Mineral industries-Colombia. 2. Copper industry and trade-Colombia. 3. Copper mines and mining-Colombia. I. Jara, José Joaquín. II. Recabarren, José. III. Urzúa, Osvaldo. IV. Dufey, Annie. V. Sucre, Carlos G. VI. Banco Interamericano de Desarrollo. División de Energía. VII. Serie.

IDB-TN-2956

Código JEL: Q30, L72

Palabras clave: Minería, cobre, refinería, refinación, fundición, industrialización, cadena de valor

<http://www.iadb.org>

Copyright © 2024 Banco Interamericano de Desarrollo (BID). Esta obra se encuentra sujeta a una licencia Creative Commons CC BY 3.0 IGO (<https://creativecommons.org/licenses/by/3.0/igo/legalcode>). Se deberá cumplir los términos y condiciones señalados en el enlace URL y otorgar el respectivo reconocimiento al BID.

En alcance a la sección 8 de la licencia indicada, cualquier mediación relacionada con disputas que surjan bajo esta licencia será llevada a cabo de conformidad con el Reglamento de Mediación de la OMPI. Cualquier disputa relacionada con el uso de las obras del BID que no pueda resolverse amistosamente se someterá a arbitraje de conformidad con las reglas de la Comisión de las Naciones Unidas para el Derecho Mercantil (CNUDMI). El uso del nombre del BID para cualquier fin distinto al reconocimiento respectivo y el uso del logotipo del BID, no están autorizados por esta licencia y requieren de un acuerdo de licencia adicional.

Note que el enlace URL incluye términos y condiciones que forman parte integral de esta licencia.

Las opiniones expresadas en esta obra son exclusivamente de los autores y no necesariamente reflejan el punto de vista del BID, de su Directorio Ejecutivo ni de los países que representa.



Análisis estratégico del desarrollo de capacidades de producción de cobre refinado en Colombia





Agradecimientos

Este informe es parte de la agenda de conocimiento desarrollada por la División de Energía del Banco Interamericano de Desarrollo que tiene por objetivo desarrollar nuevos productos de conocimiento y programas de asistencia técnica para los países de América Latina y el Caribe. Los productos de conocimiento generados tienen la intención de informar, guiar y ofrecer un menú de recomendaciones a los hacedores de políticas y participantes activos en los mercados energéticos, incluidos los consumidores, las empresas de servicios públicos y los reguladores.

El informe fue elaborado bajo la dirección general de Marcelino Madrigal (Jefe de la División de Energía). El líder del equipo de trabajo es Carlos G. Sucre y los miembros del equipo del proyecto son Alexandra Planas Martí y Oscar Alejandro Páramo. Los autores del informe son José Joaquín Jara, José Recabarren, Osvaldo Urzúa y Annie Dufey de la firma consultora Karungen y Carlos G. Sucre del Banco Interamericano de Desarrollo.

El equipo agradece el trabajo de la Agencia Nacional de Minería (ANM) de Colombia en la elaboración de este informe y aprecia en particular la guía, comentarios y revisiones de María Piedad Bayter Horta, Fredy Alberto Rodríguez Díaz, Karen Tatiana Godoy Caicedo, Hernán José Sierra Montes, Carlos Javier Tovar Prieto y Jhon Fredy García Ramírez de ANM y de Laura Giles Álvarez, Cristhian Larrahondo y Lenin Balza del Banco Interamericano de Desarrollo.





Contenido

1 Introducción general	01
2 Producción de cobre refinado: Alternativas tecnológicas y aspectos técnico-económicos	08
2.1 Introducción	09
2.2 Vía pirometalúrgica para la producción de cobre refinado a partir de concentrados de cobre	12
2.2.1 Tecnologías de fusión-conversión	13
2.2.1.1 Horno de reverbero	14
2.2.1.2 Alto horno (Blast furnace)	15
2.2.1.3 Convertidor Teniente (CT)	15
2.2.1.4 Tecnología de lanza sumergida (TSL) – Isasmelt y Ausmelt	16
2.2.1.5 Proceso Mitsubishi	17
2.2.1.6 Fusión en baño líquido (Flash) – Outokumpu e Inco	17
2.2.1.7 Horno Eléctrico	18
2.2.1.8 Tecnologías emergentes – TBS, SBS y BBS	19
2.2.1.9 Tecnología Green Copper	19
2.2.2 Mercado y costos de fundiciones en el mundo	21
2.2.2.1 Producción de cobre fundido (anódico)	21
2.2.2.2 Costos operacionales en las fundiciones de cobre	22
2.3 Hidrometalurgia	26
2.3.1 Tecnologías de lixiviación de concentrados de cobre	27
2.3.1.1 Lixiviación a altas presiones	28
2.3.1.2 Lixiviación mediante activación mecánica	29
2.3.1.3 Biolixiviación	29
2.3.1.4 Lixiviación en medio sulfatado	30
2.3.1.5 Lixiviación con cloruros y cloruros/sulfatos (halogenuros)	30
2.3.1.6 Lixiviación potenciada mediante el uso de catalizadores	30
2.3.2 Comparación entre tecnologías pirometalúrgicas e hidrometalúrgicas	31
2.4 Conclusiones y recomendaciones	36
3 Mercados de la industria del cobre, producción de cobre de mina, cobre fundido/refinado, y semi manufacturas de cobre	37
3.1 Introducción	38
3.2 Exploración, recursos y reservas de cobre	39
3.3 Industria primaria del cobre y producción total de cobre refinado	44

3.3.1 Producción de cobre de mina	45
3.3.2 Producción de cobre en concentrados	49
3.3.3 Producción de cobre electro-obtenido	50
3.3.4 Producción de cobre de fundición	51
3.3.5 Producción total de cobre refinado	54
3.4 Industria de semi manufacturas de cobre	57
3.4.1 Producción de semi manufacturas de cobre	58
3.4.2 Uso final de semi manufacturas de cobre	61
3.5 Mercados, comercio, costos y precios en la industria del cobre	63
3.5.1 Exploración de minerales y proyectos mineros	63
3.5.2 Industria primaria del cobre	64
3.6 Conclusiones y recomendaciones	73

4 Análisis estratégico sobre opciones de desarrollo de capacidades de producción de cobre refinado en Colombia **74**

4.1 Introducción	75
4.2 Escenarios de análisis para el desarrollo de la cadena de valor de la industria del cobre en Colombia	76
4.2.1 Descripción de los escenarios secuencial y simultáneo	76
4.2.1.1 Escenario Secuencial	76
4.2.1.2 Escenario Simultáneo	78
4.2.2 Análisis FODA de los escenarios de desarrollo de la cadena de valor de la industria del cobre en Colombia	79
4.2.2.1 Análisis FODA+PESTAL escenario secuencial	80
4.2.2.2 Análisis FODA+PESTAL escenario simultáneo	85
4.3 Hoja de ruta para el desarrollo de capacidades de procesamiento de cobre en Colombia	89
4.3.1 Selección del escenario para el desarrollo de las capacidades de procesamiento de cobre en Colombia	89
4.3.2 Brechas y oportunidades para la materialización del escenario secuencial	93
4.3.2.1 Pilar 1: Inversiones y operaciones de calidad para el desarrollo de una minería responsable	93
4.3.2.2 Pilar 2: Encadenamientos virtuosos y tecnológicos y capital humano para un desarrollo productivo y empleo de calidad	96
4.3.2.3 Pilar 3: Factores críticos para una minería verde, competitiva y de baja huella ecológica-ambiental	98
4.3.2.4 Pilar 4: Conectividad y corredores logístico-mineros de alto desempeño y sostenibles	102
4.3.2.5 Pilar 5: Régimen fiscal e institucional virtuoso y gobernanza para la acción colectiva	103
4.3.3 Objetivos y líneas de acción prioritarias para el escenario secuencial de desarrollo de la cadena de valor de la industria del cobre en Colombia para la industria primaria del cobre	105
4.4 Conclusiones y recomendaciones	108

Referencias **110**



Figuras

Figura 1:	Etapas en el desarrollo en torno a la minería. Fuente: Urzúa, O. (por publicarse)	04
Figura 2:	Vías de procesamiento de minerales de cobre para la obtención de cobre refinado (superior). Procesos de electro-refinación (ER) y electro-obtención (EW) para la obtención de cátodos de cobre (inferior).	10
Figura 3:	Etapa de fusión, conversión y refinación con sus principales productos de entrada y salida.	13
Figura 4:	Esquemática del horno reverbero.	14
Figura 5:	Alto horno.	15
Figura 6:	Convertidor Teniente.	16
Figura 7:	Horno Isasmelt.	16
Figura 8:	Proceso Mitsubishi.	17
Figura 9:	Horno Flash de Outokumpu.	18
Figura 10:	Horno eléctrico.	18
Figura 11:	Horno bottom-blowing (BBS).	19
Figura 12:	Figura esquemática procesos tecnología Green Copper.	20
Figura 13:	Producción de cobre fundido según tipo de tecnología de fusión.	21
Figura 14:	Capacidad de procesamiento de concentrados de cobre en fundiciones (izquierda), y distribución de producción de cobre fundido según modelo de negocio de fundiciones (derecha).	22
Figura 15:	Distribución promedio de los costos operacionales de una fundición de cobre.	22
Figura 16:	Distribución de los costos operacionales de las fundiciones de cobre según el tipo de tecnología de fusión empleada (izquierda), y distribución de costos netos para fundiciones de cobre con tecnología de baño (derecha).	23
Figura 17:	Distribución de los costos operacionales de las fundiciones de cobre según la capacidad de procesamiento en toneladas de concentrado por año: bajo (menos de 900 ktons/año), medio (entre 900 y 1500 ktons/año) y alto (más de 1500 ktons/año).	24
Figura 18:	Distribución de los costos operacionales de las fundiciones de cobre según el modelo de negocio empleado (izquierda), y distribución de costos de caja para fundiciones de cobre de acuerdo con su modelo de negocios (derecha).	25
Figura 19:	Tecnologías para el procesamiento de concentrados por la vía hidrometalúrgica.	27
Figura 20:	Nivel de madurez tecnológica de las distintas tecnologías para el procesamiento de concentrados por la vía hidrometalúrgica.	28
Figura 21:	Cadena de valor, etapas productivas y productos de la industria del cobre.	38
Figura 22:	Producción de mina, capacidad de producción, reservas y recursos de cobre, 2021.	40
Figura 23:	Gastos de exploración de cobre por regiones, 2000-2017.	42
Figura 24:	Recursos de cobre identificados y no descubiertos por regiones.	43
Figura 25:	Producción mundial de cobre de mina por región, 2012-2021.	46
Figura 26:	Principales países productores de cobre de mina del mundo, 2021.	47

Figura 27:	Producción de cobre en concentrados por región, 2012-2021. Participación de la producción de cobre en concentrados en el total de producción de cobre de mina en el mundo. _____	49
Figura 28:	Producción de cobre electro-obtenido por región, 2012-2021. Participación de la producción de cobre electro-obtenido en el total de producción de cobre de mina en el mundo. _____	50
Figura 29:	Principales países productores de cobre electro-obtenido, 2021. _____	51
Figura 30:	Producción mundial de cobre de fundición por región y participación de China, 2012-2021. _____	52
Figura 31:	Principales países productores de cobre de fundición del mundo, 2021. _____	52
Figura 32:	Producción mundial de cobre refinado por región y participación de China, 2012-2021. _____	54
Figura 33:	Principales países productores de cobre refinado del mundo, 2021. _____	55
Figura 34:	Producción mundial de semi manufacturas de cobre por tipo de producto, 2012-2021. BVS, barras, varas y secciones; PLTF, pletinas o placas, láminas, tiras y foils. _____	59
Figura 35:	Producción mundial de semi manufacturas de cobre por región, 2012-2021. Participación de China en la producción mundial de semi manufacturas de cobre. _____	59
Figura 36:	Importaciones de Colombia de semi manufacturas de cobre por tipo de producto, 2012-2021. BVS, barras, varas y secciones; PLTF, pletinas o placas, láminas, tiras y foils. _____	60
Figura 37:	Uso final de semi manufacturas de cobre por categorías a nivel mundial, 2012-2021. _____	61
Figura 38:	Uso final de semi manufacturas de cobre por subcategorías a nivel mundial, 2021. _____	62
Figura 39:	Exportaciones e importaciones de cobre en concentrados por regiones, 2012-2021. _____	65
Figura 40:	Exportaciones e importaciones de cobre refinado por regiones, 2012- 2021. _____	67
Figura 41:	Curva de costos C1 para la minería del cobre al primer trimestre de 2021, en centavos de USD por libra de cobre. Las operaciones de Chile están destacadas en color. _____	68
Figura 42:	Curva de costos C1 para la minería del cobre, con sus percentiles principales y el precio del cobre refinado, 1997-2020. _____	69
Figura 43:	Curva de costos de tratamiento (TC) para las fundiciones de cobre, con sus cuartiles, 2021. _____	70
Figura 44:	Precio anual de cobre refinado LME, base real año 2021. Períodos 2002- 2021 y 1935-2021. _____	70
Figura 45:	Cargos combinados TC/RC para concentrados de cobre, mercado spot y contratos directos, 2011-2020. _____	72
Figura 46:	Escenario de desarrollo secuencial de los eslabones de la industria del cobre en Colombia. _____	77
Figura 47:	Escenario de desarrollo simultáneo de los eslabones de la industria del cobre en Colombia. _____	79
Figura 48:	Identificación de fortalezas y debilidades del escenario de desarrollo secuencial de la cadena de valor de la industria minera en Colombia. _____	82
Figura 49:	Identificación de oportunidades y amenazas del escenario de desarrollo secuencial de la cadena de valor de la industria minera en Colombia. _____	83
Figura 50:	Identificación de fortalezas y debilidades del escenario de desarrollo simultáneo de la cadena de valor de la industria minera en Colombia. _____	87
Figura 51:	Identificación de oportunidades y amenazas del escenario de desarrollo simultáneo de la cadena de valor de la industria minera en Colombia. _____	88
Figura 52:	Cadena de valor de la industria del cobre, con referencias a principales participantes en cada eslabón y la contribución de Colombia. _____	90

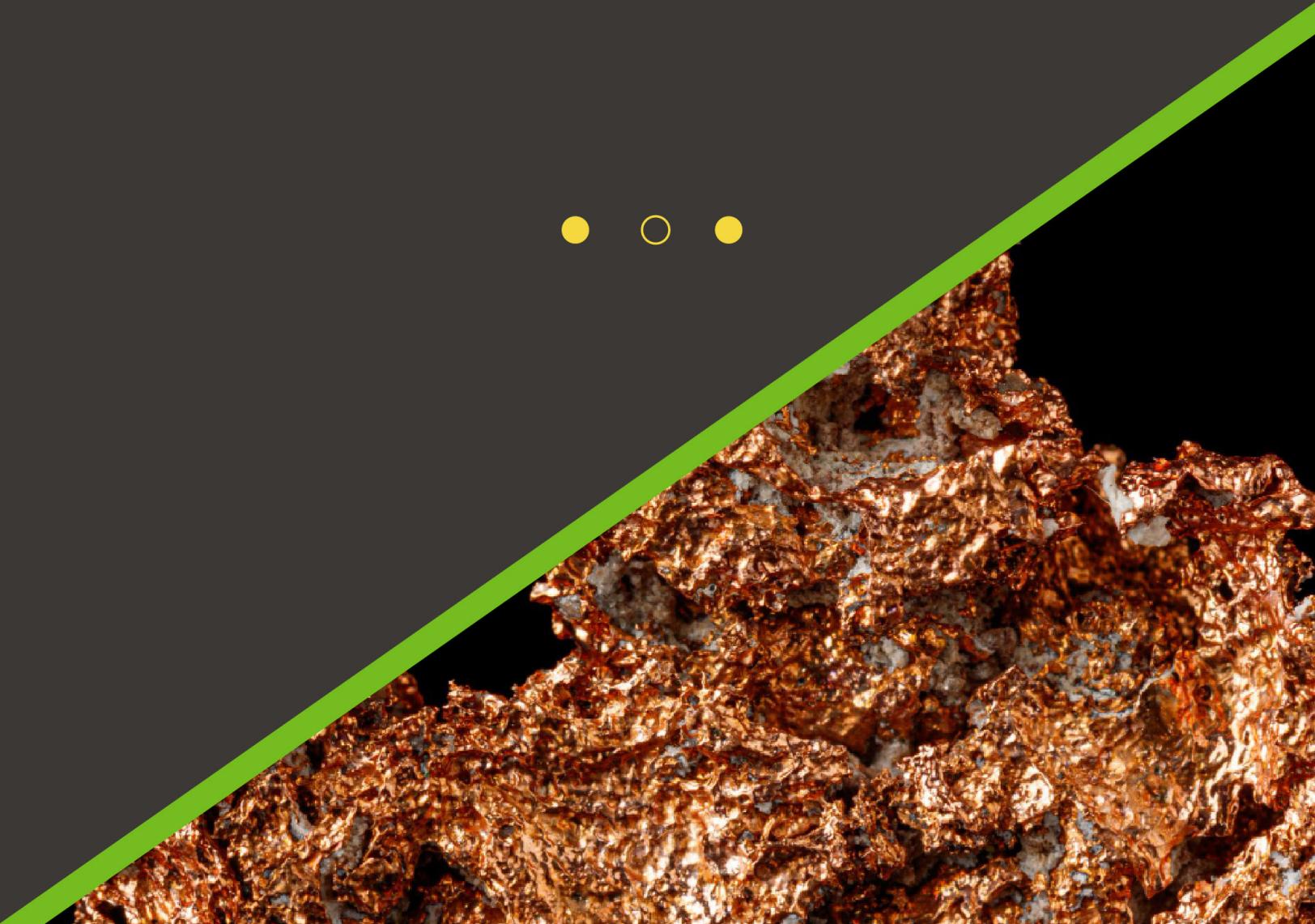


Tablas

Tabla 1:	Comparación del Ranking en el FTI (para 166 países) y PGB per cápita para selección de países (USD PPP,2017). _____	06
Tabla 2:	Gastos de exploración y principales descubrimientos de cobre, 1990-2021. _____	41
Tabla 3:	Principales operaciones mineras de cobre del mundo, 2021. Capacidad en miles de TM de cobre fino contenido. _____	48
Tabla 4:	Principales fundiciones de cobre del mundo, 2021. Capacidad en miles de TM de cobre fino contenido. _____	53
Tabla 5:	Principales refinерías de cobre del mundo, 2021. Capacidad en miles de TM de cobre fino. _____	56
Tabla 6:	Clasificación de productos semi manufacturados de cobre y sus principales usos. _____	57



Introducción general



- Una de las consecuencias directas de la lucha contra el cambio climático y la obligación de descarbonizar la economía global con una transición energética justa que apalanque los rápidos cambios tecnológicos en desarrollo, es un importante aumento en la demanda global de minerales como cobre, níquel, litio, cobalto, manganeso, tierras raras, entre otros, que en su conjunto han venido a llamarse “minerales críticos” dada su centralidad a las tecnologías que sostendrán esta transición y descarbonización.



Poniendo el foco en el cobre y solo considerando el desarrollo de la electromovilidad, las energías bajas en emisiones, el almacenamiento energético y las redes eléctricas necesarias para sustentar el sistema se estima que demanda incremental de cobre asociada a estas tecnologías aumentaría desde 1,2 millones de toneladas métricas (TM) de cobre fino contenido en 2020 a 5,4 millones TM de cobre fino contenido en 2040. Es decir, en veinte años la demanda por cobre asociada a las tecnologías centrales de la transición energética más que se cuatuplicará y ese incremento en demanda por cobre equivale a la producción actual de cobre fino de Chile, el mayor productor de cobre del mundo (Cochilco, 2022d).



Lo anterior abre una oportunidad única y transitoria para que países con geologías adecuadas – como es el caso de Colombia – apalanquen sus reservorios de minerales y hagan parte de la cadena de suministros fundamentales para la transición. En este sentido, Colombia, a partir de su potencial geológico, además de poder suplir parte de la creciente demanda mundial por cobre de mina, también puede aprovechar la expansión de la producción minera para promover el desarrollo de encadenamientos productivos asociados, tanto aguas arriba como aguas abajo, a esta producción primaria de cobre y de la infraestructura y bienes públicos habilitantes asociadas (carreteras, líneas eléctricas, etc.).

Esto le permitiría a Colombia impulsar una transformación productiva en torno a una minería fuente de industrialización e innovación, de generación de empleos de calidad y así transformar la economía colombiana en términos más amplios al ir sofisticándola, diversificándola e incluso haciéndola más responsable y sostenible.

Para atender de manera responsable y sostenible dicha demanda, en primer lugar, se requiere desarrollar operaciones mineras de una escala relevante, que usen tecnologías de punta y las mejores prácticas globales para minimizar impactos negativos, alcanzando desempeños sociales y ambientales acorde a altos estándares internacionales y que sean capaces de atraer niveles significativos de inversión de calidad.

Actualmente, la producción de cobre de Colombia es baja: la mina de cobre más grande de Colombia, El Roble, produce cerca de 9 mil TM de cobre contenido en concentrados al año. En contexto, de Escondida – en Chile – se producen aproximadamente 1.4 millones de toneladas de cobre por año, de Buenavista del Cobre – en México – se extraen 525 mil TM de cobre por año y de Cerro Verde II – en Perú – se producen 500 mil TM anualmente.

Sin embargo, diversos expertos e instituciones reconocen que Colombia tiene un potencial geológico significativo que podría impulsar un aumento importante en la producción de cobre de mina. Colombia cuenta con reservas probadas y probables de 1,4 millones TM de cobre contenido, una estimación de 3,1 millones TM de cobre contenido en recursos medidos e indicados, y casi 3,8 millones TM de cobre contenido en recursos inferidos (Dufey et al., 2023). En efecto, a partir de la proyección de Dufey et al. (2023), y considerando una cartera de veinte proyectos de cobre y oro en distintos estados de desarrollo, Colombia podría alcanzar una producción anual de cobre de mina de 200 mil TM de cobre fino, más de 3,3 millones de onzas de oro y casi 6 millones de onzas de plata. Según las estimaciones de Dufey et al. (2023), este desarrollo requeriría invertir más de 14 mil millones de dólares durante los próximos 10 a 15 años, y una inversión anual no menor a 400 millones de dólares durante para mantener su funcionamiento. El paso de desarrollar la industria primaria del cobre es necesario para establecer opciones de industrialización en torno al desarrollo minero.



En segundo lugar, una vez alcanzado un volumen de producción anual cercano a 200 mil TM de cobre fino contenido en concentrados, existiría una base de producción suficiente para hacer viable la construcción y operación de una fundición y refinería (FURE) sostenible. No obstante, nuevas tecnologías metalúrgicas en fase de escalamiento industrial y que podrían alcanzar su madurez durante la presente década permiten reducir ese nivel mínimo de producción de cobre para viabilizar la producción de cobre refinado en Colombia. Suponiendo un desarrollo secuencial de la industria cuprífera de Colombia, en la medida que se vayan conociendo los proyectos que permitirían ir aumentando la producción primaria de cobre de mina, y se conozcan las características de las tecnologías que se usarán en el procesamiento de concentrados y minerales a futuro, se podrán determinar cuáles son las mejores opciones y los requerimientos para poder avanzar hacia una mayor agregación de valor en la cadena productiva de la industria del cobre.

El desarrollo minero descrito arriba podría generar un impacto directo anual en el PIB cercano a los 5 mil millones de dólares, y considerando sus efectos indirectos e inducidos podría llegar a valores anuales en torno a 10 mil millones de dólares adicionales para la economía de Colombia (Dufey et al., 2023). Estas cifras significan más que duplicar los aportes que hace actualmente toda la minería a la economía del país: 4,2 miles de millones de dólares en 2022 (Agencia Nacional de Minería, 2023). Esto permitiría ir remplazando los aportes que hoy realiza la minería del carbón por una minería no fósil y que avanza sustentablemente en el desarrollo de encadenamientos e innovaciones que apoyen la transformación productiva de Colombia. De esta manera, se abordan dos objetivos que se potencian mutuamente:

(1) Se apoya la transición energética, aportando niveles relevantes de cobre producido de manera responsable y sostenible.

(2) Se impulsa la (re) industrialización del país, generando actividades que permitan diversificar la economía, generar más valor agregado y empleo de calidad, y reducir los impactos ambientales y sociales a nivel local.

Con todo, el crecimiento de la producción minera puede impulsar el desarrollo industrial, productivo y tecnológico de Colombia, integrando a los territorios en este proceso, incluyendo el desarrollo de empresas locales y la creación de empleo de calidad asociado en toda la cadena de valor minero. Adicionalmente, permitiría ir avanzando hacia la carbono-neutralidad en los encadenamientos aguas arriba y aguas abajo de la minería, contribuyendo a transformar a la economía colombiana hacia una que disminuya sus emisiones de gases de efecto invernadero.

Para lograr lo anterior, se puede plantear un desarrollo minero que impulse un proceso de (re) industrialización, descarbonización y desarrollo productivo y tecnológico cuidando la biodiversidad y el medio ambiente, mediante la caracterización de un proceso compuesto por sucesivas etapas en las que las fuentes de generación de valor sostenible (social, ambiental y económico) y de competitividad van cambiando. El desafío de proyectar en el largo plazo un desarrollo productivo y tecnológico de este tipo consiste en mantener un equilibrio entre los esfuerzos de generación de valor sostenible usando las capacidades existentes, y los esfuerzos para incubar y generar nuevas capacidades que serán los propulsores de crecimiento en el mediano y largo plazo. Las capacidades o factores originales de generación de valor y que inicialmente descansaban más en ventajas comparativas, van menguando y deben ser reemplazadas por nuevas capacidades basadas en mayor innovación y ventajas competitivas.

Este proceso de desarrollo en torno a la minería, y específicamente en relación con la minería del cobre, se presenta como un proceso evolutivo en el cual se pueden identificar las siguientes tres etapas consecutivas (ver Figura 1).

Figura 1 - Etapas en el desarrollo en torno a la minería (Ej. Cobre)

	ECONOMÍA REZAGADA	ECONOMÍA INTERMEDIA	ECONOMÍA AVANZADA
	Ventajas Comparativas		Ventajas Competitivas
	<i>Economía basada en el uso de los factores</i> Etapa I Creación las <u>capacidades críticas</u>	<i>Economía impulsada por la inversión</i> Etapa II Desarrollo la <u>base industrial</u>	<i>Economía impulsada por la innovación, inclusiva y sustentable</i> Etapa III Desarrollo del <u>sistema de innovación</u>
Principal fuente de competitividad	<ul style="list-style-type: none"> Abundante dotación de minerales de alta calidad 	<ul style="list-style-type: none"> Ganancias de eficiencia por fuerte inversión (Escala, nuevas prácticas e incorporación de tecnologías y equipos) 	<ul style="list-style-type: none"> Abundantes reservas mineras, pero de menor calidad (baja ley) Capacidades tecnológicas, de gestión e institucionales impulsan productividad
Capacidades productivas y tecnológicas (capacidades industriales)	<ul style="list-style-type: none"> Abundante dotación de minerales de alta calidad Actividad minera de escala baja a intermedia Desarrollo débil de encadenamientos (aguas arriba y aguas abajo) 	<ul style="list-style-type: none"> Gran escala productiva minera Surgen proveedores locales, con una mayor escala se desarrollan encadenamientos 	<ul style="list-style-type: none"> Gran escala en producción minera, existiendo minería grande, mediana y pequeña sofisticada Industrias de proveedores y encadenamientos con capacidades avanzadas
Origen de soluciones o innovaciones y tecnología más avanzadas	<ul style="list-style-type: none"> A través de importaciones 	<ul style="list-style-type: none"> Importaciones Presencia local de OEMs (Original Equipment Manufacturer) y empresas internacionales Capacidades tecnológicas locales adaptativas y de innovación incremental 	<ul style="list-style-type: none"> Importaciones OEMs y empresas internacionales con capacidades locales más sofisticadas Soluciones innovadoras locales en nichos de alta especialización

Exportaciones e internacionalización

- Mineral (Ej. Cobre) es la principal exportación
- Mineral (Ej. Cobre) es la principal exportación
- Surgen experiencias exportadoras y de internacionalización de proveedores
- Mineral principal exportación, mayor desarrollo de otros minerales y materiales e internacionalización
- Exportación e internacionalización de proveedores locales de servicios, productos y tecnologías

Desarrollo productivo y tecnológico (capacidad industrial) - Tiempo: varias décadas

Fuente: Urzúa, O (2020)

Estadio I – Creación de capacidades críticas:

La competitividad del sector descansa en las ventajas comparativas existentes, asociadas principalmente a su riqueza geológica. En esta etapa se establecen las capacidades críticas o básicas para habilitar el desarrollo de una minería de escala industrial. Esto último es el principal desafío de la etapa siguiente.

Ejemplo: Ecuador es un país con alto potencial minero en esta etapa de desarrollo en torno a la minería. Los primeros proyectos mineros de escala industrial (e.g. Fruta del Norte) son de vital importancia ya que representan un verdadero ejercicio piloto de los beneficios y nuevas capacidades que aporta el desarrollo minero. Estos podrían ser ampliados y profundizados si se desarrollan más inversiones y se fortalece el marco institucional y regulatorio necesario para el crecimiento del sector.

Estadio II – Desarrollo de la base industrial:

Desarrollo o expansión de la producción minera, impulsada por inversiones de calidad que permitan alcanzar una escala industrial de relevancia internacional. El aumento de la capacidad de producción está acompañado del desarrollo de encadenamientos aguas arriba y aguas abajo, comenzándose a configurar con más claridad lo que se puede considerar como un clúster minero.

Ejemplo: Chile se encuentra en el estadio II de desarrollo en torno a la minería. El país aprendió a realizar minería de escala industrial y luego, aprovechando su riqueza geológica incrementó significativamente su producción de cobre en las décadas de 1990 y 2000, transformándose en el principal productor a nivel mundial. Hoy Chile enfrenta el desafío de poder fortalecer e incrementar sus capacidades de innovación y sus encadenamientos productivos para lograr pasar a la Etapa III de desarrollo minero.

Estadio III – Desarrollo del sistema de innovación minero:

Consolidación de un sector minero maduro, tanto por contar con una alta capacidad productiva y con capacidades tecnológicas avanzadas y plenamente inserto en cadenas de valor globales. Las capacidades de innovación son una fuente de ventajas competitivas.

Ejemplo: Australia se encuentra en el estadio III, visto que la competitividad de su minería descansa tanto en su rica dotación de minerales, junto con su sistema de innovación minero avanzado compuesto por mineras, proveedores, centros tecnológicos y un conjunto de programas colaborativos entre actores. Los proveedores de la minería australiana son un sector económico que en 2014 exportaron más de 13 mil millones de dólares (METS Ignited, 2019).

Para desarrollar en Colombia la minería del cobre, incluyendo su procesamiento y sus encadenamientos, el país no arranca de cero. Además de disponer de minerales, tiene experiencias y capacidades relevantes que ha ido acumulando a lo largo del tiempo en sectores tales como petróleo, carbón o níquel, y también en la producción de químicos, maquinaria y equipo eléctrico, que permiten impulsar un desarrollo industrial moderno en torno a la minería del cobre y su procesamiento (metalurgia). Probablemente, el nivel de desarrollo minero colombiano para el caso del cobre se sitúa en un nivel avanzando dentro del Estadio I o al inicio del Estadio II. Adicionalmente, en relación con las capacidades de usar las tecnologías asociadas a la actual revolución tecnológica, Colombia se encuentra en la posición de un país intermedio según su FTI (*Frontier Technology Index*, por sus siglas en inglés), según se consigna en el último informe de la Conferencia de las Naciones Unidas sobre Comercio y Desarrollo (UNCTAD por sus siglas comunes en inglés) sobre tecnología e innovación, como se ilustra en la **Tabla 1**.

Tabla 1: Comparación del Ranking en el FTI (para 166 países) y PGB per cápita para selección de países (USD PPP,2017).

	Ranking						GDP per capita (PPP, USD 2017)
	Despliegue de TIC	Competencias (Personas)	Actividad I+D	Actividad Industrial	Acceso a financiamiento	Integrado (Listado de 166)	
Avanzados							
EE. UU.	11	18	2	16	2	1	64.703
Suecia	6	2	16	11	18	2	54.818
Alemania	24	17	5	12	40	7	53.56
Finlandia	22	5	21	20	30	8	49.586
Canadá	5	21	9	29	20	11	48.955
Australia	33	1	11	57	13	12	50.998
Noruega	3	6	27	50	6	13	67.462
China	117	92	1	8	4	35	18.188
Brasil	50	55	18	51	57	40	15.093
Intermedios							
Chile	62	46	40	103	19	48	25.886
Sud África	71	77	36	67	25	56	13.47
Costa Rica	63	53	88	39	67	57	21.987
México	70	73	45	31	96	61	19.547
Uruguay	55	47	84	63	116	63	24.427
Argentina	74	41	62	75	141	65	22.447
Panamá	66	89	102	40	27	71	33.266
Colombia	79	85	55	79	76	72	15.652
Rezagados							
Perú	86	59	72	136	74	84	12.744
Indonesia	102	107	50	47	97	85	12.41
Ecuador	89	96	76	113	87	90	10.859
Paraguay	67	105	131	133	86	98	13.531

- **Despliegue de TICs:** 1. Usuarios de Internet (porcentaje de la población); 2. Velocidad media de descarga (Mbps)
- **Competencias:** 1. Años previstos de escolarización; 2. Empleo altamente cualificado (% de la población activa)
- **Actividad de I+D:** 1. Número de publicaciones científicas sobre tecnologías de vanguardia; 2. Número de patentes registradas sobre tecnologías de vanguardia
- **Actividad Industrial;** 1. Exportaciones de manufacturas de alta tecnología (% del comercio total de mercancías); 2. Exportación de servicios digitales (% del comercio total de servicios)
- **Acceso a financiamiento;** Crédito interno al sector privado (% del PIB)

Fuente: UNCTAD, 2023; Banco Mundial, 2024

Los actuales niveles de absorción y aprendizaje tecnológico que tiene Colombia, si se ven acompañados por esfuerzos significativos de inversión para ampliar la producción primaria de cobre junto con un mayor procesamiento metalúrgico, permitirían al país consolidarse durante las próximas dos décadas como un actor minero significativo que opera en el Estadio II. Durante este periodo Colombia puede ir fortaleciendo sus capacidades tecnológicas, de ingeniería y diseño, junto con insertarse en circuitos internacionales de desarrollo tecnológico, e ir mejorando sus regulaciones y capacidades institucionales y de fiscalización para avanzar a la Etapa III en el futuro. En particular, la minería podría ser un habilitante para participar en el desarrollo de sectores productivos de alto potencial tales como son las soluciones de economía circular, el hidrógeno verde y los servicios ambientales especializados, entre otros.

El presente estudio examina la posibilidad de desarrollar la industria del cobre y producir cobre refinado localmente como un impulso a los esfuerzos de (re)industrialización del país que persigue el Gobierno de Colombia. Para ello, se profundiza en el análisis de escenarios para un proceso de industrialización moderno en torno al desarrollo de la industria del cobre en Colombia. Esto incluye un conocimiento de los procesos productivos y tecnologías disponibles para la producción de cobre refinado, la evaluación del contexto actual de la industria de refinación de cobre a nivel mundial, y las oportunidades que pueden existir para Colombia en toda la cadena de valor de la industria del cobre a partir de las condiciones y capacidades con las que cuenta y de las que carece el país para emprender un proyecto de refinación de cobre.

El reporte está estructurado de la siguiente manera. En el Capítulo 2 se realiza una revisión sobre las tecnologías de procesamiento de minerales para la producción de cobre refinado desde una perspectiva técnica y económica. El objetivo de este apartado es aportar antecedentes sobre las ventajas, desventajas y requerimientos técnicos-económicos de las distintas tecnologías conocidas, actuales y en desarrollo, con el objetivo de evaluar su viabilidad de implementación en Colombia. El Capítulo 3 aborda los aspectos económicos y estratégicos sobre los mercados que conforman la industria del cobre, desde la exploración hasta la producción de semi manufacturas de cobre, con el fin de identificar las ventajas, oportunidades y desafíos que enfrenta el país. Por último, en el Capítulo 4 se realiza un análisis estratégico sobre las opciones o escenarios que enfrenta Colombia para el desarrollo de los distintos eslabones de la cadena de valor de la industria del cobre, identificando la opción más viable y presentando una serie de líneas de acción y recomendaciones para el Estado y el sector minero colombiano en pleno.

2

Producción de cobre refinado: Alternativas tecnológicas y aspectos técnico-económicos



2.1 Introducción

- Los minerales de cobre suelen encontrarse en depósitos de distintos tipos, tales como pórfidos, estratoligados, sedimentarios, de hierro-cobre-oro, skarns, etc., y con leyes económicas en un rango entre 0,1 a más de 3,0% de cobre contenido. En ellos, el elemento cobre se encuentra en minerales sulfurados (sulfuros de cobre, que contienen azufre) u oxidados de cobre (óxidos de cobre, que contienen oxígeno). Estos últimos están asociados a distintos grupos minerales como óxidos, carbonatos, sulfatos, cloruros, etc., según las distintas clasificaciones mineralógicas más usadas (Jara, 2022).

Los minerales de cobre son extraídos del macizo rocoso mediante los procesos tradicionales de minería a cielo abierto o subterránea, mediante los procesos u operaciones unitarias de perforación/barrenado, tronadura/voladura, carguío y transporte/acarreo de mineral o material de mena (roca con contenido económico), y del lastre/material estéril (roca sin contenido del mineral o elemento de interés o con contenidos sub-económicos de estos).

Dependiendo de los tipos de minerales de cobre presentes en el depósito, el procesamiento para la obtención del producto final, cobre refinado (más de 99% cobre o Cu por su símbolo), consta esencialmente de dos vías o alternativas de procesamiento (Jara, 2022; ver Figura 2):

1

Minerales sulfurados

En la mayoría de los casos el mineral ingresa a una planta concentradora que utiliza los procesos u operaciones unitarias de chancado/trituración primaria, molienda, flotación, y tratamiento de productos y residuos (transporte y filtrado de concentrados; y espesado y disposición final de colas o relaves en tranques, presas o depósitos).

2

Minerales oxidados

El mineral ingresa a una planta hidrometalúrgica que utiliza los procesos u operaciones unitarias de trituración primaria, secundaria y terciaria, lixiviación en pilas, extracción por solventes y electro-obtención.

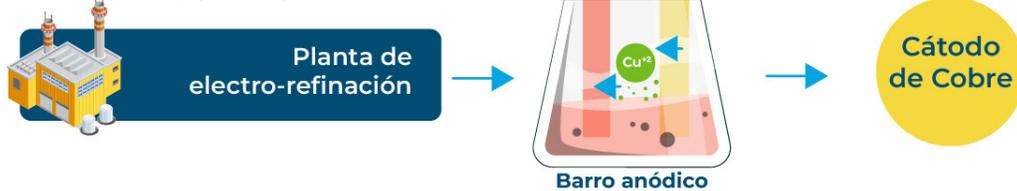
En el primer caso se obtiene un producto intermedio, pero que es comercializable: el concentrado de cobre, consistente en un polvo fino (usualmente bajo #140 ASTM o menor a ~100 μm) que presenta concentraciones de entre 25 y 35% Cu, en forma de sulfuros, siendo la calcopirita (CuFeS_2), el mineral más común en los concentrados de cobre, más algunas impurezas (Videla, 2019). En el segundo caso se obtiene un producto final comercializable que son los cátodos electro-obtenidos de cobre (cobre refinado), con una pureza de 99,99% Cu.

Figura 2: Vías de procesamiento de minerales de cobre para la obtención de cobre refinado (superior). Procesos de electro-refinación (ER) y electro-obtención (EW) para la obtención de cátodos de cobre (inferior).



Electro-refinación (ER)

La fuente de Cu es un ánodo de cobre "impuro" (99.5%), se disuelve en electrólito ácido y se deposita sobre un cátodo (99.99%)



Electro-obtención (EW)

La fuente de Cu es la solución proveniente de SX. El Cu se deposita en forma de cátodo de 99.99% de pureza.



Fuente: Videla (2019) y elaboración adaptada de Voisin (2018)

Por lo tanto, para los minerales sulfurados son necesarias otras etapas de procesamiento para obtener cobre metálico o refinado de alta pureza. A estos procesos se les conoce como la vía pirometalúrgica/electrometalúrgica para la producción de cobre refinado, debido a que utilizan procesos a altas temperaturas y electricidad para producir el cobre refinado (Saravia, 2019).

Ahora, antes de entrar a revisar las alternativas tecnológicas para la producción de cobre refinado a partir de concentrados de cobre, es importante señalar que, debido a temas de costos de transporte y logística, financieros y de gestión, la operación de la mina (extracción de minerales) ha estado intrínsecamente ligada a la operación de las plantas concentradoras y/o las plantas hidrometalúrgicas en la industria del cobre. Esto es, dependiendo de los minerales presentes en el depósito a explotar, las plantas concentradoras y/o las plantas hidrometalúrgicas forman parte de los proyectos y de las operaciones mineras de cobre. Por otro lado, en sus inicios las plantas pirometalúrgicas/ electrometalúrgicas (FURE) también eran parte de los complejos productivos de la minería del cobre. Sin embargo, en las últimas décadas las FURE se han ido, en muchos casos, desintegrando de la cadena de valor de la minería del cobre, o se han desarrollado en forma independiente de las operaciones mineras, ya que como negocio presentan características distintas a la industria minera (Jara, 2019).



En este capítulo se revisan las principales tecnologías actualmente disponibles o en desarrollo, para la producción de cobre refinado a partir de concentrados de cobre. Esto para profundizar el análisis sobre los caminos que existen para avanzar hacia la producción de cobre refinado en Colombia como parte de los esfuerzos nacionales de (re) industrialización.

El análisis se focaliza en la producción a partir de concentrados de cobre por tres motivos:

1

La mayor parte de la producción mundial de cobre de mina proviene de minerales sulfurados, con un 83% de participación a nivel mundial (Cochilco, 2022a) y se espera esto se replique en el desarrollo de la minería del cobre en Colombia.

2

La mineralización de óxidos de cobre es escasa en zonas tropicales o de alta pluviometría, como son los territorios o franjas metalogénicas con potencial para mineralización de cobre en Colombia.

3

El procesamiento de minerales de cobre por la vía hidrometalúrgica en pilas de lixiviación se dificulta en zonas con altas precipitaciones debido al riesgo de inestabilidad geotécnica de las pilas por la saturación del material particulado y al manejo de las soluciones durante el proceso de lixiviación.

No obstante, como se verá más adelante, está desarrollándose la posibilidad de utilizar la vía hidrometalúrgica para lixiviar concentrados de cobre en reactores de agitación o en autoclaves, proceso que no es impactado significativamente por las condiciones climáticas previamente descritas de Colombia.

De este modo, en la sección 2.2 se revisan las alternativas disponibles para el procesamiento de concentrados mediante la vía pirometalúrgica, analizando aspectos técnicos y económicos de dichas alternativas tecnológicas. Luego, en la sección 2.3 se presentan las tecnologías, actualmente en desarrollo, para aplicar la vía hidrometalúrgica a la producción de cobre refinado a partir de la lixiviación de los concentrados de cobre en reactores o autoclaves. Esta es una alternativa distinta a las presentadas previamente, que conjuga ambas líneas de producción mostradas en la Figura 2 considerando los procesos de la planta concentradora, la lixiviación de los concentrados, y la producción de cátodos de cobre a partir de los procesos de extracción por solventes y electro-obtención. Finalmente, el capítulo cierra con algunas conclusiones y recomendaciones.



2.2 Vía pirometalúrgica para la producción de cobre refinado a partir de concentrados de cobre

La vía pirometalúrgica/electrometalúrgica considera dos grandes etapas para la producción de cobre refinado a partir de concentrados: la fundición (FU) y la refinación (RE). A su vez, un complejo metalúrgico FURE considera los siguientes procesos u operaciones unitarias: secado, fusión, conversión, y refinación a fuego y/o electro-refinación (Videla, 2019; Jara, 2022). Además, existen procesos anexos que complementan la producción de cobre refinado que son la tostación, la limpieza de escorias y el tratamiento de gases. Por otro lado, los procesos de refinación a fuego y electro-refinación pueden estar ambos presentes, uno de los dos, o ninguno de ellos (en este último caso, el producto final es cobre blíster y no refinado, con un 95-98,5% Cu).

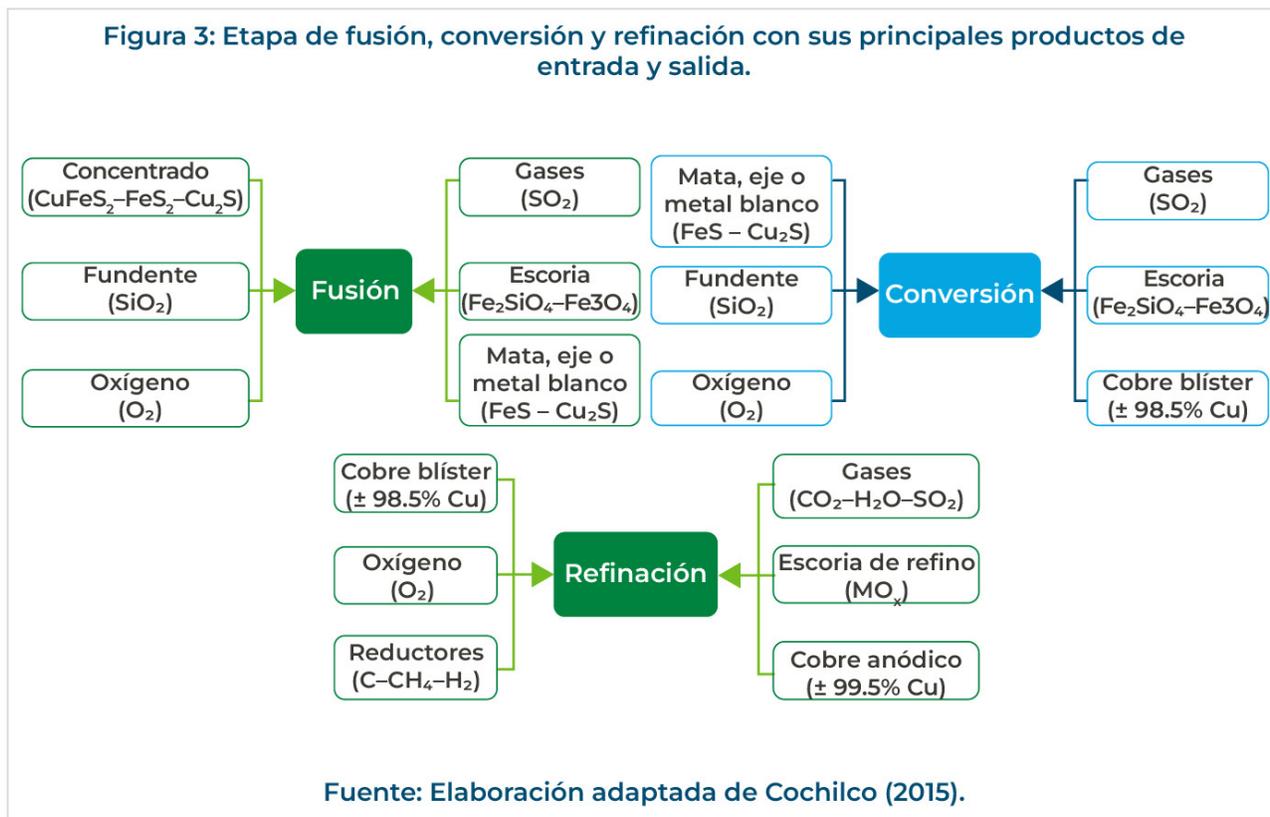
La **etapa de secado**, como su nombre indica, consiste en secar el concentrado rico en cobre que proviene del proceso de flotación y filtrado para obtener una humedad óptima para la tecnología de fusión específica que posea la fundición (Saravia, 2019; Schlesinger et al., 2021).

La **etapa de fusión** es la primera etapa que comprende una concentración en el contenido de cobre en el producto. El concentrado que proviene de flotación y posterior secado contiene aproximadamente un 25-35% de cobre, el cual ingresa a los hornos de fusión que tienen una temperatura interna cercana a los 1200°C, permitiendo la descomposición del concentrado en gases, escoria y mata (eje o metal blanco), éste último con un contenido de cobre entre un 50-70% (Cochilco, 2015; Videla, 2019; Schlesinger et al., 2021).

Con el fin de eliminar impurezas como el hierro, azufre, entre otros elementos de la mata de cobre, se realiza la **etapa de conversión** mediante dos procesos: soplado de escoria y soplado a cobre. En el primero se oxidan los sulfuros de hierro, generando escoria fayalítica y dióxido de azufre. Este proceso se mantiene hasta alcanzar niveles menores a 1% de sulfuro de hierro contenido en la mata de cobre (Cochilco, 2015; Schlesinger et al., 2021). El segundo proceso libera el cobre contenido en el sulfuro de cobre mediante la reacción con oxígeno, formando dióxido de azufre y cobre metálico – llamado cobre blíster (Cochilco, 2015; Schlesinger et al., 2021).

El cobre blíster, que posee entre 95 a 98,5% de cobre contenido, aún contiene oxígeno y azufre que deben ser eliminados para evitar posibles ampollas de dióxido de azufre (SO₂) en el ánodo, por lo que requiere de una última etapa de procesamiento, la **etapa de refinación**. Ésta se divide en dos sub-etapas, la primera de ellas consistente en la eliminación del hierro, azufre y otras impurezas metálicas presentes en el cobre por medio de la oxidación y escorificación (Cochilco, 2015; Schlesinger et al., 2021). Con motivo de la continua inyección de oxígeno en la sub-etapa anterior, existe un aumento de oxígeno disuelto en el cobre, siendo necesario una reducción de oxígeno que se consigue con la inyección de reductores, tales como hidrocarburos sólidos, líquidos o gaseosos que suministran C, CO o H₂, y que forman dióxido de carbono o vapor de agua. De esta etapa se obtiene el cobre anódico, con un porcentaje de cobre del 99,5% (Cochilco, 2015; Schlesinger et al., 2021).

La Figura 3 muestra cada una de las etapas descritas anteriormente, con sus principales productos de entrada (*inputs*) y salida (*outputs*).



2.2.1 Tecnologías de fusión-conversión

Las tecnologías de fusión se pueden agrupar en tres tipos, según la ocurrencia del proceso de fusión del concentrado (Cochilco 2015):

- ▶ **Fusión por calentamiento directo:** su representante principal corresponde al horno de reverbero, donde el calor necesario para el proceso de fusión es obtenido a través de la combustión de hidrocarburos. Las principales desventajas y/o deficiencias de esta tecnología son la ineficiencia térmica, el bajo contenido de dióxido de azufre en los gases generados y la alta emisión de contaminantes y de gases de efecto invernadero a la atmósfera (Cochilco, 2015).
- ▶ **Fusión en baño:** estas tecnologías aprovechan la energía producida por las reacciones de oxidación que ocurren dentro del reactor. Ejemplos de reactores de fusión en baño lo componen las siguientes tecnologías: Teniente, Noranda, Isasmelt, Ausmelt y Mitsubishi (Cochilco, 2015). Adicionalmente, en este grupo se encuentran las tecnologías emergentes chinas de soplado superior (*top-blowing smelter*, TBS), soplado lateral (*side-blowing smelter*, SBS) y soplado inferior (*bottom-blowing smelter*, BBS).

- ▶ **Fusión por inyección en baño líquido (flash):** estas tecnologías también aprovechan la energía calórica producida por las reacciones de oxidación, pero se basan en la combustión de las partículas de concentrado en suspensión en altas torres de reacción. Las principales tecnologías asociadas a la fusión por inyección en baño líquido son Outotec e INCO (Cochilco, 2015).
- ▶ **Otras tecnologías de fusión:** existen otras tecnologías de fusión, tales como los hornos de fusión eléctricos, que presentan ventajas en usos específicos o que están en desuso debido a algunas de sus características.

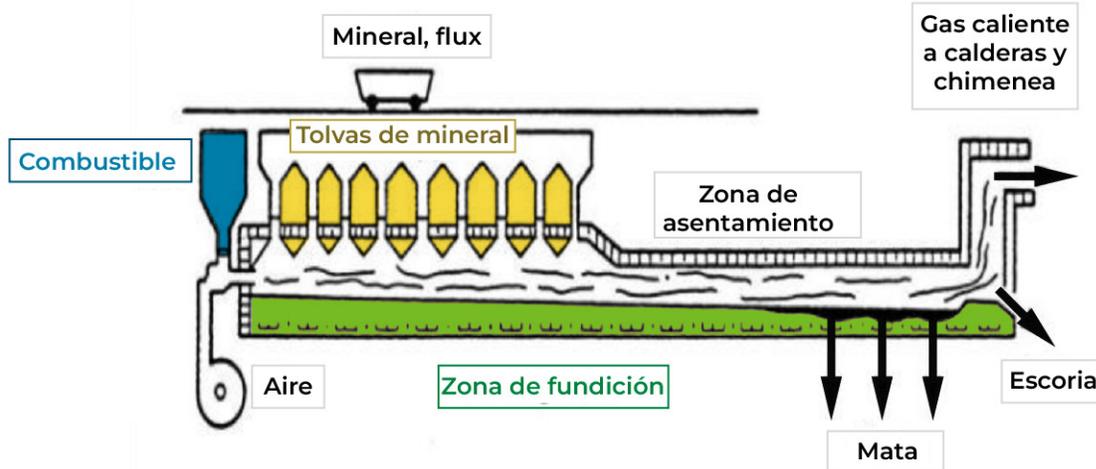
Por otro lado, las **tecnologías de conversión discontinua** se basan en el hecho de que la conversión de la mata de cobre debe realizarse en distintas cargas (proceso *batch*), las cuales deben esperar el término de una para continuar con la siguiente carga. En este caso, se destaca principalmente el convertidor Pierce – Smith (CPS), el cual se basa en la rotación del horno y una boca central que permite descargar la escoria y el cobre blíster producido (Cochilco 2015; Schlesinger et al., 2021).

La tendencia en las tecnologías de fusión-conversión es ir hacia procesos más continuos, menores pérdidas metalúrgicas de cobre en el concentrado, correcto control y captura de gases producidos en el proceso, y una mayor tasa de reacción (capítulo 5 de Schlesinger et al., 2021). Para ello, la conversión continua se basa en el ingreso constante de mata de cobre y una extracción continua del cobre blíster generado. En este aspecto, se destacan las tecnologías de conversión Flash y Mitsubishi, junto a los nuevos desarrollos de tecnología de conversión continua china y los hornos Ausmelt C3 (capítulo 9 de Schlesinger et al., 2021). A continuación, se presenta una breve descripción de los principales equipos/tecnologías de fusión.

2.2.1.1 | Horno de reverbero

Esta tecnología funciona por medio de la fusión por calentamiento directo, donde el concentrado se funde por el calor liberado por la quema de combustibles fósiles, obteniendo como producto mata de cobre y una escoria que posteriormente se sangran. Sus principales desventajas es la formación de un doble piso de escoria intermedia, bajo contenido de SO₂ en los gases, baja eficiencia térmica y grandes emisiones poco controladas de gases y polvo (Saravia, 2019; Voisin, 2019).

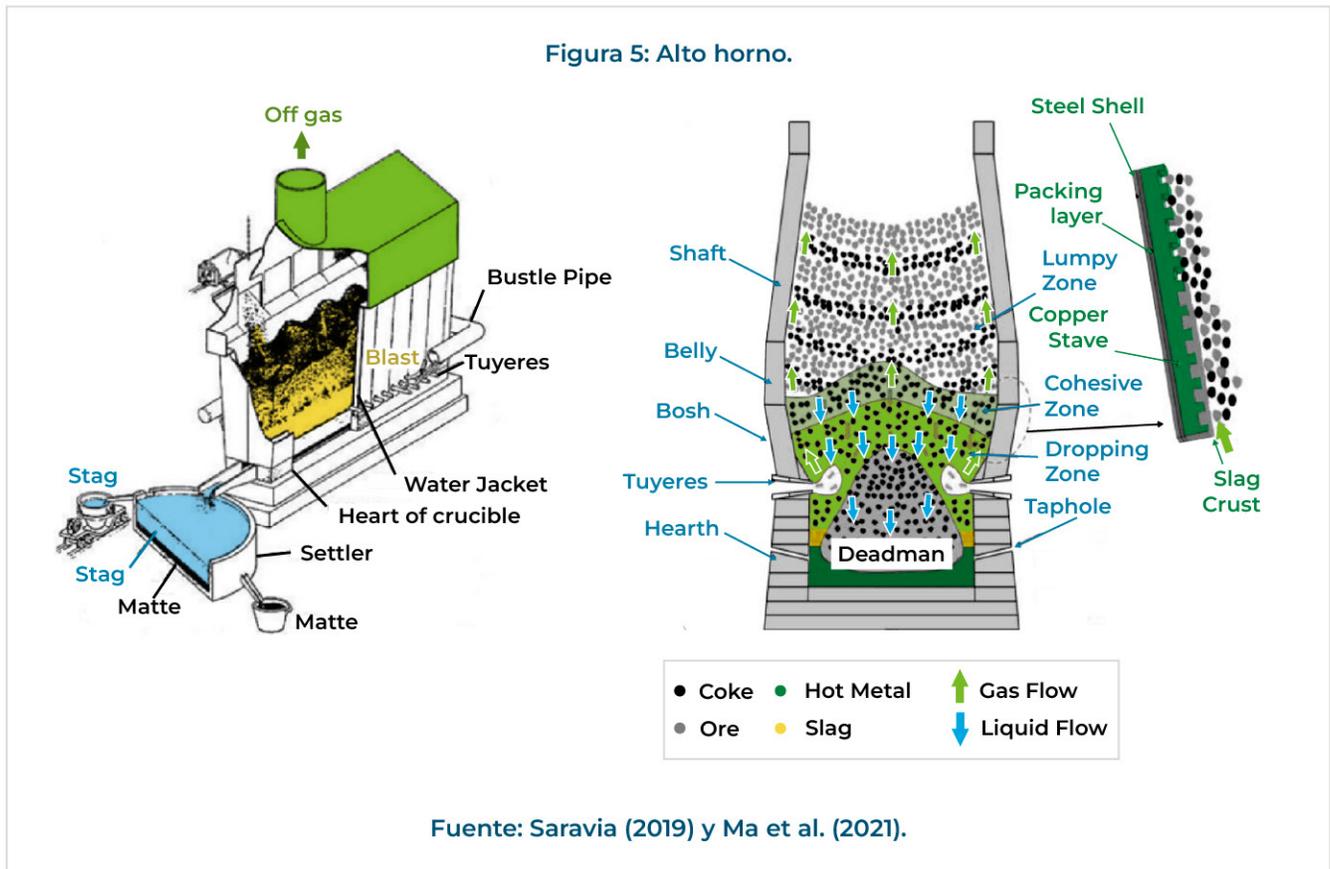
Figura 4: Esquemática del horno reverbero.



Fuente: Saravia (2019).

2.2.1.2 | Alto horno (*Blast furnace*)

Consiste en un alto horno que opera en contracorriente. En esta tecnología el concentrado, fundente y coque descienden por un eje vertical mientras que los gases calientes ascienden por el mismo eje. Como producto se obtienen una escoria y una mata líquidas que se descargan en un sedimentador para su posterior separación. Actualmente, esta tecnología se encuentra en desuso por el impacto ambiental que provoca, su baja eficiencia energética, y debido a que no es adecuado para trabajar con concentrados obtenidos mediante flotación de minerales sin una preparación previa (pelletización del concentrado) (Saravia, 2019).

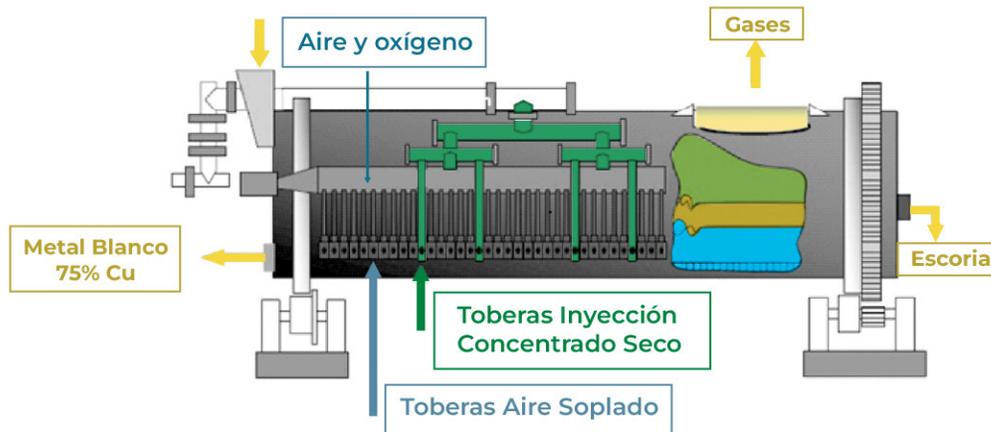


2.2.1.3 | Convertidor Teniente (CT)

El convertidor Teniente fue desarrollado por el fracaso de la tecnología Oxygen Smelting de fusión de concentrados en convertidores, debido al balance de calor y arrastre de concentrado en los gases. Como productos se obtiene metal blanco con leyes de 72-75% Cu, y escoria cercana a la saturación en magnetita con contenidos de entre 6 y 8% Cu. Posteriormente, el metal blanco es enviado a convertidores convencionales (usualmente CPS) y la escoria a hornos de limpieza (Voisin, 2019).

Esta tecnología posee una característica de alta velocidad de reacción por la turbulencia en el baño, y produce una baja cantidad de polvos metalúrgicos arrastrados en los gases (Saravia, 2019). Antecedentes adicionales se pueden encontrar en la sección 7.2 del capítulo 7 en Schlesinger et al. (2021).

Figura 6: Convertidor Teniente.

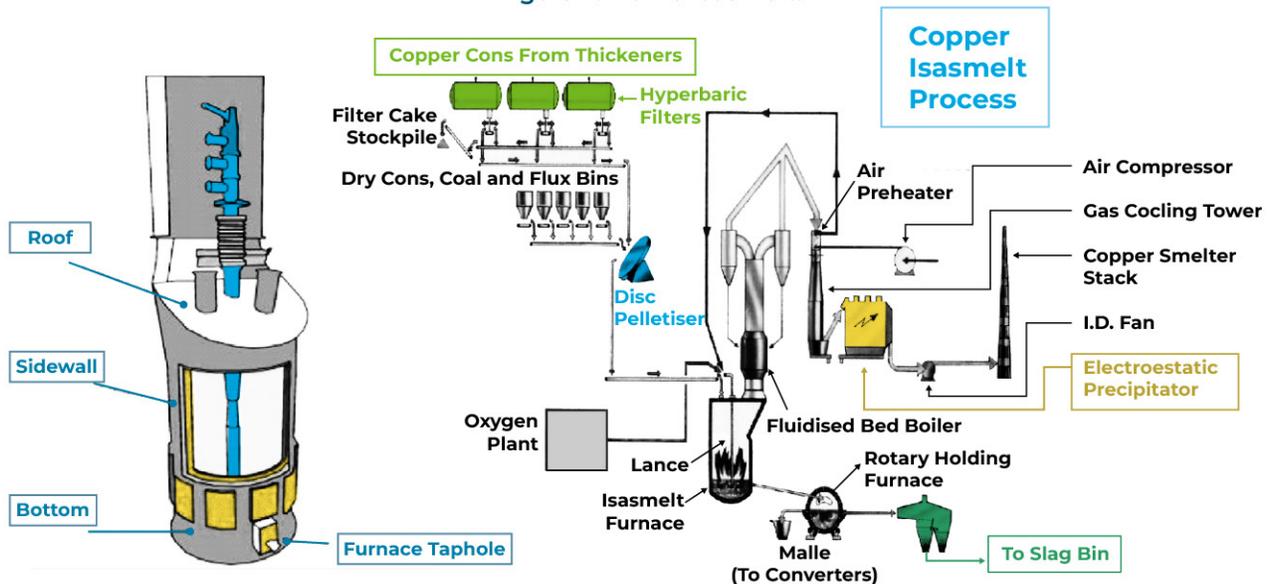


Fuente: Voisin (2019).

2.2.1.4 | Tecnología de lanza sumergida (TSL) – Isasmelt y Ausmelt

Esta tecnología es parte de las fusiones en baño, donde en un recipiente vertical se inserta una lanza de combustión sumergida en un baño de material fundido. Sus ventajas son que genera bajas cantidades de polvos metalúrgicos y altas concentraciones de SO₂ producto del enriquecimiento del aire (Saravia, 2019). Tanto las tecnologías Ausmelt como Isasmelt son procesos de fusión por lanza, diferenciándose solamente por el origen de la patente tecnológica. Antecedentes adicionales se pueden encontrar en la sección 7.4 del capítulo 7 en Schlesinger et al. (2021).

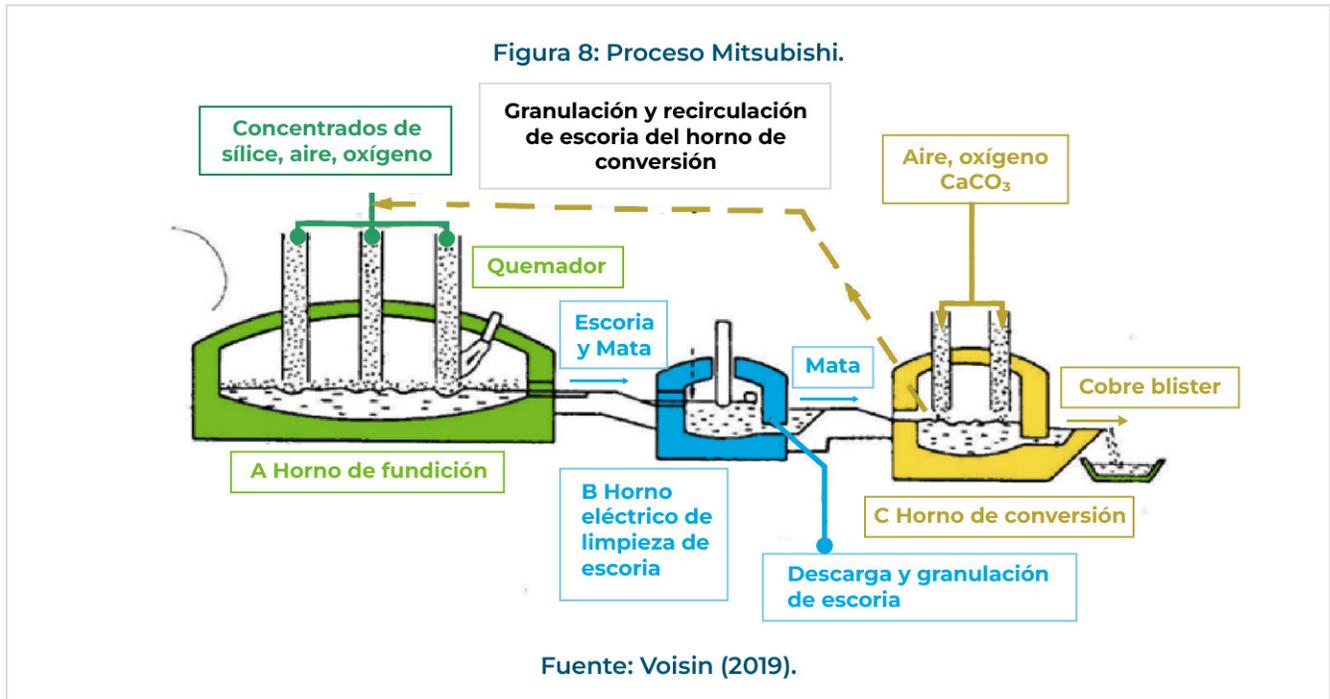
Figura 7: Horno Isasmelt.



Fuente: Saravia (2019) y Errington et al. (1997).

2.2.1.5 | Proceso Mitsubishi

Al igual que la tecnología de lanza sumergida, el proceso Mitsubishi es una fusión en baño. Consta de dos etapas, fusión y conversión continua, por lo que se compone de un horno de fusión, un horno de limpieza y un horno de conversión que se conectan mediante canaletas. En el horno de fusión se forma una mezcla de eje (mata) y escoria, la cual fluye hacia el horno de limpieza donde el eje se separa de la escoria de descarte. Finalmente, el eje fluye al horno de conversión para formar el cobre blíster y la escoria de conversión es recirculada al horno de fusión (Saravia, 2019). Antecedentes adicionales se pueden encontrar en la sección 9.3 del capítulo 9 en Schlesinger et al. (2021).

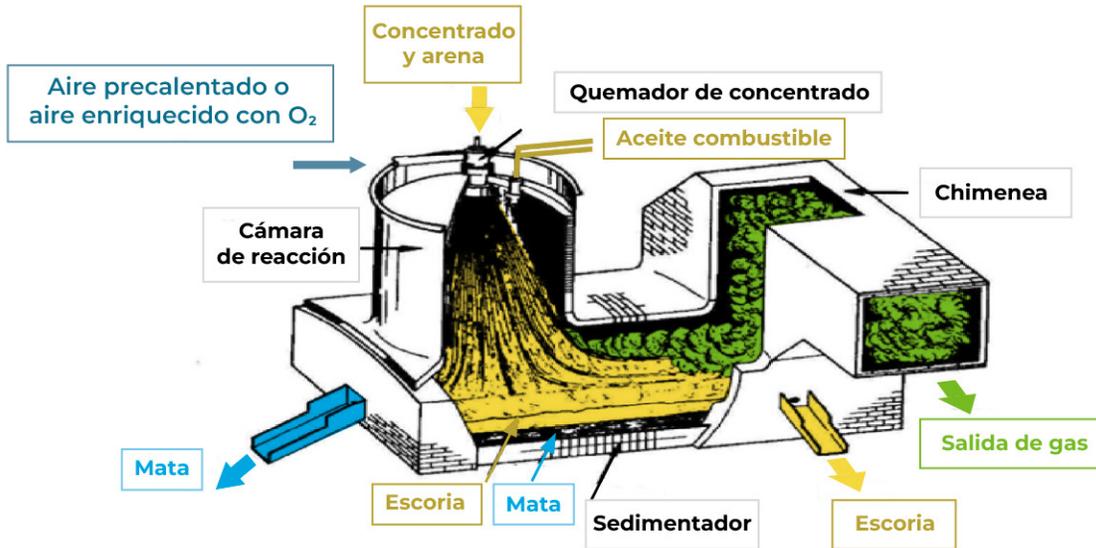


2.2.1.6 | Fusión en baño líquido (Flash) – Outokumpu e Inco

Este tipo de tecnología tiene la particularidad de combinar las operaciones de tostación, fusión y parcialmente conversión en un solo reactor. Existen dos versiones comerciales que son Outokumpu e Inco. Estas tecnologías están compuestas por un quemador de concentrado, una cámara de reacción, un sedimentador y una chimenea para la salida de los gases (Voisin, 2019).

La ventaja de esta tecnología es el uso eficiente de la energía, dada la utilización de la oxidación del concentrado como aporte calórico, lo que implica un bajo consumo de combustible. Además, permite una alta tasa de recuperación de azufre (Saravia, 2019). Antecedentes adicionales se pueden encontrar en el capítulo 6 en Schlesinger et al. (2021).

Figura 9: Horno Flash de Outokumpu.

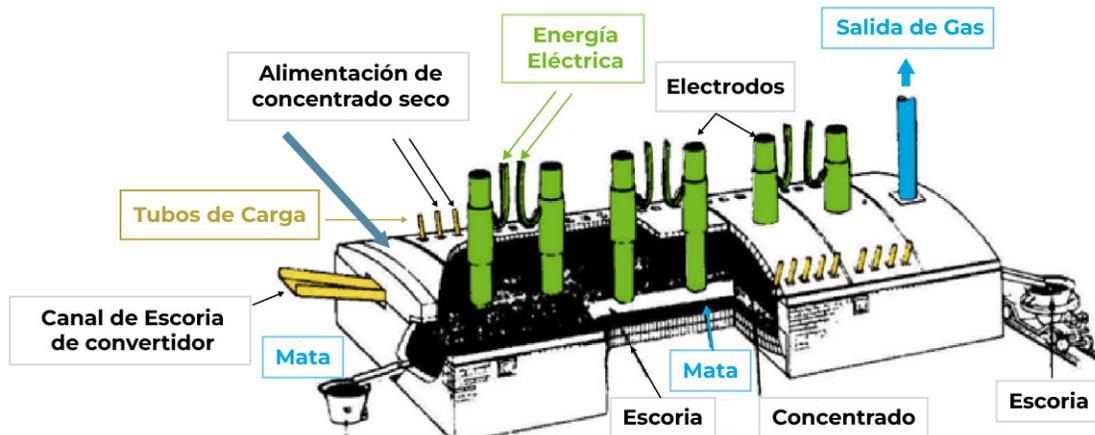


Fuente: Voisin (2019).

2.2.1.7 | Horno Eléctrico

Utiliza el calor generado por la resistencia de la escoria al paso de una corriente de alto amperaje entre los electrodos de carbón sumergidos en la escoria. Posee la ventaja de tener un buen control de la viscosidad de la escoria, permitiendo bajas pérdidas de cobre. Se producen pequeñas cantidades de gas, se tiene un buen control de la concentración de SO₂ y un excelente control de la temperatura y de las condiciones de oxidación. A pesar de esto, su uso está directamente relacionado a lugares donde la electricidad es abundante y de bajo costo (Saravia, 2019).

Figura 10: Horno eléctrico.

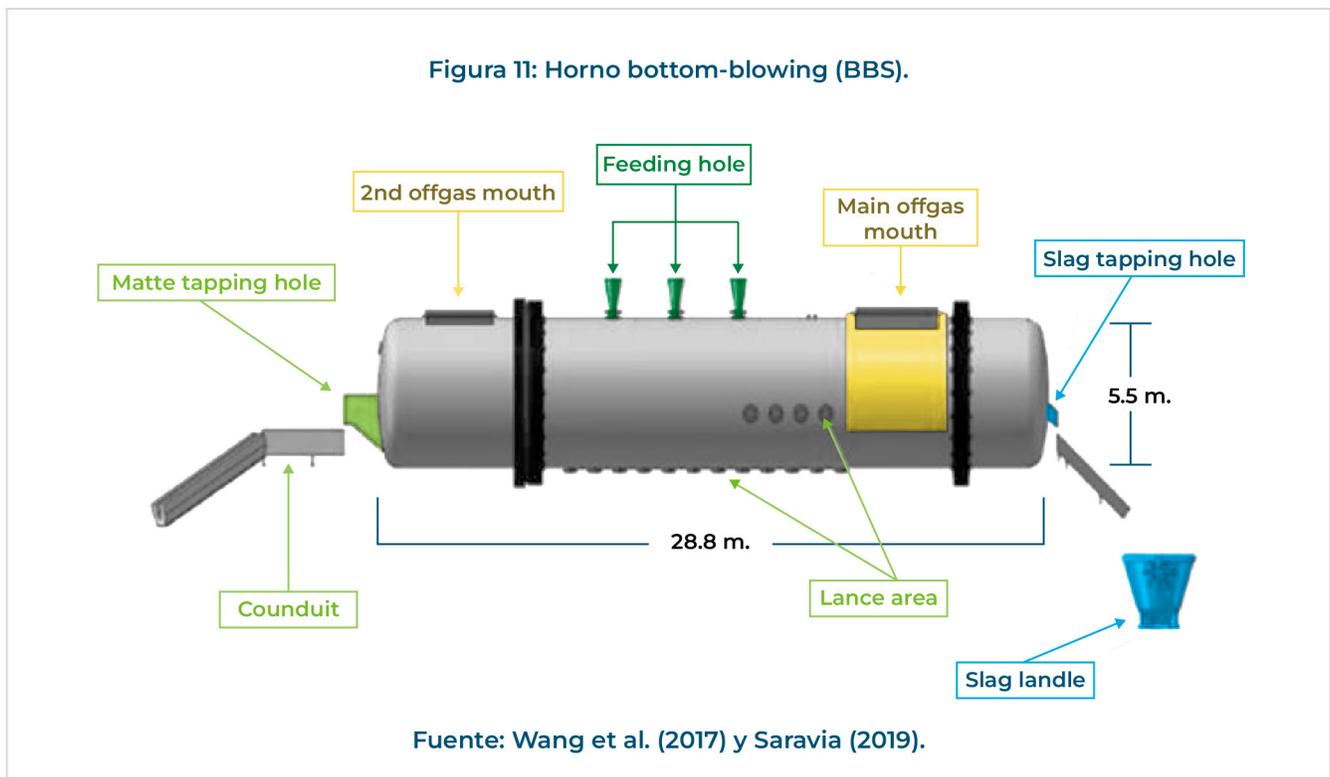


Fuente: Voisin (2019).

2.2.1.8 | Tecnologías emergentes – TBS, SBS y BBS

Actualmente las fundiciones en China han experimentado un notable crecimiento, asociado al desarrollo tecnológico y mejoras en la eficiencia que se le ha dado a los procesos y al negocio de procesamiento de concentrados de cobre (Cochilco, 2015). Estas tecnologías corresponden a las de fusión de soplado superior (*top-blowing*), lateral (*side-blowing*) e inferior (*bottom-blowing*), que consisten en tecnologías de baño que se diferencian por la posición del ingreso de aire al reactor (Cochilco, 2015; Saravia, 2019).

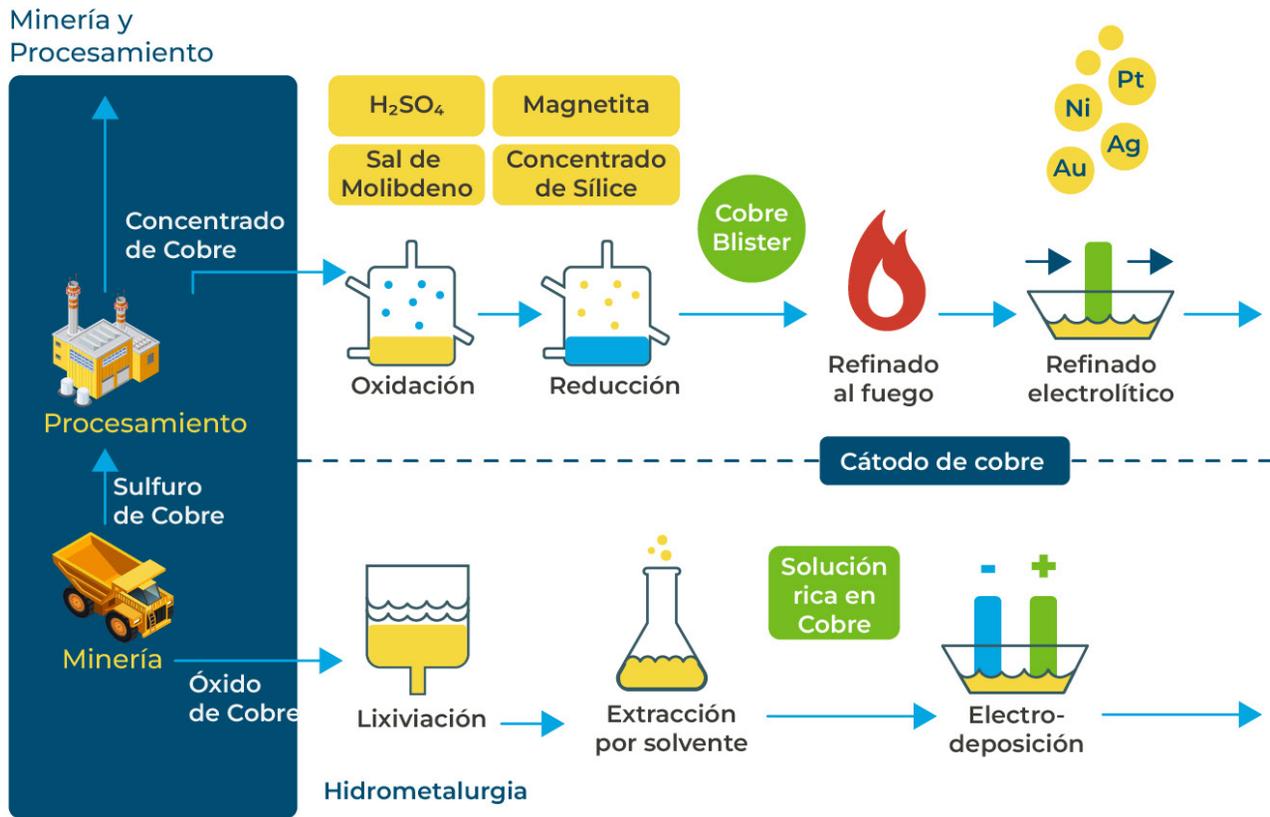
El concentrado es oxidado por una corriente de aire enriquecido, inyectado directamente en el baño fundido por toberas. Como productos se obtienen metal blanco, escoria con bajos contenidos de cobre y gases de proceso. Las principales ventajas de estas tecnologías es que permiten altas velocidades de reacción por la mayor energía de burbujeo, aumento de vida útil de las lanzas, bajo arrastre de polvos metalúrgicos y buen control de la formación de escoria (Saravia, 2019). Antecedentes adicionales de estas tecnologías se pueden encontrar en la sección 7.5 del capítulo 7 en Schlesinger et al. (2021), y en Zhao y Liao (2022).



2.2.1.9 | Tecnología Green Copper

Finalmente, cabe destacar una tecnología que está en etapa de pruebas en planta piloto (TRL [Technology Readiness Level – nivel de madurez tecnológica] entre 5 y 7), y que busca revolucionar el procesamiento de concentrados de cobre mediante procesos de oxidación/reducción en reactores y el uso de hidrógeno verde. Su objetivo es múltiple: reducir la escala de las plantas de procesamiento de concentrados de cobre económicamente rentables, aumentar la recuperación y reutilización de los desechos, y disminuir la huella ambiental del proceso (UdeC, 2020).

Figura 12: Figura esquemática procesos tecnología Green Copper.



Fuente: UdeC (2020).

El nuevo proceso está siendo desarrollado por un equipo de investigadores de la Universidad de Concepción en Chile (UdeC, 2020). Green Copper es una tecnología disruptiva de oxidación-reducción que opera en fase sólido/gas a 800-850°C en reactores cerrados, logrando un aprovechamiento completo del concentrado, generando subproductos comercializables y con cero escorias. Además, usa hidrógeno verde en la etapa de reducción y genera energía excedente. Por otro lado, el proceso utiliza operaciones unitarias confirmadas, minimizando el riesgo tecnológico. Adicionalmente, el proceso captura sobre 99% del azufre y arsénico del concentrado, y permite recuperar sobre 99% del cobre y sobre 80% del molibdeno alimentado al sistema, generando además subproductos de hierro y sílice (UdeC, 2020).

Hasta el momento se ha realizado un extenso programa de pruebas en laboratorio y semi-piloto (TRL 4-5) en las instalaciones de la Universidad de Concepción que avalan las hipótesis de trabajo, y se cuenta con una estimación de costos de capital y operacionales clases 3-4. Estos trabajos muestran que, para diferentes escalas de desarrollo, la tecnología sería competitiva con los procesos tradicionales de fusión-conversión (UdeC, 2020).

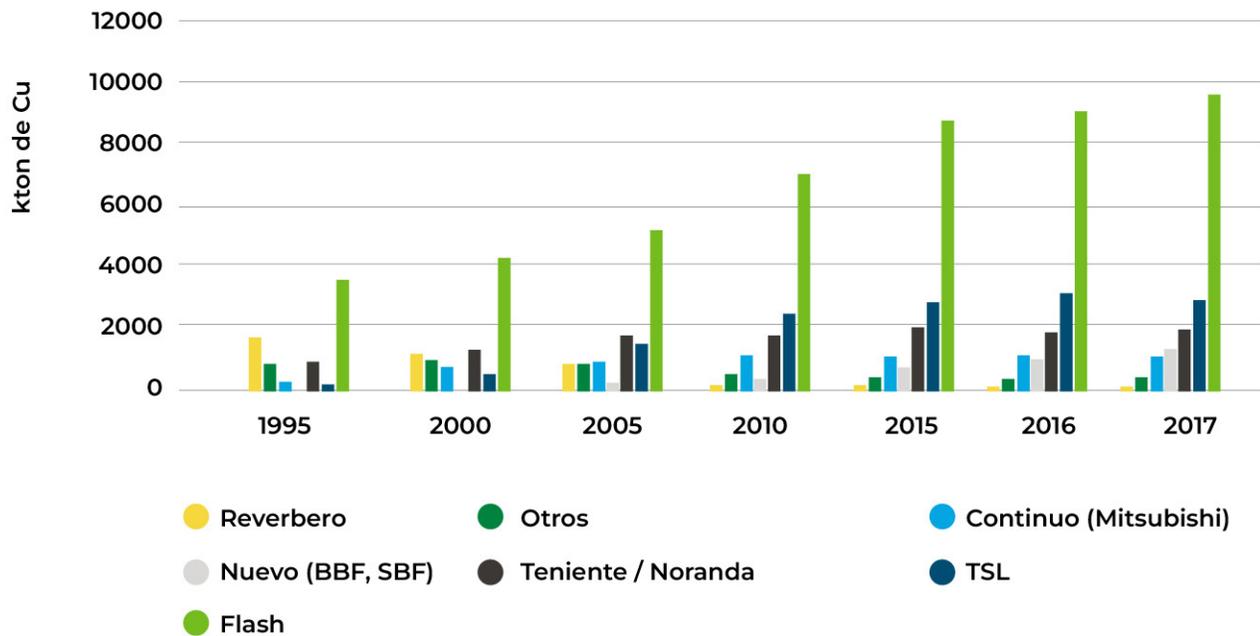


2.2.2 Mercado y costos de fundiciones en el mundo

2.2.2.1 | Producción de cobre fundido (anódico)

La producción de cobre fundido según el tipo de tecnología ha variado durante las últimas décadas. Un ejemplo es la tecnología de horno reverbero, que pasó de ser la segunda tecnología con mayor producción en 1995, a tener una producción de cobre fundido casi nula en 2017. Por el contrario, las tecnologías flash y TSL experimentaron un crecimiento constante desde 1995 a 2017, al igual que las tecnologías emergentes chinas en los últimos 15 años (Saravia, 2019). Estas tendencias se pueden observar en la Figura 13.

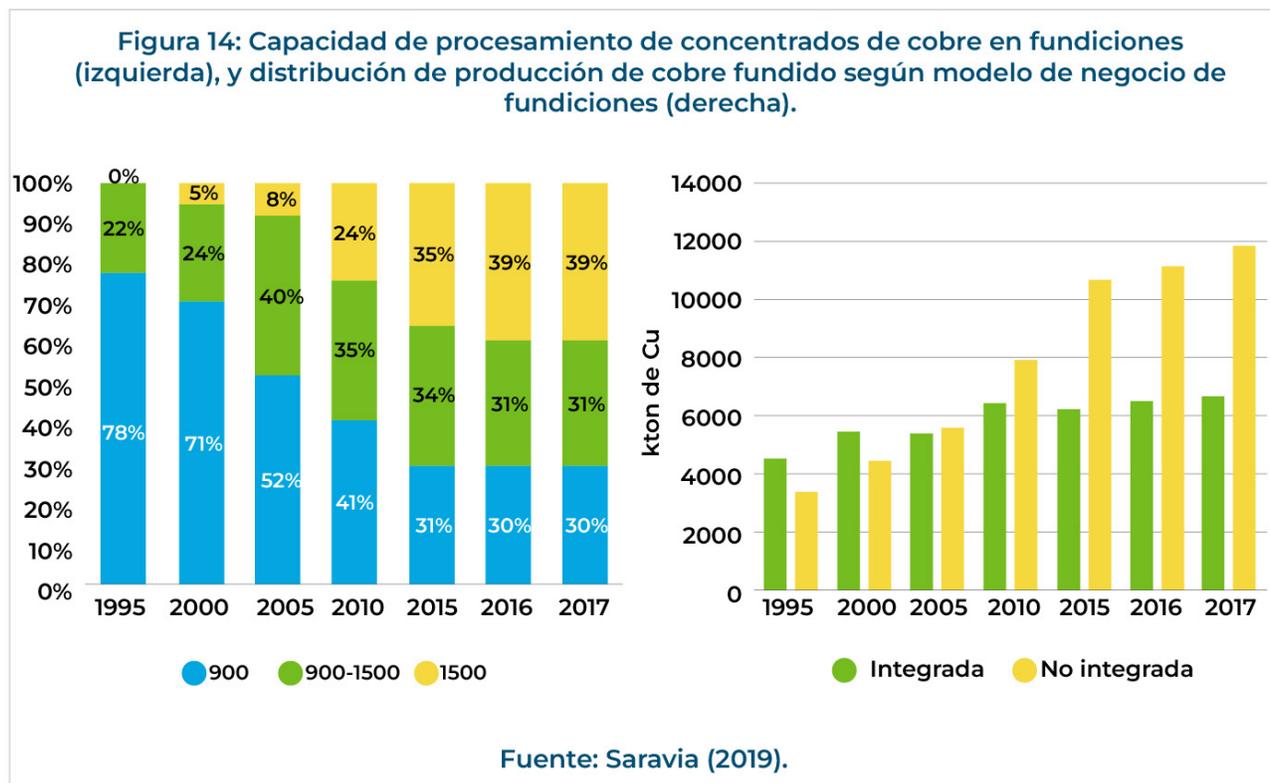
Figura 13: Producción de cobre fundido según tipo de tecnología de fusión.



Fuente: Saravia (2019).

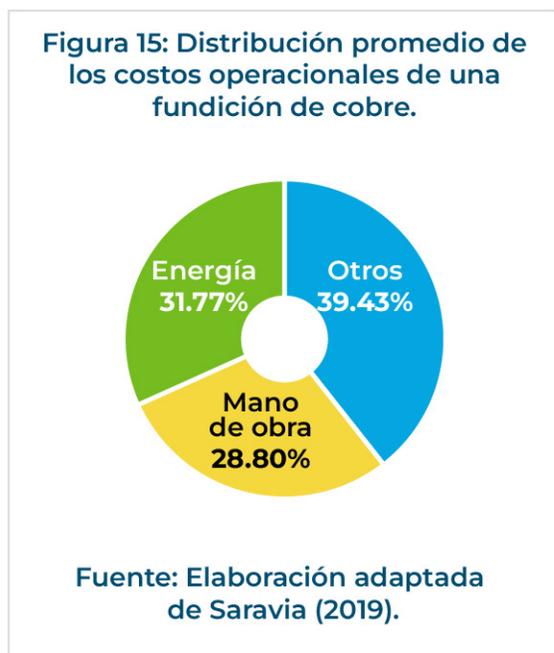
En el caso de la capacidad de procesamiento de concentrados, se aprecia un incremento de la participación de complejos pirometalúrgicos con capacidades mayores, y una pérdida de relevancia de fundiciones con capacidades de procesamiento bajo las 900 mil toneladas de concentrado al año. Estas últimas pasaron de representar más de tres cuartas partes de la capacidad de fusión mundial en 1995 a menos de un tercio en 2017. Los complejos con capacidades de procesamiento anuales mayores a un millón y medio de toneladas de concentrados, mientras que no existían al inicio del período de análisis, actualmente representan más de 40% del mercado mundial (Saravia, 2019). Esto en parte refleja las economías de escala que presenta la industria (Jara, 2019), además de ser un resultado esperable dadas las políticas de consolidación de la industria de fundición y refinación de cobre llevadas a cabo por el gobierno chino en las últimas dos décadas.

Por otro lado, en cuanto al modelo de negocio de las fundiciones, también se aprecia un cambio relevante en las últimas décadas. Mientras que en 1995 las fundiciones integradas (que eran parte de una operación minera) eran responsables de más de 60% de la producción de cobre fundido a nivel mundial, hoy las fundiciones independientes o no integradas (*custom smelters*) representan casi dos tercios de la producción global (Saravia, 2019). Estos dos procesos de cambio en el mercado mundial de fundiciones se pueden apreciar en la Figura 14.



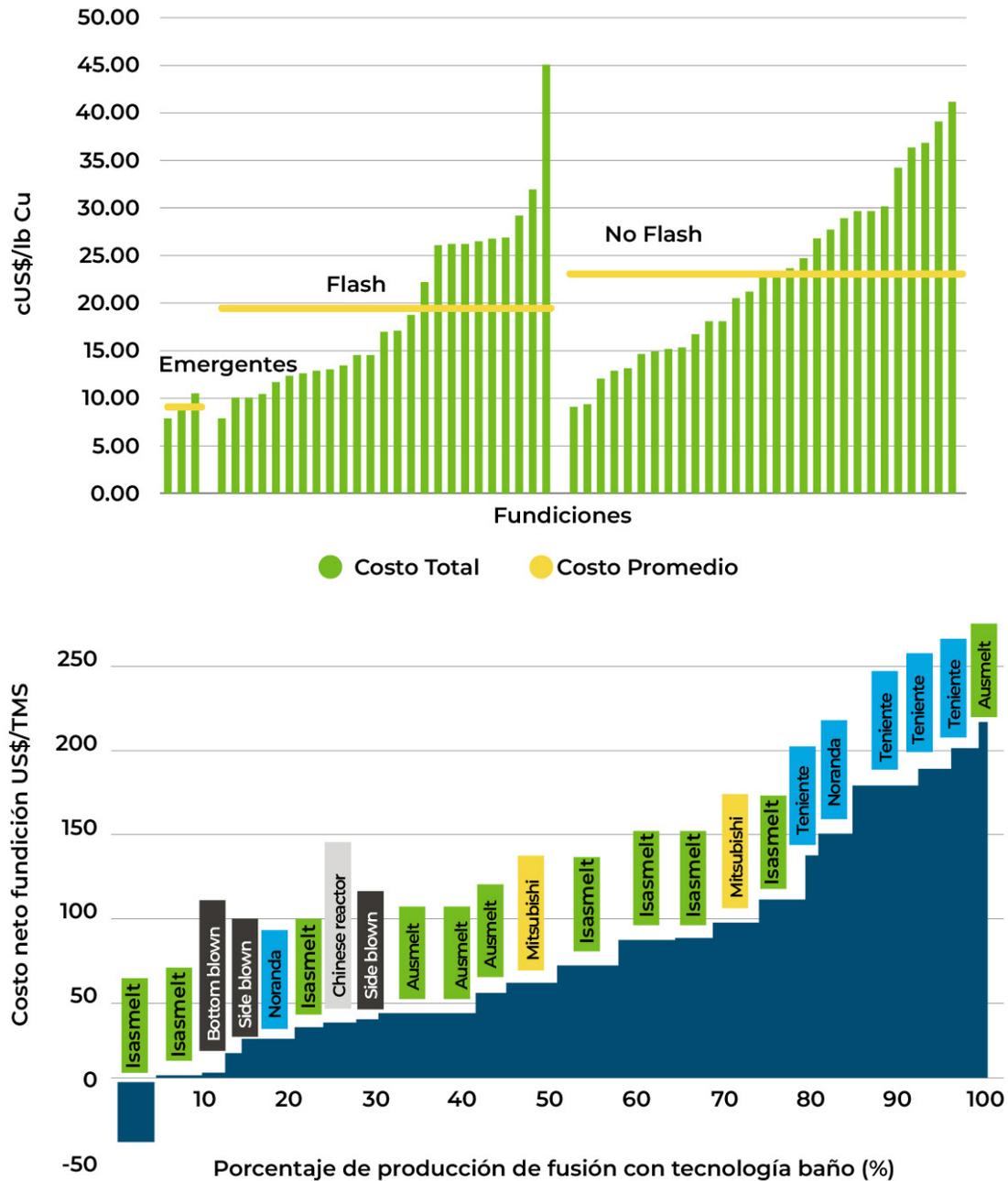
2.2.2.2 | Costos operacionales en las fundiciones de cobre

Los costos operativos de una fundición se pueden dividir en tres grupos: costos de mano de obra, de energías, y otros costos (administración, mantenimiento, insumos y servicios). Cada uno de estos costos representa aproximadamente entre 30 a 40% del costo total de operación (Figura 15).



En cuanto a los costos operacionales, la evidencia muestra que las tecnologías emergentes (chinas) y los hornos flash presentan ventajas frente al resto. Para mediados de la década pasada las tecnologías no flash presentaban los mayores costos promedio, con valores en torno a 23 cUSD/lb Cu (centavos de dólar estadounidense por libra), seguido de las tecnologías flash con alrededor de 19 cUSD/lb Cu, y finalmente las tecnologías emergentes con costos considerablemente más bajos, cercanos a los 9 cUSD/lb Cu, lo que se aprecia en el gráfico de la izquierda de la Figura 16 (Saravia, 2019).

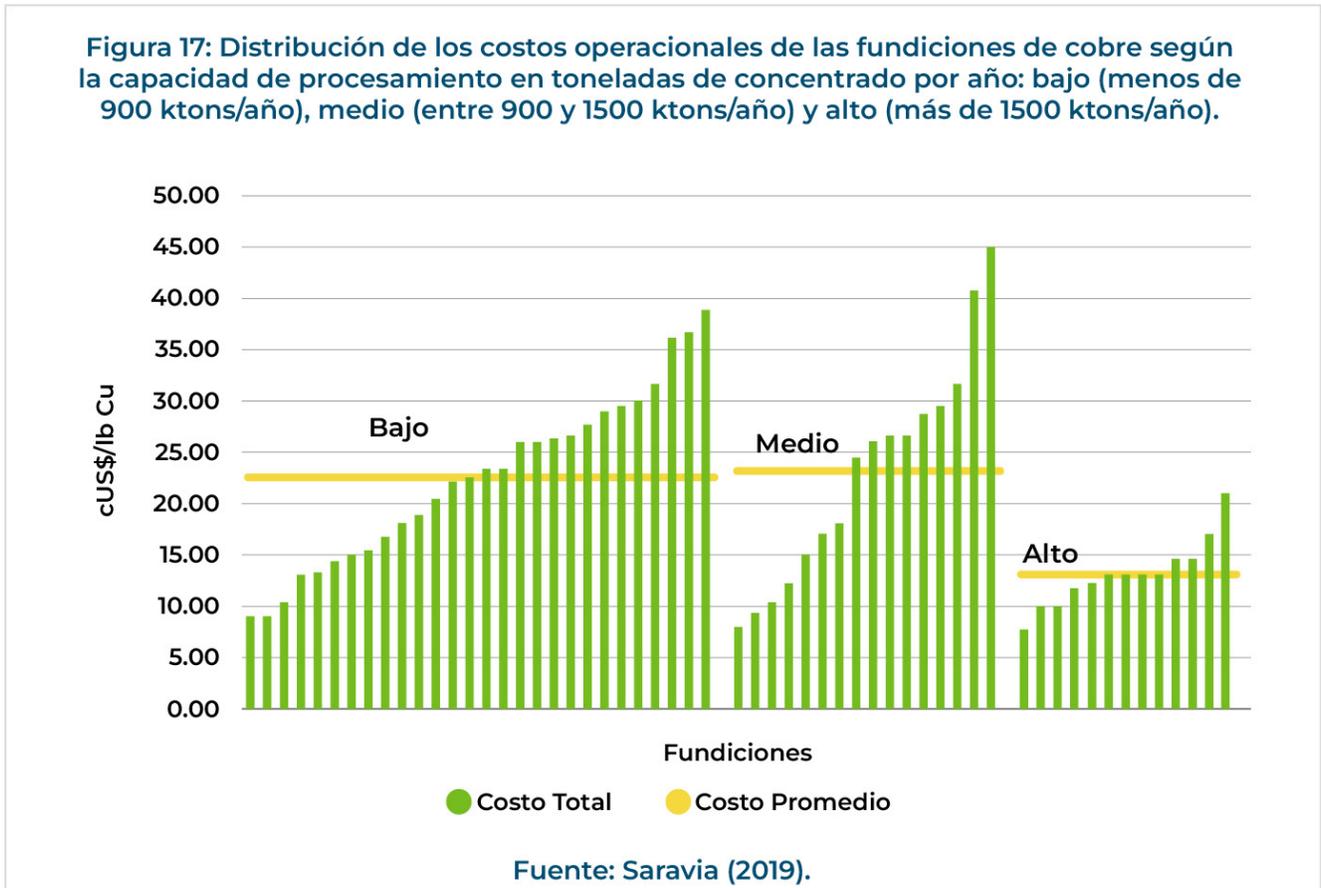
Figura 16: Distribución de los costos operacionales de las fundiciones de cobre según el tipo de tecnología de fusión empleada (izquierda), y distribución de costos netos para fundiciones de cobre con tecnología de baño (derecha).



Fuente: Saravia (2019) y Cochilco (2015).

Por otro lado, respecto a los costos netos de fusión para fundiciones con tecnologías tradicionales de fusión en baño (no flash), las tecnologías Teniente y Noranda son las menos competitivas del mercado. En contraposición, algunas fundiciones con tecnología TSL presentan los menores costos, junto con las tecnologías chinas emergentes que se posicionan en los niveles más competitivos del mercado (gráfico de la derecha, Figura 16).

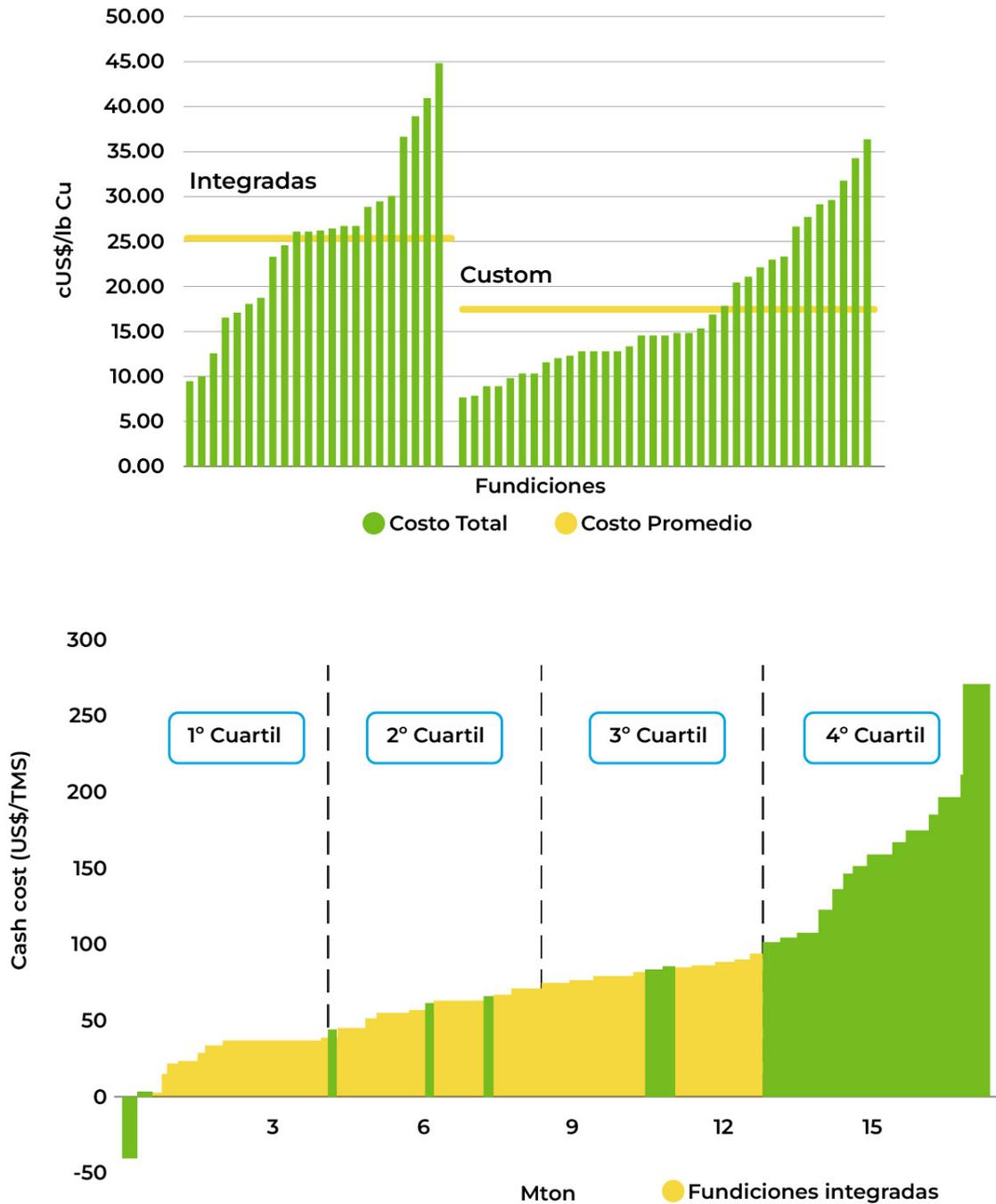
Ahora, considerando que cada fundición tiene una distinta capacidad de procesamiento, - donde se considera una escala de procesamiento baja para capacidades de procesamiento menores a 900 mil toneladas, media entre 900 mil y 1,5 millones de toneladas, y alta por sobre 1,5 millones de toneladas-, es posible apreciar algún grado de economías de escala en el rango de capacidades mayores, como se observa en la Figura 17.



Para fundiciones donde la escala de producción es baja y media se tienen costos operacionales relativamente iguales, en torno a 23 cUSD/lb Cu, mientras que para fundiciones con capacidades sobre el millón y medio de toneladas de concentrado anual los costos operacionales promedio son de alrededor de 14 cUSD/lb (Saravia, 2019).

En cuanto al análisis de la incidencia del modelo de negocio, es decir integrado o no integrado, de las fundiciones en sus costos operacionales, la Figura 18 muestra algunos antecedentes. Como se observa, a mediados de la década pasada existía una clara tendencia de las fundiciones integradas a presentar mayores costos que sus pares no integrados (custom smelters), donde las primeras presentaban costos promedio de alrededor de 25 cUSD/lb Cu vs valores en torno a 18 cUSD/lb Cu en el caso de las segundas (Saravia, 2019).

Figura 18: Distribución de los costos operacionales de las fundiciones de cobre según el modelo de negocio empleado (izquierda), y distribución de costos de caja para fundiciones de cobre de acuerdo con su modelo de negocios (derecha).



Fuente: Saravia (2019) y Cochilco (2015).

Cabe destacar que Saravia (2019) remarca en su análisis que si bien la evidencia muestra una tendencia a que ciertos tipos de tecnologías (flash y emergentes chinas) y ciertas capacidades de procesamiento (mayores a 1,5 millones de toneladas de concentrado anual) presenten menores costos operacionales, no es posible establecer una relación directa e inequívoca entre estas variables, ya que existen otros elementos que inciden en la competitividad de la industria de fundiciones. Un ejemplo es el gobierno de China, que ha proporcionado distintos tipos de incentivos (subvenciones, fondos para I+D+i, etc.), mejorando la competitividad de su industria, donde la estrategia de disminución de costos operacionales también estuvo favorecida por su instalación en regiones del país con bajo precio de energía y mano de obra (Saravia, 2019).

2.3 Hidrometalurgia

- Como se explicó en la introducción de este capítulo, los minerales oxidados de cobre son usualmente tratados mediante el proceso de hidrometalurgia, el que en general consta de las siguientes etapas (Schlesinger et al. (2021/):

1. Lixiviación

2. Extracción por solvente

3. Electro-obtención

La **etapa de lixiviación** consiste en la disolución de los elementos de interés desde un sólido a una solución por medio de algún agente químico, el que puede ser ácido sulfúrico, cianuro u otros dependiendo del mineral a tratar y los elementos de valor a recuperar. Los métodos de lixiviación son esencialmente tres, y también dependen crucialmente de las características del mineral a procesar y de los elementos a recuperar. En el caso del cobre, los más habituales son la lixiviación en pilas y en botaderos o run of mine (ROM). También está la lixiviación en bateas, por agitación e in situ, pero no son usuales en la minería del cobre (Estay, 2019; Schlesinger et al., 2021).

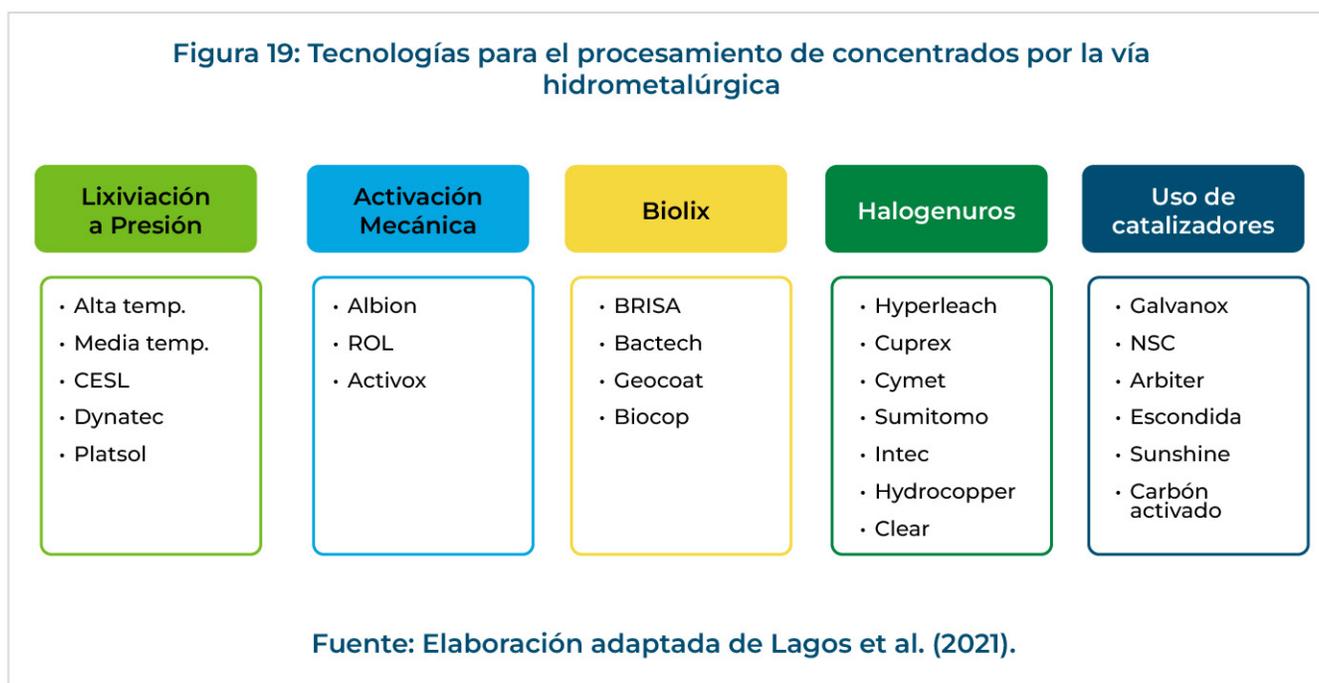
La **etapa de extracción** por solvente es un proceso selectivo de transferencia y concentración de un metal contenido en una solución acuosa a través de la interacción de líquidos inmiscibles. Este proceso, también denominado intercambio iónico líquido, tiene la finalidad de purificar, concentrar y separar el cobre disuelto que se encuentran en las soluciones procedentes del proceso de lixiviación. Consiste en su distribución entre dos solventes inmiscibles, uno de los cuales es usualmente acuoso y el otro un solvente orgánico o extractante que se caracteriza por ser inmiscible al agua, y el cual además presenta un alto grado de afinidad selectiva con el cobre, pudiendo formar compuestos organometálicos (Estay, 2019; Schlesinger et al., 2021).

Por último, la **etapa de electro-obtención o electro-depositación** corresponde a un procedimiento relativamente sencillo para la recuperación en forma selectiva y pura de los metales que se encuentran contenidos en solución. En términos generales, mediante un proceso de electrólisis el metal de interés se transfiere desde la solución de lixiviación, previamente acondicionada y enriquecida en la etapa de extracción por solventes, a un cátodo o placa sólida. Para ello, se aplica una corriente eléctrica continua de baja intensidad entre un ánodo y un cátodo, en donde los iones del metal de interés disueltos en la solución acuosa (cationes) son atraídos por el cátodo (polo de carga negativa), depositándose en él (Estay, 2019; Schlesinger et al., 2021).

Para el caso de la producción de cobre refinado a partir de la lixiviación de concentrados de cobre, la etapa de lixiviación es la que presenta mayores cambios con respecto a la producción hidrometalúrgica de cobre a partir de minerales oxidados. A continuación, se presentan las alternativas tecnológicas – que se encuentran con distintos niveles de madurez- para la lixiviación de concentrados de cobre.

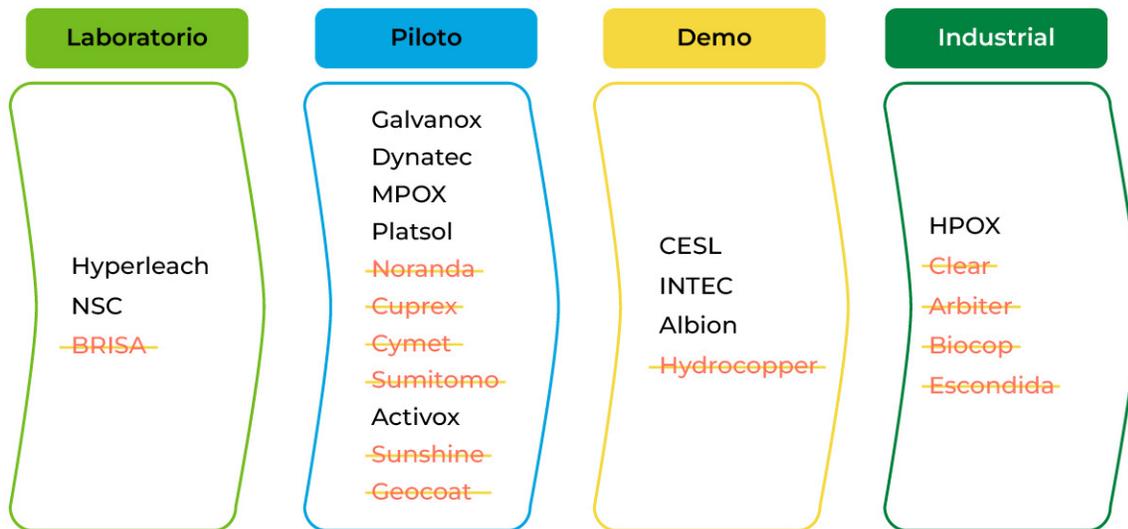
2.3.1 Tecnologías de lixiviación de concentrados de cobre

El creciente interés en procesar los concentrados de cobre por la vía hidrometalúrgica se ha reflejado en la proliferación de diversas tecnologías con distintas etapas de desarrollo. La Figura 19 muestra un resumen de los principales procesos que existen en la actualidad, agrupados según el mecanismo usado para mejorar el desempeño de la lixiviación del concentrado, y que buscan aumentar la cinética de la reacción e incrementar la recuperación metalúrgica del cobre presente en el concentrado como especies sulfuradas. Estas tecnologías pueden clasificarse en los siguientes grupos: lixiviación a presión; lixiviación mediante activación mecánica de minerales; lixiviación bacteriana o biolixiviación; lixiviación con uso de halogenuros; y lixiviación potenciada mediante el uso de catalizadores.



De los procesos listados, solo algunos han logrado llegar a fases de demostración o prueba industrial, y muchos de ellos han sido descontinuados y no se encuentran actualmente en desarrollo ni operación (Lagos et al., 2021). La Figura 20 muestra las etapas en las que se encuentran los distintos procesos y sus tecnologías respectivas, siendo las opciones marcadas en rojo aquellas que no han continuado su desarrollo por no presentar, bajo las condiciones de mercado, una viabilidad técnico-económica en su aplicación.

Figura 20: Nivel de madurez tecnológica de las distintas tecnologías para el procesamiento de concentrados por la vía hidrometalúrgica.



Fuente: Elaboración adaptada de Lagos et al. (2021).

A continuación, se resumen brevemente las características de los principales grupos de tecnologías presentados en las figuras.

2.3.1.1 | Lixiviación a altas presiones

Este tipo de proceso se realiza en autoclaves agitados, siendo una operación particular de la lixiviación agitada en el que la pulpa de mineral es lixiviada a presiones mayores a cinco atmósferas (at) y temperaturas mayores a 120°C. En el reactor se ingresa oxígeno a alta presión para provocar la disolución de las especies sulfuradas (Estay, 2019). Dependiendo del rango de temperatura, existen dos tipos de procesos: a alta temperatura, por sobre 200°C, y en presencia de oxígeno disuelto (Marsden y Brewer, 2003); y a temperatura media, entre 120 y 200°C, y en medio ácido (Marsden et al., 2007). La ventaja del segundo proceso, además de las menores temperaturas es un menor consumo de oxígeno; en contrapartida, estas tecnologías consumen ácido sulfúrico en el proceso de lixiviación. Como se puede apreciar de las figuras 19 y 20, las tecnologías específicas asociadas a este proceso que presentan mayor madurez tecnológica son: HPOX (oxidación a presión a alta temperatura del inglés High Temperature Pressure Oxidation), en etapa de desarrollo industrial (Marsden & Brewer, 2003; Caro, 2018); y CESL, en etapa de demostración (Dreisinger, 2006; Mayhew et al., 2013; Defreyne y Cabral, 2009).

2.3.1.2 | Lixiviación mediante activación mecánica

Corresponde a un proceso que considera un tratamiento previo del mineral mediante molienda fina del concentrado antes de la lixiviación. En este proceso la estructura cristalina del mineral se desordena, provocando defectos y una mayor reactividad por los cambios estructurales que se inducen a escala microscópica (Agnew y Welham, 2005; Balaz y Achimovicova, 2006; Onisei et al., 2012). Como se puede apreciar de las Figura 19 y Figura 20, las tecnologías específicas asociadas a este proceso que presentan mayor madurez tecnológica son: Albion, en etapa de demostración (Hourn et al., 2005; Hourn y Turner, 2012; Stieper, 2018); y Activox, en etapa piloto (Johnson, 1995; Palmer y Johnson, 2005; Nel y Van der Berg, 2009).

2.3.1.3 | Biolixiviación

La bio-hidrometalurgia es un área técnica que se basa en entender y aplicar las interacciones específicas entre microorganismos y minerales para extraer metales de minerales o concentrados. Dentro de esta área se identifican dos grandes aplicaciones: la biolixiviación y la biooxidación. La biolixiviación se refiere a la solubilización de metales básicos contenidos en especies minerales principalmente sulfuradas, mientras que la biooxidación se refiere a la liberación de metales preciosos que están ocluidos o encerrados en sulfuro minerales como la pirita y la arsenopirita, (Brierley & Brierley, 2013).

La lixiviación bacteriana o biolixiviación se produce por una transferencia de electrones que es provocada por las bacterias; es decir, es un proceso catalítico promovido por la acción de microorganismos que, mediante la reducción de oxígeno a agua, oxidan el ion ferroso a ion férrico (Estay, 2019).

En esencia, las reacciones químicas de la biolixiviación son intermediadas por microorganismos específicos cuyo metabolismo se basa en la oxidación de hierro ferroso a hierro férrico (Mousavi et al., 2007). Los métodos o mecanismos de lixiviación bacteriana se pueden dividir en tres categorías:

- ▶ **Directo:** las bacterias permanecen adheridas a la partícula mineral y las reacciones metabólicas tienen un efecto local.
- ▶ **Indirecto:** las bacterias se encuentran separadas de la partícula mineral, desarrollando reacciones metabólicas como la oxidación del hierro, el que posteriormente oxidará el mineral para catalizar la lixiviación.
- ▶ **Combinación de ambos:** ambos mecanismos operan simultáneamente.

Como se puede apreciar de las figuras 19 y 20, ninguna de estas tecnologías está actualmente en desarrollo activo. Sin embargo, las siguientes tecnologías asociadas a este proceso son las que presentan una mayor madurez tecnológica: Biocop, en etapa industrial (Gilbertson, 2000; Batty y Rorke, 2006; Dreisinger, 2006; Lightfoot, 2007); y Bactech/Mintek, en etapa piloto (Peacey et al., 2004; Rhodes et al., 1998; Van Staden, 2008).

2.3.1.4 | Lixiviación en medio sulfatado

La lixiviación de sulfuros se debe producir con la presencia de un oxidante, y el mecanismo depende de las condiciones de la reacción química. El oxidante más común es el oxígeno para la extracción de cobre de la calcopirita (Watling, 2013).

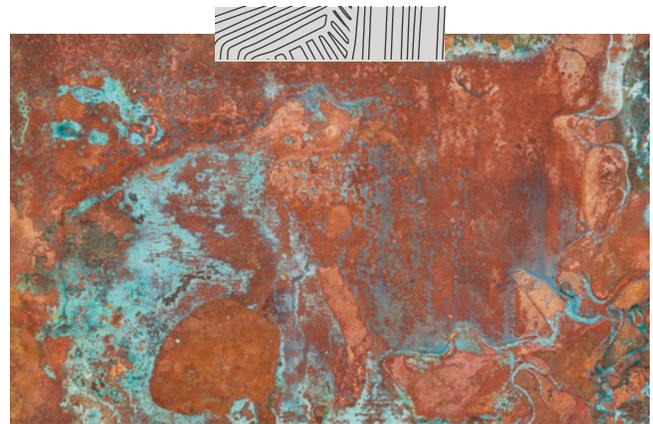
La generación de azufre elemental en estas reacciones se asocia comúnmente con las limitaciones cinéticas que se observan en la lixiviación sulfatada de la calcopirita. El azufre genera una capa en la superficie de la calcopirita que dificulta el acceso del reactivo y la evacuación de los productos de la reacción. Otros oxidantes comúnmente utilizados en la lixiviación de sulfuros es el ion férrico.

2.3.1.5 | Lixiviación con cloruros y cloruros/sulfatos (halogenuros)

Como su nombre lo indica, este proceso corresponde a utilizar cloruros o cloruros/sulfatos en la lixiviación. En el trabajo de Watling (2014) se describen las ventajas de utilizar cloruros en los procesos de la lixiviación:

- **Existe una mejora de las propiedades redox, por la estabilización del par cúprico/cuproso como complejos de cloruro**
- **Generación de azufre en lugar de sulfato en la lixiviación de sulfuros**
- **Lixiviación más rápida de la calcopirita**
- **Aumento de la solubilidad del hierro, cobre y otros compuestos**
- **Baja reactividad de la pirita**

Sus principales desventajas están asociadas al uso de los electrolitos de cloruro que presentan mayor corrosividad, por lo que es necesario un diseño y construcción de los equipos y reactores acordes a esta consideración (Watling, 2014). Como se puede apreciar de las figuras 19 y 20, las tecnologías específicas asociadas a este proceso que presentan mayor madurez tecnológica son: Intec, en etapa de demostración (Everett, 1995; 1996); mientras que otras tecnologías asociadas a la lixiviación con halogenuros parecerían estar discontinuadas.



2.3.1.6 | Lixiviación potenciada mediante el uso de catalizadores

Con el fin de potenciar la disolución de la calcopirita es posible utilizar distintos agentes y/o procesos catalizadores de las reacciones redox, tales como interacciones galvánicas, agentes complejantes y líquidos iónicos. Las interacciones galvánicas tienen su origen en las interacciones electroquímicas resultantes de distintos potenciales de reposo de los minerales. Por ejemplo, cuando dos especies de sulfuros entran en contacto eléctrico se produce la transferencia de electrones desde el material con menor potencial de reposo al material con mayor potencial de reposo (cátodo), formándose una celda galvánica. Finalmente, el ánodo se disolverá y el cátodo actuará como fuente de electrones (Ahmadi et al., 2012a; 2012b).

La tecnología específica asociada a este proceso para la lixiviación de concentrados de cobre es Galvanox (Dixon et al., 2007; 2008; Roberts y Stevens, 2015), la cual presenta un estado de madurez tecnológica en etapa de piloto.

Por otro lado, bajo ciertas condiciones alcalinas en la lixiviación de sulfuros con agentes complejantes, el hierro presente en la calcopirita migra al residuo mientras que el cobre puede permanecer en solución como ion complejo soluble. Es decir, se utilizan estos agentes para estabilizar los metales en solución formando un complejo soluble. Fisher (1994) detalla los agentes complejos del cobre que se emplean en los procesos de disolución de sulfuros de cobre.



También se pueden utilizar como catalizadores ciertos líquidos iónicos a temperatura ambiente. Estos son sales formadas por un catión orgánico como un anión inorgánico u orgánico que se encuentran en estado líquido a bajas temperaturas (Dong et al., 2009). Debido a su volatilidad mínima y estabilidad química, estos tienen el potencial de ser utilizados repetidamente aumentando la rentabilidad del proceso. Se pueden utilizar junto con un oxidante como el oxígeno o el hierro férrico (Whitehead et al., 2007). De este modo, la lixiviación iónica resulta más eficaz para la disolución de la calcopirita en comparación con la solución acuosa, actuando el líquido iónico como catalizador de las reacciones y promoviendo la transferencia de oxígeno disuelto acelerando la lixiviación oxidativa (Dong et al., 2009).



Como se puede apreciar de las figuras 19 y 20, las tecnologías específicas asociadas a este proceso que presentan mayor madurez tecnológica son: Galvanox (Dixon et al., 2007; 2008; Roberts y Stevens, 2015) y NSC (Ackerman, 1993; Anderson, 2003; 2013), en etapa piloto y de laboratorio respectivamente. Otras tecnologías asociadas a la lixiviación con catalizadores parecerían estar discontinuadas o existe escasa información pública respecto de su estado de desarrollo. También, existen otros procesos y tecnologías para la lixiviación de minerales sulfurados con presencia de arsénico, común en ciertos depósitos de cobre y cobre-oro. Sin embargo, estos procesos comparten características similares con algunos de los procesos descritos en este reporte (Parra y Salas 2018).

2.3.2 Comparación entre tecnologías pirometalúrgicas e hidrometalúrgicas

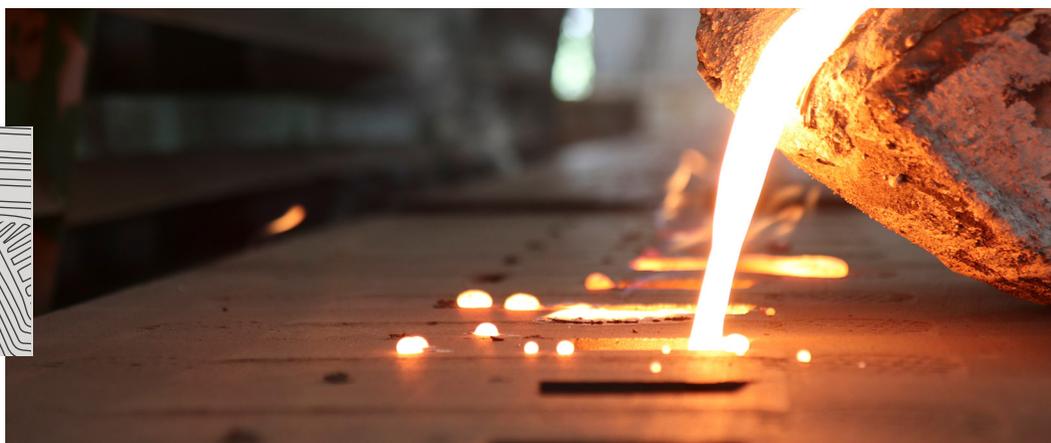
En esta sección se presenta una comparación entre las tecnologías piro/electrometalúrgicas e hidrometalúrgicas para la producción de cobre refinado. Ambas vías tecnológicas presentan características distintivas en términos de madurez tecnológica y desempeño económico, ambiental y social. No obstante, las dos vías tienen potencial de ser aplicadas a la realidad de la industria del cobre en Colombia en los próximos años.

En Lagos et al. (2021) se cita un análisis comparativo entre las dos rutas tecnológicas, realizado por Parra y Salas (2018) para el International Copper Study Group (ICSG). A continuación, se presentan las conclusiones de dicho estudio con información complementaria tomada de distintas fuentes.

Es importante destacar que cuando se realizan estas comparaciones que las tecnologías piro/electrometalúrgicas tienen un nivel de madurez tecnológica y comercial mucho mayor que las tecnologías hidrometalúrgicas, con un número significativo de operaciones usando la vía piro/electrometalúrgica. En cambio, las tecnologías hidrometalúrgicas están todavía a nivel de desarrollo tecnológico, y sólo algunas de ellas cuentan con una validación comercial y aplicación industrial (Parra y Salas, 2018). Por tanto, más allá de estimaciones y estudios de ingeniería que avalan sus parámetros técnicos (recuperaciones y pérdidas metalúrgicas, requerimientos de energía y otros insumos, emisiones, etc.) y económicos (costos de capital y costos operacionales), es importante considerar los números que se presentan como estimaciones más que como el desempeño operacional de su aplicación industrial.

1

En primer lugar, desde el punto de vista operativo se tiene que las recuperaciones metalúrgicas de cobre para los dos procesos son comparables (Parra y Salas, 2018; Lagos et al., 2021). De acuerdo con el modelo de evaluación económica usado en Lagos et al. (2021), las recuperaciones metalúrgicas para una fundición, independiente de la tecnología utilizada, estaría en torno a 98%. Por otro lado, en un reporte de Metso (2019) en donde se comparan diferentes tecnologías de fusión/conversión para concentrados de cobre, el rango de recuperaciones varía entre 97,9% (Mitsubishi Smelting Process) y 99,3% (Ausmelt TSL Smelting and Converting). En el caso de la vía hidrometalúrgica, el proceso HPOX, que es el que tiene mayor madurez tecnológica, podría alcanzar valores en torno a 98% de recuperación de cobre para el caso de tratamiento de concentrados (Caro, 2018; Parra y Salas, 2018). No obstante, es importante destacar que la hidrometalurgia no presenta una tecnología estándar y aceptada para la recuperación metales preciosos y otros elementos de valor, en comparación con los procesos establecidos y maduros para el caso de la pirometalurgia/electrometalurgia (generación de barras anódicas en refinería electrolítica y su procesamiento en plantas de metales nobles).



2

Desde el punto de vista del consumo energético se tiene una situación similar, con una leve ventaja para la vía pirometalúrgica por sobre la hidrometalúrgica, con 3500 kWh/TM versus 4000 kWh/TM de cobre fino producido, respectivamente (Parra y Salas, 2018; Lagos et al., 2021). No obstante, estos son sólo valores referenciales y distintos estudios han llegado a conclusiones opuestas entre sí (e.g., Marsden, 2008; Norgate y Jahanshahi, 2010). Para el caso de Chile, se tiene información sobre consumo energético por procesos para la minería y metalurgia del cobre, separado en combustibles y electricidad (Cochilco, 2022b). Sin embargo, hay que destacar que

en Chile no existen operaciones hidrometalúrgicas que procesen concentrados de cobre en forma industrial; y por tanto, los valores para los procesos de lixiviación (Lix), extracción por solventes (Sx) y electro-obtención (Ew) son para el procesamiento de mineral/material de mena hasta la producción de cátodos electro-obtenidos. Con esas consideraciones, el consumo de combustible promedio para las fundiciones, refinería electrolíticas y Lix-Sx-Ew en Chile se encuentra en torno a los siguientes valores: 5000 MJ/TM (1390 kWh/TM) de cobre fino contenido para la fundición; 2000 MJ/TM (556 kWh/TM) de cobre fino contenido para la refinería; y 3500 MJ/TM (972 kWh/TM) de cobre fino contenido para Lix-Sx-Ew. Por otro lado, en el caso del consumo de electricidad los valores son: 5500 MJ/TM (1530 kWh/TM) de cobre fino contenido para la fundición; 1600 MJ/TM (445 kWh/TM) de cobre fino contenido para la refinería; y 13000 MJ/TM (3610 kWh/TM) de cobre fino contenido para Lix-Sx-Ew (Cochilco, 2022b).

Por último, en Metso (2019) y Alexander et al. (2021) se presentan comparaciones de los consumos energéticos para distintas tecnologías de fusión/conversión de concentrados (vía pirometalúrgica), además de otros insumos necesarios para su operación, todos en una base anual y para una fundición con capacidad de procesamiento de 1,2 millones de toneladas de concentrados al año.



3

En cuanto a la generación de residuos, la principal diferencia entre los procesos pirometalúrgicos e hidrometalúrgicos está en la emisión de gases de los primeros, los que no están presentes (en forma relevante) en los segundos. Por otro lado, ambas líneas de procesamiento generan residuos sólidos que deben ser manejados, y escasos residuos líquidos (esencialmente asociados a pérdidas menores en los procesos); éstos últimos son tratados y recirculados a los procesos productivos.

En el caso de la pirometalurgia, los óxidos de azufre (SOx) son la principal emisión gaseosa, la que es controlada mediante plantas que precipitan éstos en forma de ácido sulfúrico (H₂SO₄). Este ácido es un subproducto comercializable de la fundición, que se utiliza principalmente en la producción de fertilizantes, y en menor medida en la industria química y en otros usos. Estas plantas usualmente capturan sobre 98,5% del azufre volatilizado y en muchos casos sobre 99,5% de éste. Algo similar ocurre con el arsénico, el otro volátil de especial cuidado en la industria de fundiciones. Concentrados con alto arsénico (sobre 0,5%) requieren procesos especiales para su procesamiento, siendo el tostado de los concentrados previo al proceso de fusión la alternativa más usual para concentraciones altas de esta impureza. Este proceso busca precipitar el arsénico como escorodita (FeAsO₄*2H₂O), compuesto relativamente estable en condiciones ambientales.



4

En cuanto a los residuos sólidos de la fundición, el principal es la escoria fayalítica (Fe_2SiO_4). Este es un compuesto bastante estable y seguro en condiciones ambientales, pero puede capturar parte del cobre (pérdidas metalúrgicas) y algunas impurezas alimentadas al proceso en el concentrado. Por ello, usualmente las fundiciones consideran un proceso de limpieza de escorias, con el objetivo de aumentar la recuperación de cobre y disminuir las impurezas presentes en los desechos sólidos finales. No obstante, toda fundición requiere de la disposición final de las escorias en depósitos aptos para este propósito. Por ello, para disminuir los requerimientos de espacio y aumentar la circularidad de los procesos, en la actualidad existen algunas fundiciones que están revalorizando las escorias y vendiéndolas como material para relleno y construcción de caminos y edificaciones (Parra y Salas, 2018).



5

En cuanto a la vía de procesamiento hidrometalúrgica, ésta no presenta emisiones gaseosas relevantes desde el punto de vista ambiental y de seguridad industrial. No obstante, todos los procesos de lixiviación de concentrados de cobre presentados previamente generan algún tipo de residuo sólido que debe ser apropiadamente gestionado. En particular, la generación de azufre elemental y/o ácido sulfúrico es una variable relevante dentro de los procesos. El control y gestión de la formación de azufre es fundamental debido a que puede alterar significativamente la recuperación metalúrgica del cobre, y la utilización del ácido sulfúrico producido o su neutralización puede impactar en forma relevante la viabilidad económica de la operación. Por ello, en varias de las tecnologías presentadas se considera la neutralización del azufre con la adición de cal, para generar un residuo de composición similar al yeso (CaSO_4), más estable e inofensivo en condiciones ambientales. Sin embargo, esto implica un costo mayor debido a la incorporación de un insumo adicional (cal). Por otro lado, la vía hidrometalúrgica se aprecia como una potencial solución para la gestión del

arsénico, ya que permite su disposición como compuestos similares a la escorodita ($\text{FeAsO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) u otros compuestos cristalinos altamente estables en condiciones ambientales (Parra y Salas, 2018). Finalmente, desde el punto de vista de los residuos sólidos el hierro es el tercer elemento de preocupación, y uno relevante desde el punto de vista de masa y volumen generado ya que el hierro es un componente principal en los concentrados de cobre que esencialmente están compuestos por sulfuros de hierro y hierro-cobre. Los tipos de compuestos de hierro generados y sus proporciones dependerán de la tecnología de lixiviación de concentrados utilizada. Sin embargo, en general gran parte del hierro precipitará como compuestos similares a la hematita (Fe_2O_3), y en menor proporción en composiciones similares a la jarosita ($\text{KFe}_3(\text{SO}_4)_2(\text{OH})_6$) y goetita ($(\text{Fe,Al})\text{OOH}$); todos ellos bastante estables en condiciones ambientales. Estos desechos deben controlarse y gestionarse adecuadamente; sin embargo, como en la actualidad no existen operaciones industriales relevantes para estas tecnologías, la visión sobre el reuso, reciclaje y circularidad de estas materias todavía no ha sido abordada en profundidad (Parra y Salas, 2018).

Finalmente, en los distintos procesos de lixiviación hidrometalúrgica de concentrados de cobre los residuos líquidos son limpiados o purificados y recirculados en el proceso, por lo que no se consideran como un riesgo relevante desde el punto de vista ambiental.



6

Por último, desde el punto de vista económico sólo se pueden realizar comparaciones más bien teóricas, debido a que no existen operaciones industriales procesando concentrados de cobre mediante las tecnologías hidrometalúrgicas descritas previamente. Sin embargo, en Parra y Salas (2018) se realiza una comparación en términos de costos de capital (Capex) y de costos operacionales (Opex) para una fundición estándar (promedio de industria) y para el proceso HPOX, el de mayor madurez tecnológica de las opciones hidrometalúrgicas. El resultado de esa comparación muestra que la vía hidrometalúrgica presentaría ventajas en Capex para capacidades de tratamiento menores a 700-500 mil TM de concentrados al año, con valores entre 1800 y 2500 USD/TM concentrado por año; en comparación, la intensidad de capital para una fundición de capacidad de tratamiento de 200 mil TM de concentrado al año está en el orden de 4000 USD/TM de concentrado por año, y de 2000 o menos USD/TM de concentrado por año para capacidades por sobre 800 mil TM de concentrados procesados al año. Por otro lado, en el caso de los costos operacionales, la vía hidrometalúrgica presenta costos mayores a la vía pirometalúrgica para casi cualquier capacidad de tratamiento mayor a 100 mil TM de concentrados por año, con un costo en torno al rango de 48 a 42 cUSD/lb de cobre producida. Esto se compara con un Opex con significativas economías de escala en las fundiciones, que va desde alrededor de 45 cUSD/lb de cobre producida para una fundición con capacidad para procesar 100 mil TM de concentrados por año, a valores menores de 25 cUSD/lb de cobre producida para fundiciones con capacidades por sobre un millón de TM de concentrados al año.

Todos estos resultados de la comparación entre ambas vías de procesamiento de concentrados de cobre muestran que, si aumenta la madurez tecnológica de las tecnologías de lixiviación de concentrados de cobre, éstas podrían presentar ventajas relevantes en operaciones de menor escala y con desafíos particulares desde el punto de vista ambiental. No obstante, estas ventajas y la tecnología a utilizar dependerán de las condiciones metalúrgicas específicas de los concentrados a tratar. Por tanto, estas tecnologías deberían evaluarse caso a caso considerando dichas condiciones.

2.4 Conclusiones y recomendaciones

Dada las distintas tecnologías de FURE y sus principales parámetros, tales como costos de capital y operativos, escala productiva e integración de procesos, es posible concluir que las tecnologías más competitivas

- corresponden a los hornos flash y/o de baño emergentes (en particular, los BBS). En relación con la capacidad de procesamiento, la mayoría de las fundiciones actuales presentan capacidades de procesamiento más elevadas que los años 1995-2000, donde opciones sobre 1,5 millones TM de concentrados al año permiten obtener costos operaciones más bajos.
- Finalmente, la evidencia también muestra que las fundiciones no integradas (*custom smelters*) presentan, en la mayoría de los casos, costos menores que sus contrapartes integradas a las operaciones mineras.

No obstante, la competitividad de los complejos metalúrgicos no sólo depende de la tecnología, tamaño y modelo de negocios. La gestión operativa y del negocio también tienen impactos significativos. Por ello, al desarrollar una FURE es fundamental considerar aspectos como el soporte y respaldo de los proveedores en el diseño, desarrollo y actualización de las tecnologías.

Respecto a la opción hidrometalúrgica, existen variadas alternativas para el procesamiento de concentrados de cobre en reactores o autoclaves. Sin embargo, aún deben concluir su proceso de escalamiento para alcanzar la madurez tecnológica para poder ser utilizadas en procesos mineros de escala industrial. Un número considerable de los procesos diseñados en las últimas décadas están descontinuados o en etapas tempranas de desarrollo (laboratorio, piloto y escalamiento). Debido a ello, las opciones a nivel industrial hoy son limitadas. A pesar de ello, la vía hidrometalúrgica se vislumbra como una tecnología de nicho para el procesamiento de concentrados de cobre en reactores o autoclaves, con aplicaciones para las condiciones particulares de cada proyecto a las que podrían adaptarse caso a caso.

En síntesis, aunque muchas de las tecnologías de hidrometalurgia todavía se encuentran en etapas tempranas o intermedias de investigación y desarrollo, presentan un potencial importante de maduración para ser aplicadas en escala industrial en el mediano plazo, permitiendo competir con las tecnologías piro/electrometalúrgicas en términos técnicos, económicos y ambientales.

3

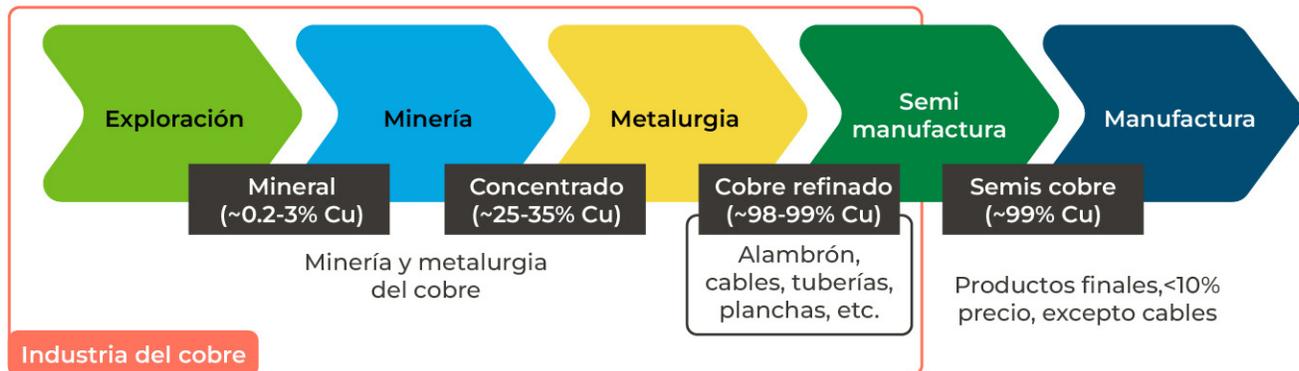
Mercados de la industria del
cobre, producción de cobre
de mina, cobre fundido/refinado,
y semi manufacturas
de cobre



3.1 Introducción

La cadena de valor de la industria del cobre consta de varias etapas sucesivas de desarrollo, las que generan distintos productos intermedios y finales (Figura 21). Esta cadena se inicia con la exploración de potenciales depósitos minerales con contenidos de cobre en minerales sulfurados y/u oxidados, que sean técnica, económica, ambiental y socialmente factibles de ser explotados. En caso de resultar exitosa la exploración, se continúa con la construcción y montaje de las instalaciones mineras y de soporte necesarias, el desarrollo de la actividad minera y el beneficio y transformación del mineral de cobre, que puede producir: i) cátodos de cobre electro-obtenidos con un 99,99% Cu, a través de los procesos de lixiviación (Lix), extracción por solventes (Sx) y electro-obtención (Ew) que conforman la vía hidrometalúrgica; y/o concentrados de cobre con alrededor de 30% Cu, a través del proceso de concentración mediante flotación (plantas concentradoras). En este último caso, la cadena de desarrollo de la minería del cobre considera etapas metalúrgicas adicionales, la piro/electrometalurgia, que consiste en la fundición y refinación de los concentrados de cobre para obtener cobre blíster (95-98,5% Cu), cobre refinado a fuego (RAF, 99% Cu) y/o cátodos de cobre electro-refinado (99,99% Cu).

Figura 21: Cadena de valor, etapas productivas y productos de la industria del cobre.



Política del Gobierno de Colombia:

“Generar capacidad de producción de cobre refinado para la reindustrialización del país”

Fuente: Elaboración propia.

de productos de cobre intermedios y/o finales (semi manufacturas y manufacturas de cobre). Por ejemplo, el cobre refinado se utiliza como insumo en la fabricación de bienes intermedios como el alambrón y las pletinas; o en algunos casos en la obtención de productos finales tales como válvulas y cables de cobre (Cochilco, 2021). En estas etapas también se puede mezclar el cobre con otros elementos para generar aleaciones que también son utilizados como insumos para la producción de bienes intermedios o finales, tales como válvula y cañerías de bronce.

Este capítulo revisa las principales tendencias de los últimos años en la industria del cobre y sus mercados, considerando los recursos minerales, las reservas mineras y las producciones de productos primarios (concentrados, fundido/blíster y refinado) y semi manufacturas/manufacturas de cobre a nivel global, tanto a nivel de las principales regiones del planeta como por países. El objetivo es entregar una perspectiva sobre la estructura de la cadena de valor de la industria del cobre a nivel global, contribuyendo con antecedentes para entender de mejor forma el rol que puede jugar Colombia en cada uno de los eslabones productivos de esta industria. Lo anterior, en el contexto de la discusión y materialización de avanzar hacia la producción de cobre refinado en su territorio como parte de la política de (re)industrialización del Gobierno de Colombia.

La sección 3.2 de este capítulo revisa las tendencias recientes en términos de gastos de exploración por metales base e identificación de recursos y reservas de cobre a nivel global y por países, reflejando lo ocurrido en el primer eslabón de la cadena de valor de la industria del cobre descrita en la Figura 21. Luego, la sección 3.3 analiza las siguientes dos etapas de la cadena de desarrollo de la industria, que se relacionan con lo que se entiende como la producción primaria del cobre asociada a la minería y metalurgia extractiva del cobre. Ello incluye la producción de cobre de mina a través de las vías hidrometalúrgica y de concentración por flotación y la producción de cobre fundido y refinado, incluyendo también el reciclaje de cobre para la producción de cobre refinado. La sección 3.4 aborda los dos últimos eslabones de la cadena de valor de la industria del cobre, relativos a la producción y consumo final de semi manufacturas de cobre, tanto por sector de uso final como por regiones geográficas. Finalmente, la última sección entrega las principales recomendaciones del capítulo.

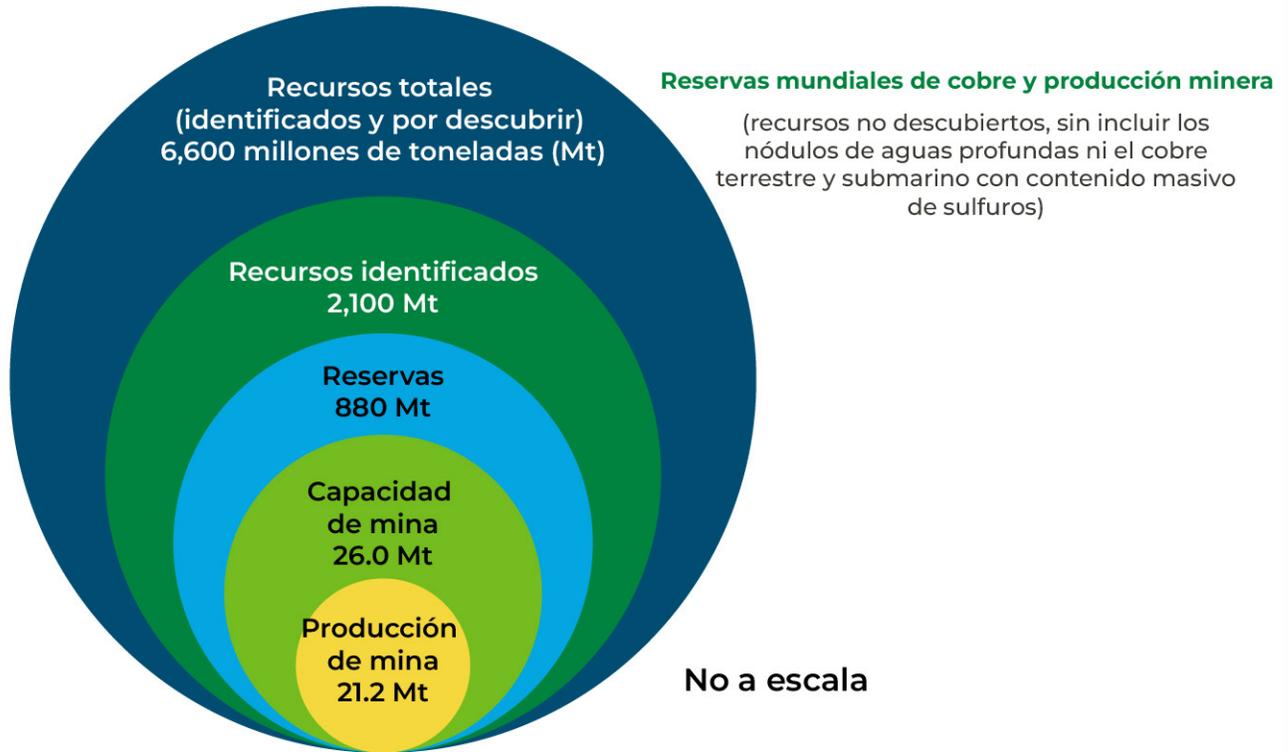
3.2 Exploración, recursos y reservas de cobre

- La primera etapa para el desarrollo de la industria del cobre es la exploración minera. Su objetivo es encontrar depósitos de cobre que contengan recursos
- minerales potencialmente explotables desde el punto de vista técnico,
- económico, ambiental y social; y, por tanto, que puedan transformarse en recursos (medidos, indicados, inferidos) y reservas mineras (probadas y probables¹).

Actualmente el mundo produce, anualmente, alrededor de 21 millones TM de cobre fino contenido como producción de cobre de mina, y tendría reservas por aproximadamente 890 millones TM de cobre fino contenido (USGS, 2023), unos 2.100 millones TM de cobre fino contenido en recursos identificados, y recursos potenciales totales (identificados y no descubiertos aún) por más de 5.600 millones TM de cobre fino contenido (ver Figura 22).

¹ Ver [Estándar Colombiano para el Reporte Público de Resultados de Explotación, Recursos y Reservas Minerales \(ECRR\)](#)

Figura 22: Producción de mina, capacidad de producción, reservas y recursos de cobre, 2021.



Fuente: USGS (2015) y ICSG (2023)

Estas cifras de recursos y reservas se deben, en parte importante, a que, pese a la creciente explotación de las reservas, entre 1990 y 2021 se invirtieron más de 47 mil millones de USD en exploración por cobre a nivel mundial, dando un promedio de más de 1.500 millones de USD por año y en 2022 se mantuvo la tendencia creciente por la exploración por cobre, llegando casi a 2.800 millones de USD. Como resultado, en el período entre 1990 y 2021 se descubrieron 228 nuevos depósitos de cobre que en conjunto contienen recursos, reservas y producción histórica por 1.180 millones de toneladas de cobre fino, como se aprecia en la Tabla 2 (Anders, 2022).

Tabla 2: Gastos de exploración y principales descubrimientos de cobre, 1990-2021.

Año	Numero de descubrimientos	Cobre en reservas, recursos y producción pasada	Precio* del cobre en LME (\$/Mt)	Presupuestos de exploración de cobre (\$)	Costo implícito de descubrimiento (\$/t)	Cobre nuevo proyectado en grandes descubrimientos (Mt)
1990	8	70.2	2,662	528.9	7.5	
1991	10	140.7	2,336	491.7	3.5	
1992	8	44.4	2,282	486.5	10.9	
1993	10	37.2	1,912	624.9	16.8	
1994	13	73.5	2,311	563.1	7.7	
1995	16	100.4	2,934	670.0	6.7	
1996	11	62.5	2,295	729.9	11.7	
1997	17	80.1	2,272	758.1	9.5	
1998	12	32.3	1,654	625.4	19.4	
1999	9	34.7	1,575	509.4	14.7	
2000	9	10.7	1,814	451.0	42.0	
2001	11	72.1	1,580	419.6	5.8	
2002	8	17.4	1,559	315.9	18.2	
2003	7	19.6	1,780	350.6	17.9	
2004	7	16.6	2,897	584.1	35.2	
2005	15	71.4	3,682	836.9	11.7	
2006	7	26.5	6,735	1,392.9	52.6	
2007	15	75.3	7,140	2,077.1	27.6	8.0
2008	10	78.5	6,948	2,976.8	37.9	11.4
2009	5	19.9	5,179	1,608.3	80.6	6.2
2010	1	1.0	7,556	2,257.3	2300.8	8.6
2011	7	29.9	8,820	3,657.0	122.4	14.0
2012	1	0.8	7,954	4,700.6	5596.0	18.0
2013	4	31.0	7,330	3,468.7	111.8	13.3
2014	3	22.4	6,863	2,677.8	119.6	10.3
2015	0	0.0	5,509	2,081.6	NA	8.0
2016	1	0.6	4,871	1,576.9	2447.1	6.0
2017	2	3.9	6,172	1,704.1	432.2	6.5
2018	0	0.0	6,527	2,074.8	NA	7.9
2019	0	0.0	6,009	2,321.2	NA	8.9
2020	1	1.7	6,184	1,758.7	1046.8	6.7
2021	0	0.0	9,317	2,313.3	NA	8.9
Totales	228	1175.4		47,593.3		142.6

Al 10 de mayo de 2022.

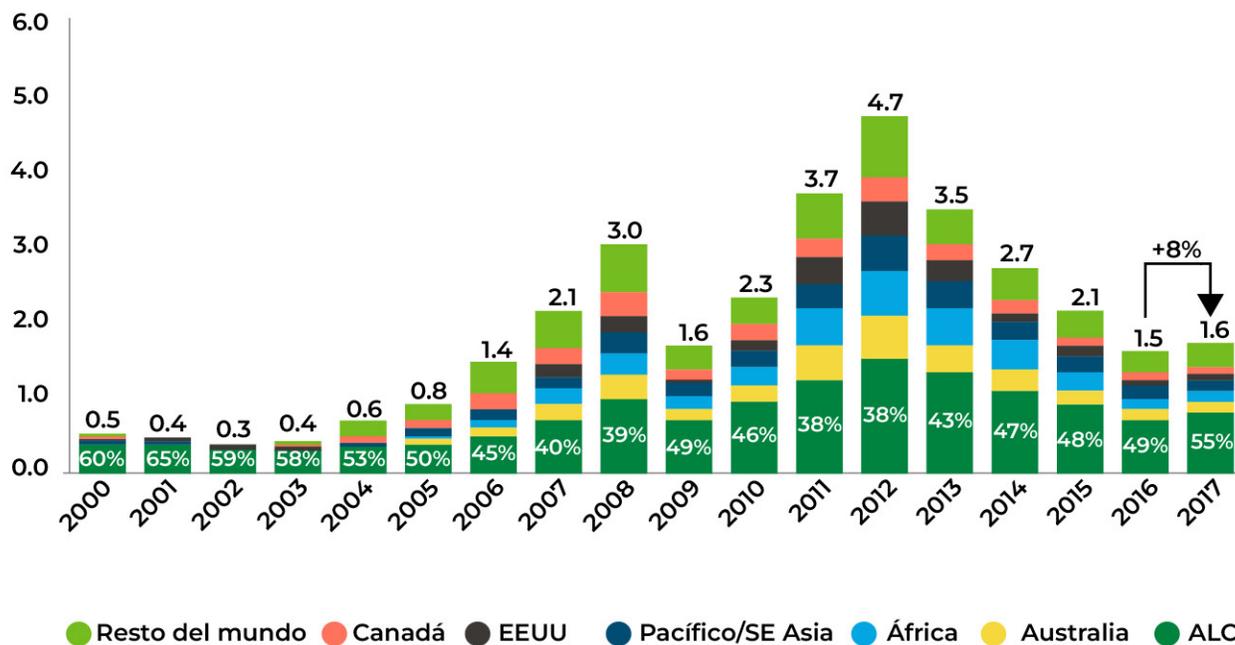
NA= no aplica

*Precio promedio anual en efectivo Grado A en la Bolsa de Metales de Londres.

Fuente: Anders (2022).

Durante este período América Latina – liderada por Chile y Perú – ha sido el principal destino para esos gastos de exploración (Figura 23), explicando entre 40% y hasta más de 60% de los presupuestos anuales de las compañías en búsqueda de recursos de cobre (Nieponice et al., 2018).

Figura 23: Gastos de exploración de cobre por regiones, 2000-2017



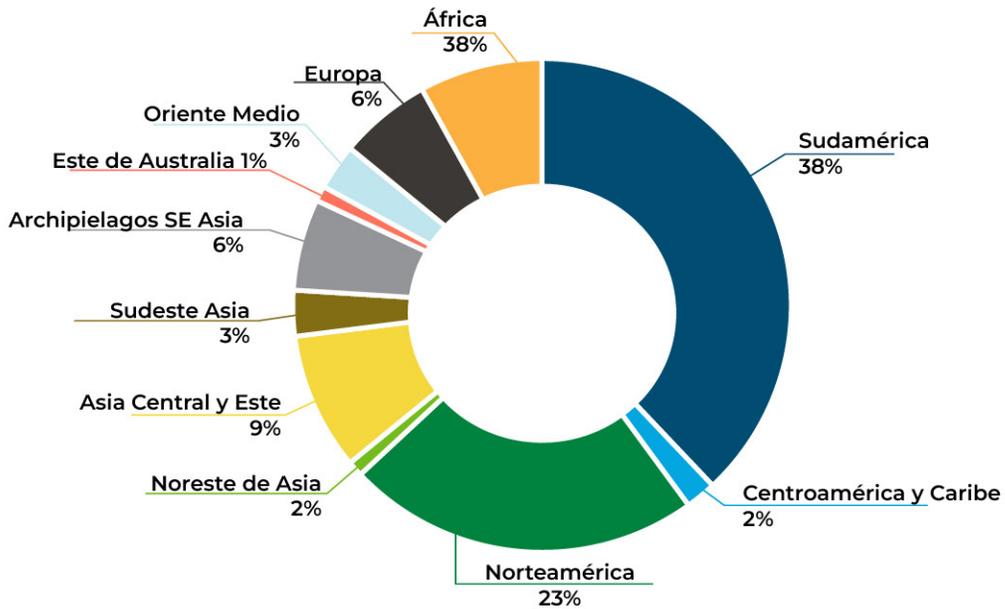
Incluye exploración de base, de etapa avanzada y de viabilidad, y exploración en el lado de la mina. S&P Global Market Intelligence a veces estima todo o parte del desglose del presupuesto de una empresa cuando ésta no puede o no quiere proporcionarlo.

Fuente: Nieponice et al. (2018).

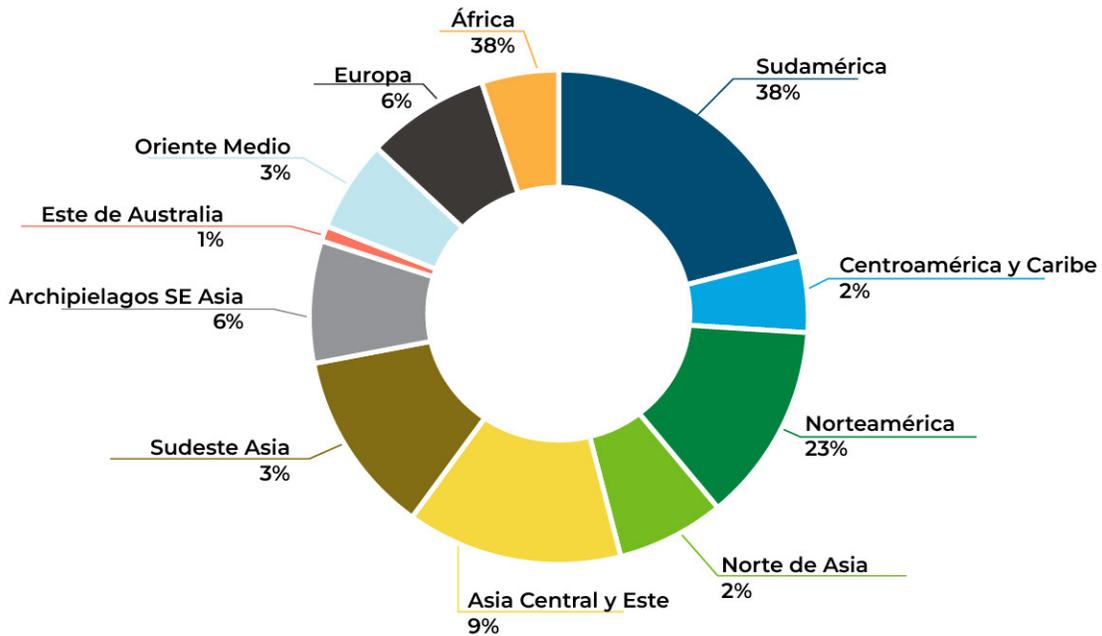
Como resultado, América del Sur cuenta con 38% de los recursos de cobre actualmente identificados y 21% de los recursos potenciales aún no descubiertos, lo que puede apreciarse en la Figura 24 (USGS, 2015; ICSG, 2023). Al 2023, Chile y Perú cuentan con más de 30% de las reservas de cobre del mundo (21% y 9%, respectivamente), lo que les permite sustentar su posición como los dos principales productores de cobre del mundo con, aproximadamente, 25% y 11% de la producción de cobre de mina del mundo, respectivamente.

Figura 24: Recursos de cobre identificados y no descubiertos por regiones.

A. Recursos de cobre identificados (total mundial = 2.100 Mt)



B. Recursos de cobre no descubiertos (total mundial = 3.500 Mt)



Fuente: USGS (2015); ICSG (2023).

Colombia comenzó a atraer inversiones significativas en exploración a partir de los últimos años de la primera década de este siglo, llegando a presentar presupuestos de exploración por sobre los 400 millones de USD, logrando en los últimos 15 años posicionarse consistentemente dentro de los 15 países más atractivos para la exploración por metales no ferrosos (S&P, varios años). Gran parte de dicha inversión en exploración estuvo enfocada en la búsqueda y delimitación de recursos de oro, y solo un porcentaje menor de los gastos asociados a la exploración se enfocó en la exploración de depósitos de cobre (menos de 10% en promedio en los últimos 15 años).

Lo anterior se ha reflejado en que, actualmente, el país cuenta con escasos recursos de cobre identificados y cuantificados con una alta certeza y, con las excepciones del proyecto Quebradona (620 millones TM de mineral con una ley media de 0,69% Cu y 0,27 g/t Au; AngloGold Ashanti, 2022), El Alacrán (131 millones TM de mineral con una ley media de 0,36% Cu y 0,24 g/t Au) y de la operación de El Roble, muchos de los prospectos todavía se encuentran en etapas iniciales de reconocimiento. Si se consideran todos los proyectos u operaciones que en algún momento han reportado volúmenes y leyes con el cobre como mineralización principal en Colombia - Quebradona, Mocoa, El Alacrán, Pantanos/Pegadorcito-Murindo y El Roble - se contendría un total de recursos potencialmente explotables (medidos, indicados e inferidos) de menos de 8 millones de TM de cobre fino contenido en dichos recursos (Dufey et al., 2023), representando menos de 0,9% de las reservas de cobre del mundo, o menos de 0,4% de los recursos de cobre actualmente identificados a nivel global.

Por último, durante las últimas décadas los países vecinos a Colombia también han atraído interés por parte de empresas exploradoras y mineras para la búsqueda de minerales no ferrosos. No obstante, en esos países también el desarrollo de los proyectos mineros ha sido lento y enfrentado dificultades relevantes. De particular interés es lo que ha ocurrido en Ecuador, en donde se cuenta con nueve proyectos que en conjunto tienen el potencial de producir en torno a 800 miles TM de cobre fino contenido al año (Dufey et al., 2023); sin embargo, actualmente ese país sólo cuenta con una operación de cobre de gran escala.



3.3

Industria primaria del cobre y producción total de cobre refinado

El segundo eslabón de la cadena de valor de la industria minera tiene relación con la extracción de minerales y la producción de cobre de mina, fundido y refinado. Este eslabón es lo que se conoce usualmente como industria primaria del cobre (Figura 21), aunque muchas veces se incluye la exploración de minerales como parte de esta etapa (no obstante, la exploración puede considerarse como un negocio con características diferentes).

- Adicionalmente, es importante destacar que la industria secundaria o reciclaje de cobre también produce cobre refinado, por lo que es necesario hacer la distinción del origen de este producto para entender las cadenas productivas, más allá de que no existe una diferencia relevante en el producto mismo.

La producción primaria de cobre puede dividirse en cinco productos principales:

- ▶ **Producción de cobre de mina:** Se refiere a la cantidad de cobre contenido en cátodos, concentrados y precipitados obtenidos en los distintos procesos a que se someten los minerales sulfurados u oxidados de cobre, es decir, la producción de cobre de mina corresponde a la cantidad de cobre que se extrae y procesa en una mina.
- ▶ **Producción de cobre en concentrados:** Corresponde a la producción de cobre de mina que es obtenida mediante la extracción del mineral y su posterior procesamiento en las plantas concentradoras a través del proceso de flotación.
- ▶ **Producción de cobre electro-obtenido:** Corresponde a la producción de cobre de mina obtenida mediante la extracción del mineral y su posterior procesamiento en las plantas hidrometalúrgicas a través de los procesos de lixiviación, extracción por solventes y electro-obtención (Lix-Sx-Ew). El producto de estos procesos son los cátodos de cobre electro-obtenidos.
- ▶ **Producción de cobre de fundición:** Consiste en la cantidad de cobre producido a partir de los concentrados de cobre y que se obtiene mediante los procesos de fusión y conversión. A este producto muchas veces se le llama cobre blíster o cobre anódico; este último nombre se debe a que las placas obtenidas son utilizadas como ánodos de cobre en el proceso de electro-refinación (ER).
- ▶ **Producción total de cobre refinado:** En esta categoría se considera la producción de cobre electro-obtenido más el cobre refinado obtenido a partir del cobre fundido y el cobre refinado producto del reciclaje de chatarra. Estos últimos pueden obtenerse principalmente mediante dos procesos: la refinación a fuego, de la cual se obtiene el cobre refinado a fuego (RAF) con un 99,5% Cu; y la refinación electrolítica, de la cual se obtienen los cátodos de cobre electro-refinados de 99,99% Cu, similares a los cátodos electro-obtenidos.

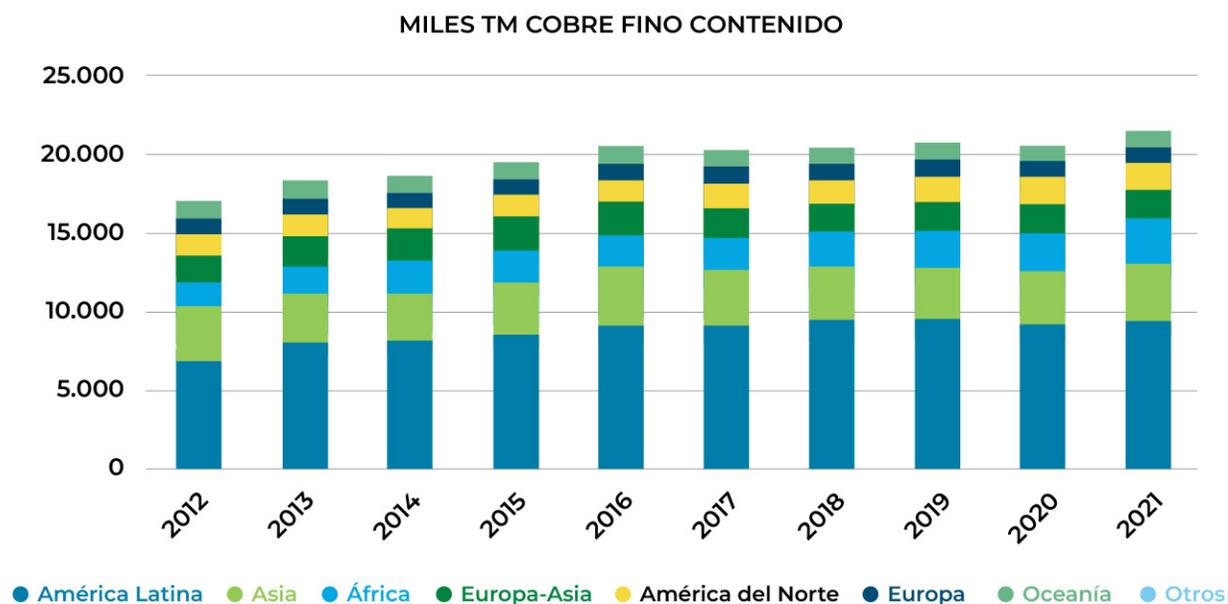
Como se desprende de la descripción, si no se consideran las pérdidas metalúrgicas de los procesos productivos ni los cambios en los inventarios de los productos intermedios, la producción de cobre de mina es la suma de las producciones de cobre en concentrados y la producción de cobre electro-obtenido; y esto debiera ser igual a la producción primaria de cobre refinado.



3.3.1 Producción de cobre de mina

Entre los años 2012 a 2021 la producción mundial de cobre de mina creció a una tasa promedio de 2,6% anual, desde casi 17 millones a 21,4 millones TM de cobre fino contenido (Cochilco, 2022a). Esta tendencia se puede observar en la Figura 25.

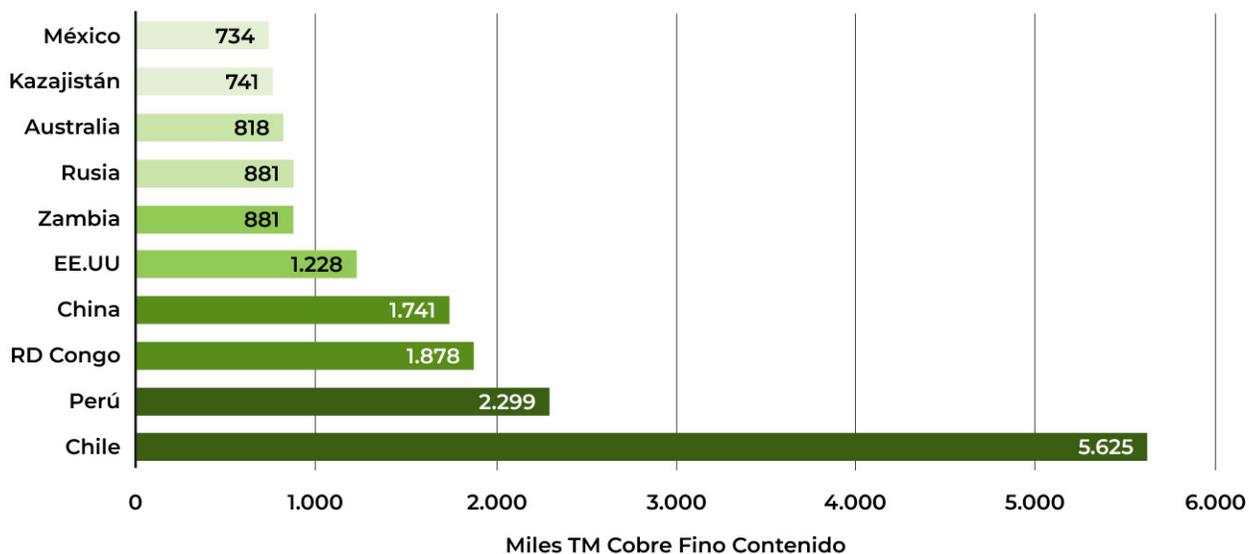
Figura 25: Producción mundial de cobre de mina por región, 2012-2021.



Fuente: Nieponice et al. (2018).

La figura también muestra la producción de cobre de mina por regiones. De las tres principales regiones productoras del mundo (América Latina, Asia y África), que en conjunto representan 75% de la producción mundial, en los últimos años África ha sido la más dinámica, casi duplicando su producción. Esto último se asocia, principalmente, al desarrollo de varios proyectos de gran escala en la República Democrática (R.D.) del Congo que le permitieron más que duplicar su producción. No obstante, América Latina se ha mantenido como la principal región productora de cobre de mina con una participación de más de 40% en 2021 (9.193 miles de TM cobre fino contenido). Los principales países productores de cobre de mina del mundo se presentan en la Figura 26.

Figura 26: Principales países productores de cobre de mina del mundo, 2021.



Fuente: Elaboración propia a partir de información de Cochilco, 2012-2021.

La producción de cobre de mina en América Latina proviene principalmente de Chile y Perú con un 60% (5,6 millones TM de cobre fino contenido) y 25% (2,3 millones TM de cobre fino contenido), respectivamente; es decir, en su conjunto suman aproximadamente el 85% de la producción de la región, y en torno a 37% del total mundial. El resto de la producción de la región la aportan principalmente México, Panamá y Brasil, estos últimos con producciones levemente superiores a 300 mil TM de cobre fino contenido.

En el caso de Colombia, en 2021 su producción de cobre de mina alcanzó los 8,3 miles TM de cobre fino contenido en concentrados, lo que representa aproximadamente un 0,07% de participación en el continente y menos de 0,04% a nivel mundial (Cochilco, 2022a). Toda esta producción se obtuvo de una sola operación, la mina El Roble de Atico Mining Corporation (Atico Mining, 2023). Sin embargo, si se consideran los recursos totales reportados para el país, se estima que Colombia podría alcanzar una producción de cobre de mina anual máxima de alrededor de 200 mil TM de cobre fino contenido (Dufey et al., 2023). Lo anterior, bajo el supuesto que todos los proyectos actualmente identificados y con reportes de volúmenes y leyes de mineralización se pusieran en operación.

Adicionalmente, es importante remarcar que durante las últimas décadas en los países vecinos a Colombia también se han identificado nuevos recursos minerales de cobre con potencial de ser explotados, donde el caso de Ecuador es destacable. Actualmente ese país cuenta con una operación de cobre de gran escala (Mirador), con una capacidad de producción en torno a 100 mil TM de cobre fino contenido, y otros nueve proyectos en distintas etapas de desarrollo que le permitirían una producción potencial cercana a 800 mil TM de cobre fino contenido al año (Dufey et al., 2023)

En cuanto al tamaño de las operaciones mineras, un porcentaje importante de la producción mundial se obtiene de un número relativamente reducido de operaciones de gran tamaño. En la Tabla 3 se presentan las capacidades de producción de las 20 mayores minas de cobre del mundo.

Tabla 3: Principales operaciones mineras de cobre el mundo, 2021. Capacidad en miles de TM de cobre fino contenido.

Posición	Mina	País	Dueños	Fuente	Capacidad
1	Escondida	Chile	BHP Billiton (57.5%), Rio Tinto Corp. (30%), Japan Escondida (12.5%)	Concs & SX-EW	1510
2	Grasberg	Indonesia	PT Freeport Indonesia (PT Inalum and the provincial/regional government 51.2% and Freeport-McMoRan Inc 48.8%)	Concentrates	800
3	Collahuasi	Chile	Anglo American (44%), Glencore plc (44%), Mitsui (8.4%), JX Holdings (3.6%)	Concs & SX-EW	630
4	Morenci	Estados Unidos	Freeport-McMoRan Copper & Gold Inc. 54%, Compañía de Minas Buenaventura 19.58% Sumitomo 21%	Concs & SX-EW	570
5	Buenavista del Cobre (former Cananea)	México	Grupo Mexico	Concs & SX-EW	525
6	Cerro Verde II (sulphide)	Perú	54%, Compañía de Minas Buenaventura 19.58%, Sumitomo 21%	Concentrates	500
7	Antamina	Perú	BHP Billiton (33.75%), Teck (22.5%), Glencore plc (33.75%), Mitsubishi Corp. (10%)	Concentrates	450
8	Polar Division (Norilsk/Talnakh Mills)	Rusia	Norilsk Nickel	Concentrates	450
9	Las Bambas	Perú	MMG (62.5%), Guoxin International Investment Corporation Limited (22.5%), CITIC Metal Co., Ltd. (15%)	Concentrates	400
10	El Teniente	Chile	Codelco	Concs & SX-EW	399
11	Los Pelambres	Chile	Antofagasta Plc (60%), Nippon Mining (25%), Mitsubishi Materials (15%)	Concentrates	380
12	Cobre Panama	Panamá	First Quantum Minerals Ltd 90%, Korea Panama Mining Corp. (LS-Nikko Copper Inc. and Korean Resources Corporation) 10%	Concentrates	360
13	Radomiro Tomic	Chile	Codelco	Concs & SX-EW	350
14	Kamoa-Kakula	Congo	Ivanhoe Mines (39.6%), Zijin Mining Group (39.6%), Crystal River Global Limited (0.8%), Government of the Democratic Republic of Congo (20%)	Concentrates	340
15	Kansanshi	Zambia	First Quantum Minerals Ltd (80%), ZCCM (20%)	Concs & SX-EW	340
16	Los Bronces	Chile	Anglo American 50.7%, Mitsubishi Corp. 20.4%, Codelco 20%, Mitsui 9.5%	Concs & SX-EW	340
17	Chuquibambilla	Chile	Codelco	Concs & SX-EW	330
18	Kamamoto	Congo	Katanga Mining Ltd (86.33% Glencore plc) 75%, Gecamines 25%	SX-EW	300
19	Toromocho	Perú	Chinalco	Concentrates	300
20	Spence	Chile	BHP Billiton	Concs & SX-EW	285

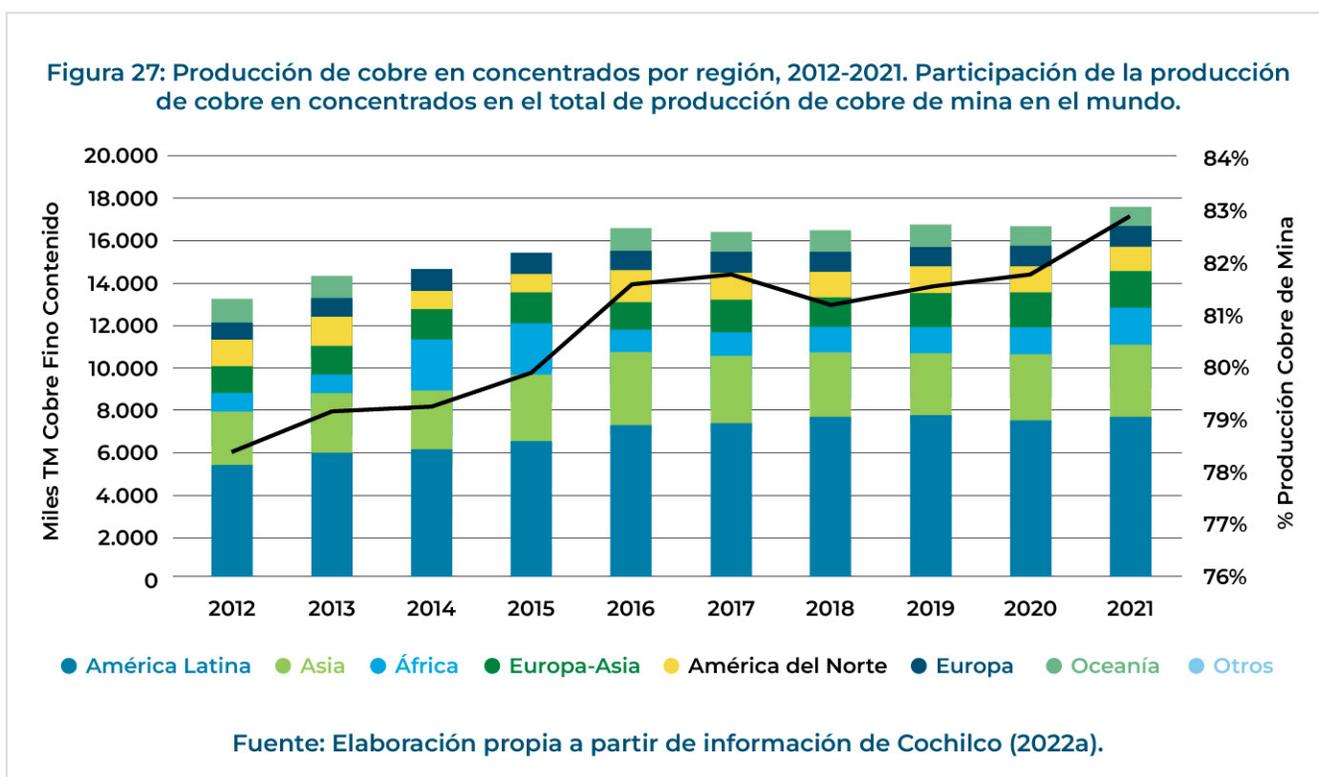
Nota: Los datos de capacidad reflejan capacidades de producción, no necesariamente pronósticos de producción.

Fuente: ICSG (2023)

En conjunto, estas operaciones tienen una capacidad de producción en torno a 9,5 millones TM de cobre fino contenido, lo que representa más casi 45% de la producción mundial. De este grupo, 10 minas presentan capacidades de producción por sobre 400 mil TM de cobre fino contenido. Lo anterior refleja la gran variabilidad de tamaño de los depósitos minerales de cobre y de las economías de escala que presenta la industria. En comparación, los proyectos actualmente identificados en Colombia tendrían un potencial de producción individual de entre 25 mil hasta 60 mil TM de cobre fino contenido al año (Dufey et al., 2023).

3.3.2 Producción de cobre en concentrados

Como se comentó previamente, la producción de cobre de mina se divide en dos grupos de acuerdo con el producto obtenido - producción de concentrados de cobre y producción de cátodos de cobre electro-obtenidos. Mientras estos últimos son obtenidos mediante los procesos Lix-Sx-Ew, los primeros se obtienen mediante flotación. Durante la última década la producción de cobre en concentrados ha representado entre 78% a 83% de la producción mundial de cobre de mina, con una tendencia creciente en producción y en participación, como se puede apreciar en la Figura 27.



En la producción de cobre en concentrados se repiten las tendencias de la producción de cobre de mina: América Latina es la principal región productora de concentrados con una tendencia creciente y África es la región más dinámica duplicando su producción en una década. Sin embargo, es relevante destacar que la producción de cobre en concentrados tiene una tasa de crecimiento mayor a la de la producción de cobre de mina, de 3,4% vs. 2,6% anual, respectivamente. Con ello, entre los años 2012 y 2021 la producción de cobre en concentrados pasó de 13,3 a 17,7 millones TM de cobre fino contenido.

Por último, se destaca que en este segmento de producción de cobre de mina se repiten prácticamente los mismos países productores principales a nivel global, con algunos cambios menores en el orden de relevancia debido a que hay algunos de ellos que tienen escasa producción de cobre electro-obtenido como Rusia y China.

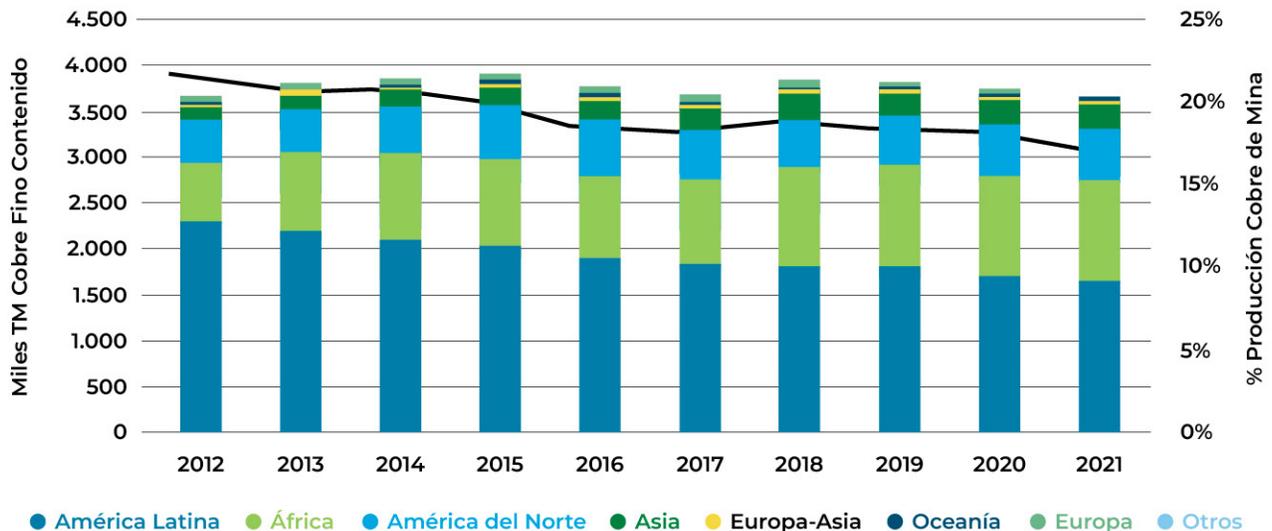


3.3.3 Producción de cobre electro-obtenido

El cobre electro-obtenido se suma a la producción en concentrado para completar la producción de cobre de mina. Durante la última década la producción de cobre electro-obtenido ha representado cerca de 20% de la producción mundial de cobre de mina, pero con una clara tendencia decreciente en participación y un estancamiento en la producción. Esto se puede apreciar en la Figura 28.

Este fenómeno se debe a dos factores que están interrelacionados entre sí. El primero se explica en que los minerales oxidados de cobre que históricamente han alimentado los procesos de lixiviación, extracción por solventes y electro-obtención se encuentran sólo en algunos depósitos de cobre en regiones particulares que cuentan con una historia geológica afín para su formación. El segundo, en que estos minerales oxidados se ubican en las porciones superiores de los depósitos de cobre y, por tanto, son los primeros en ser explotados, lo que ha llevado a un agotamiento de las reservas y recursos minerales de cobre oxidado, dificultando el crecimiento de la producción de cobre electro-obtenido. De hecho, en la última década su tasa de crecimiento ha sido negativa de -0,04% anual y con un volumen de producción en torno a 3,7 millones TM de cobre fino contenido.

Figura 28: Producción de cobre electro-obtenido por región, 2012-2021. Participación de la producción de cobre electro-obtenido en el total de producción de cobre de mina en el mundo.

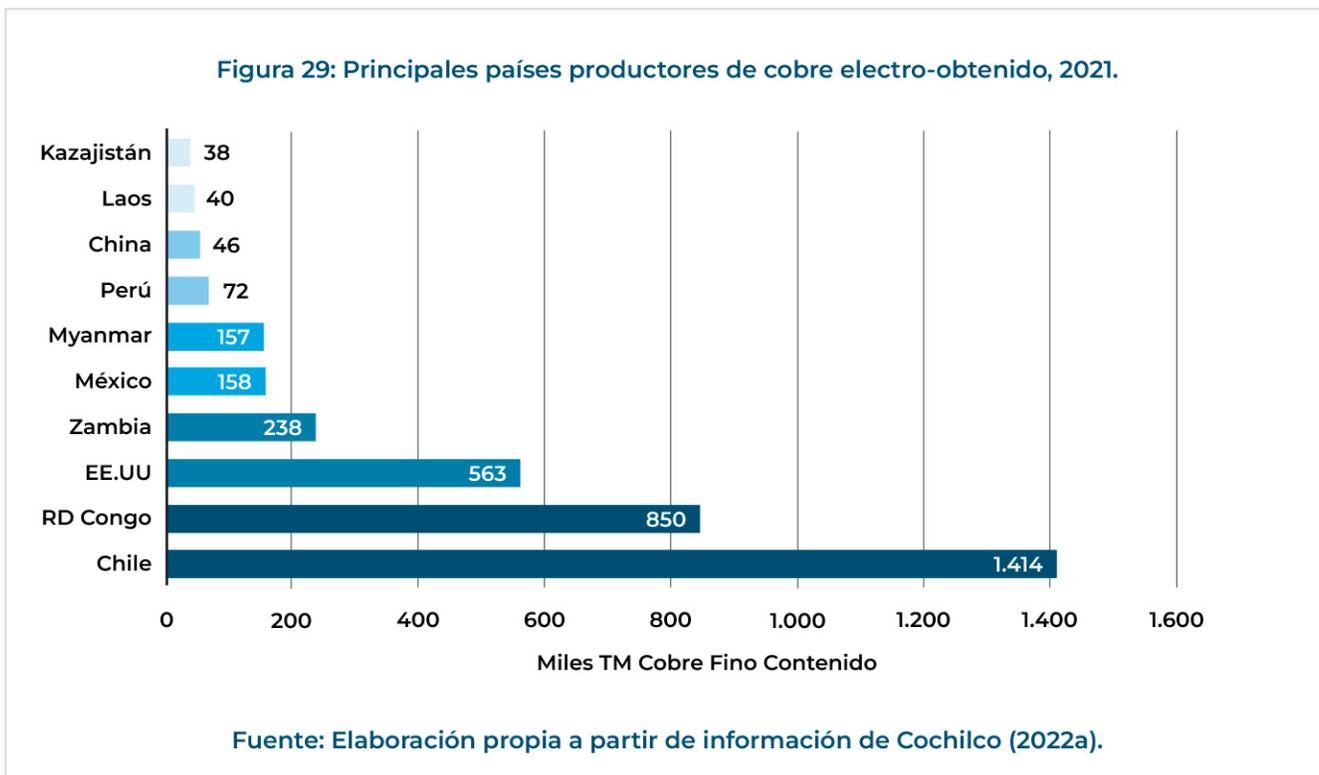


Fuente: Elaboración propia a partir de información de Cochilco (2022a).

En la producción de cobre electro-obtenido nuevamente se repiten algunas de las tendencias de la producción de cobre de mina y en concentrados: América Latina es la principal región productora y África es la región más dinámica con un crecimiento significativo de su producción en la última década. También es relevante destacar la caída de producción en América Latina de 2,3 a 1,7 millones TM de cobre fino contenido, ocurrida principalmente en Chile².

² Entre las principales razones está la caída en las leyes del mineral, problemas en el desarrollo de proyectos que han interferido con la producción, menor disponibilidad hídrica y dificultades operativas de las compañías.

En cuanto a los principales países productores de cobre electro-obtenido, si bien se repiten algunos nombres que están dentro del ranking de los 10 principales países productores de cobre de mina del mundo, hay varios ausentes y otros nuevos, tal y como se puede apreciar en la Figura 29. Se destaca, por un lado, la relevancia de la producción de Chile, R.D. del Congo y Estados Unidos, que representan casi 78% de la producción global. Por otro lado, se ubica un grupo de países con producciones relativamente marginales, por debajo de 50 mil TM de cobre fino contenido al año. Colombia, por su parte, no produce cobre electro-obtenido.

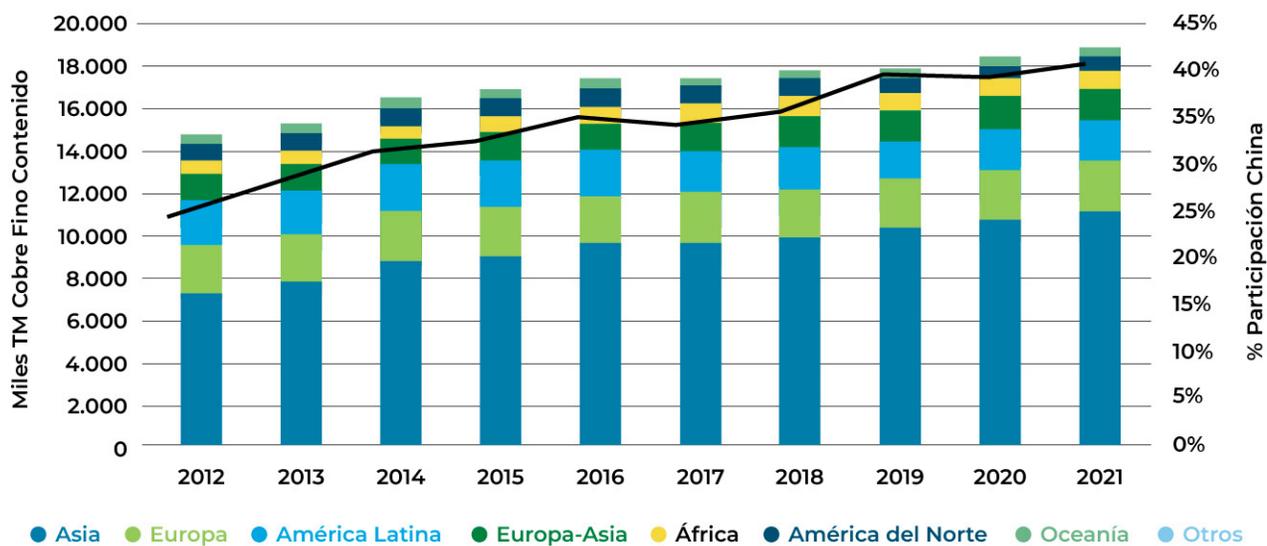


3.3.4 Producción de cobre de fundición

La producción de cobre fundido proviene principalmente de la fusión y conversión de concentrados de cobre. No obstante, en algunos casos las fundiciones primarias (esto es, que procesan concentrados de cobre) también incorporan cantidades variables de chatarra de cobre.

Entre los años 2012 a 2021 la producción mundial de cobre de fundición creció a una tasa promedio de 2,8% anual (levemente superior al crecimiento de la producción de cobre de mina), desde casi 14,8 a 18,9 millones TM de cobre fino contenido (Cochilco, 2022a). Esta tendencia se puede observar en la Figura 30.

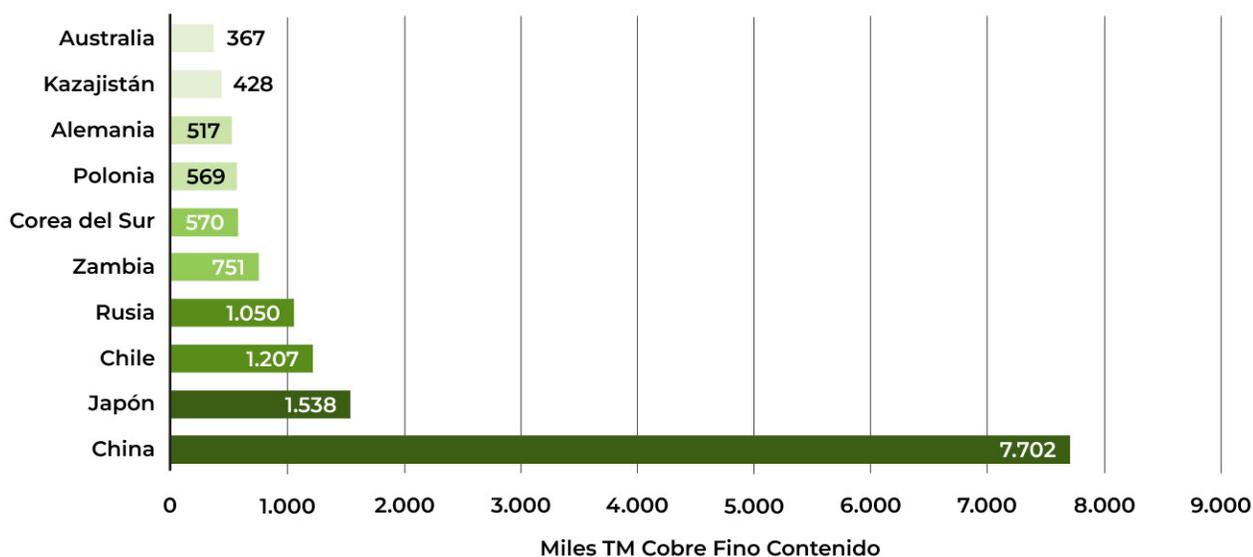
Figura 30: Producción mundial de cobre de fundición por región y participación de China, 2012-2021.



Fuente: Elaboración propia a partir de información de Cochilco (2022a).

La figura también muestra la producción de cobre fundido por regiones. A diferencia de la minería del cobre, la producción de las fundiciones tiene una fuerte concentración en una sola región: Asia, la que representó casi 60% del total mundial en 2021. Esta región incrementó su participación en 10 puntos porcentuales en la última década, gracias al crecimiento de la producción de fundición en China que pasó de producir 3,6 millones TM de cobre fino contenido en 2012 (24% del total mundial) a 7,7 millones TM de cobre fino contenido en 2021 (41% del total mundial). En contraste, en el mismo período la producción de cobre de fundición en el resto del mundo (excluyendo sólo a China) se incrementó en marginales 17 mil TM de cobre fino contenido, o menos de 0,02% de crecimiento anual. Los principales países productores de cobre fundido del mundo se presentan en la Figura 31.

Figura 31: Principales países productores de cobre de fundición del mundo, 2021.



Fuente: Elaboración propia a partir de información de Cochilco (2022a).

La producción de cobre de fundición en América Latina proviene principalmente de Chile con casi dos tercios del total de la región (1,2 millones TM en cobre fino), mientras que Perú cerca de un sexto (348 mil TM en cobre fino), y México y Brasil el otro sexto. Ahora, si bien el mayor exponente de la región, Chile, es el tercer país con mayor producción de cobre fundido del mundo, en 2021 representó menos de 7% de la producción mundial; y la región en su conjunto, menos de 10% de la producción de cobre de fundición a pesar de representar más de 40% de la producción de cobre de mina global.

En el caso de Colombia, a la fecha el país no cuenta con capacidad de fundición de cobre. En forma similar, en los países vecinos tampoco existen fundiciones del metal rojo. No obstante, al igual que en Colombia, en Ecuador se ha propuesto la construcción de fundiciones de cobre, aunque el avance de esta iniciativa está a nivel de idea.

En cuanto al tamaño de las fundiciones, al igual que en la minería del cobre, un porcentaje importante de la producción mundial se obtiene de un número relativamente reducido de operaciones de gran tamaño. En la Tabla 4 se presentan las capacidades de producción de las 20 mayores fundiciones de cobre del mundo.

**Tabla 4: Principales fundiciones de cobre del mundo, 2021.
Capacidad en miles de TM de cobre fino contenido.**

Posición	Horno de fundición	País	Operador/Dueños	Proceso	Capacidad
1	Guixi (fundición)	China	Jiangxi Copper Corp.	Outokumpu Flash	900
2	Birla Copper (Dahej)	India	Birla Group (Hidalco)	Outokumpu Flash, Ausmelt, Mitsubishi Continuous	500
3	Chuquicamata (fundición)	Chile	Codelco	Outokumpu/ Teniente Converter	450
3	Hamburg	Alemania	Aurubis	Outokumpu , Contimelt, Electric	450
3	Saganoseki (fundición)	Japón	JX Nippon Mining & Metals Co.,Ltd.	Outokumpu Flash	450
3	Toyo (fundición)	Japón	Sumimoto Metal Mining Co. Ltd.	Outokumpu Flash	450
7	El Teniente (Caletones)	Chile	Codelco	Reverberatory/ Teniente Conv.	400
7	Chifeng	China	Chiefeng Jifeng (Yunnan Copper 45%, Taisheng 45%, Jingeng Copper 10%)	Side-Blown	400
7	Chinalco Southeast Copper (fundición)	China	Chinalco	Flash fundición	400
7	Jinchuan (Fangchenggang fundición)	China	Jinchuan Non-Ferrous Metal Co.	Flash fundición	400
7	Jinchuan (fundición)	China	Jinchuan Non-Ferrous Metal Co.	Reverberatory/ Kaldo Conv.	400
7	Jinchuan (fundición)	China	Tongling Non-Ferrous Metals Group	Flash fundición	400
7	Xiangguang Copper (fundición)	China	Yanggu Xiangguang Copper Co	Outokumpu Flash	400
7	Sterlite Smelter (Tuticorin)	India	Vedanta	Isasmelt Process	400
7	Norilsk (Nikelevy, Medny)	Rusia	Norilsk Nickel	Reverb, Electric, Vanyukov	400
16	Pirdop (fundición)	Bulgaria	Aurubis (99.77%)	Outokumpu Flash	360
18	Ilo Smelter	Perú	Southern Copper Corp (Grupo Mexico 88.9%, international investment community 11.1%)	Isasmelt Process	360
19	Onahama (fundición)	Japón	Mitsubishi Materials Corp. (Zhejiang Jiangtong Fuye Heding Copper Co., Ltd.)	Mitsubishi/Reverb.	354
19	Heding Copper	China	Jiangxi Copper Corp. (Zhejiang Jiangtong Fuye Heding Copper Co., Ltd)	Side-Blown	350

19	Jinlong (Tongdu)	China	Tongling Non Ferrous Metals Corp. (57.4%), Sumitomo 35%, Pingguo Aluminium Co.	Flash fundición	350
19	Sarchesme Copper Complex (fundición)	Irán	National Iranian Copper Industry Co.	Flash fundición	350

Nota: Los datos de capacidad reflejan capacidades de producción, no necesariamente pronósticos de producción.

Fuente: ICSG (2023).

En conjunto, estas operaciones tienen una capacidad de producción en torno a 8,9 millones TM de cobre fino contenido, lo que representa más de 47% de la producción mundial. De este grupo, 15 fundiciones presentan capacidades de producción por sobre 400 mil TM de cobre fino contenido. Esto es reflejo de la gran relevancia de las economías de escala que presenta esta industria. Adicionalmente, es relevante destacar la alta participación de China en este segmento de grandes fundiciones, contando con la fundición más grande del mundo (Guixi de Jiangxi Copper Corp. con una capacidad de 900 mil TM de cobre fino contenido al año) y con siete de las 15 fundiciones con capacidades de producción por sobre 400 mil TM de cobre fino contenido al año.

En comparación, los proyectos mineros actualmente identificados en Colombia, en su conjunto, tendrían un potencial de alimentar, como máximo, una fundición con una capacidad de producción de 200 mil TM de cobre fino contenido (Dufey et al., 2023).

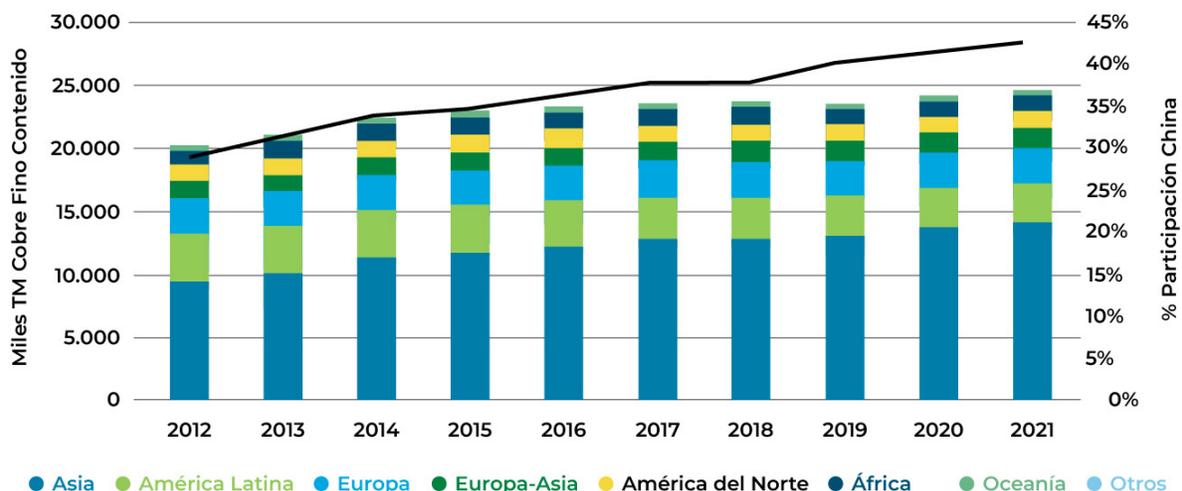


3.3.5 Producción total de cobre refinado

La producción de cobre refinado proviene principalmente de la refinación del cobre de fundición (refinación a fuego o refinación electrolítica) y, en menor medida, del cobre refinado electro-obtenido y del cobre refinado secundario (desde chatarra).

Entre los años 2012 a 2021 la producción mundial de cobre refinado creció a una tasa promedio de 2,2% anual, inferior al crecimiento de la producción de cobre de mina, desde 20,2 a 24,6 millones TM de cobre fino contenido (Cochilco, 2022a). Esta tendencia se observa en la Figura 32.

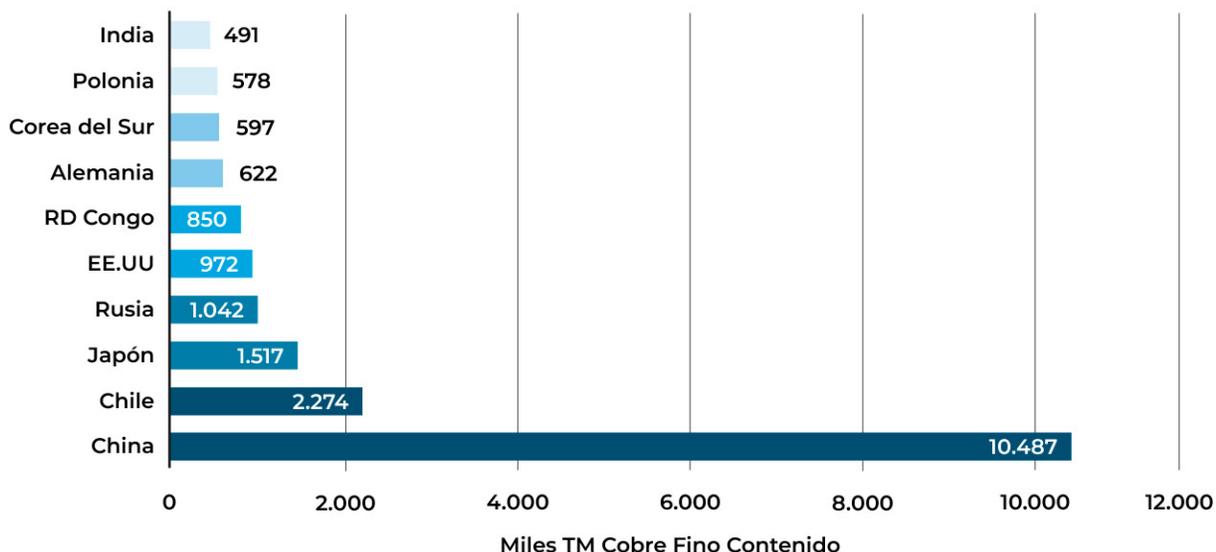
Figura 32: Producción mundial de cobre refinado por región y participación de China, 2012-2021.



Fuente: Elaboración propia a partir de información de Cochilco (2022a).

La figura también muestra la producción de cobre refinado por regiones. A diferencia de la minería del cobre, y en forma similar a la producción de cobre de fundición, la producción de cobre refinado tiene una fuerte concentración en Asia con casi un 58% del total mundial en 2021. Esta región incrementó su participación en 11 puntos porcentuales en la última década, en línea con el aumento de producción de fundición. Nuevamente, la industria China fue la responsable de este crecimiento, pasando de producir casi 5,9 millones TM de cobre fino contenido en 2012 (29% del total mundial) a 10,5 millones TM de cobre fino contenido en 2021 (43% del total mundial). En contraste, en el mismo período la producción de cobre refinado en el resto del mundo (excluyendo sólo a China) disminuyó en 240 mil TM de cobre fino contenido, o un retroceso de -0,2% anual. Los principales países productores de cobre refinado del mundo se presentan en la Figura 33.

Figura 33: Principales países productores de cobre refinado del mundo, 2021.



Fuente: Elaboración propia a partir de información de Cochilco (2022a).

La producción de cobre refinado en América Latina proviene principalmente de Chile con tres cuartos del total de la región (2,3 millones TM en cobre fino contenido), mientras que México y Perú con un octavo y un décimo respectivamente. Ahora bien, si bien el mayor exponente de la región, Chile, es el segundo productor de cobre refinado del mundo, en 2021 representó menos de 9% de la producción mundial; y la región en su conjunto, menos de 12% de la producción de cobre refinado a nivel global.

En el caso de Colombia, a la fecha el país no cuenta con capacidad de refinación de cobre. En forma similar, en los países vecinos tampoco existen refinerías del metal rojo.

En cuanto al tamaño de las refinerías, se repite la estructura productiva de las fundiciones; un porcentaje importante de la producción mundial se obtiene de un número relativamente reducido de operaciones de gran tamaño. En la Tabla 5 se presentan las capacidades de producción de las 20 mayores refinerías de cobre del mundo.

**Tabla 5: Principales refinerías de cobre del mundo, 2021.
Capacidad en miles de TM de cobre fino.**

Posición	Refinería	País	Dueños	Proceso	Capacidad
1	Guixi	China	Jiangxi Copper Corporation	Electrolytic	1100
2	Shandong Fangyuan (refinería)	China	Dongying, Shandong	Electrolytic	700
3	Daye/Hubei (refinería)	China	Daye Non-Ferrous Metals Co.	Electrolytic	600
4	Jinchuan	China	Jinchuan Non Ferrous Co.	Electrolytic	600
5	Yunnan Copper	China	Yunnan Copper Industry Group (64.8%)	Electrolytic	500
6	Birla	India	Birla Group (Hidalco)	Electrolytic	500
7	Sterlite Refinería	India	Vedanta	Electrolytic	460
7	Pyshma Refinería	Rusia	UMMC (Urals Mining & Metallurgical Co.)	Electrolytic	460
9	Toyo (refinería)	Japón	Sumitomo Metal Mining Co. Ltd.	Electrolytic	450
9	Amarillo	Estados Unidos	ASARCO (Grupo México)	Electrolytic	450
9	Chuquicamata refinería	Chile	Codelco	Electrolytic	450
12	Onsan Refinería I	República de Corea	LS-Nikko Co. (LS, Nippon Mining)	Electrolytic	440
13	Hamburg (refinería)	Alemania	Aurubis	Electrolytic	416
14	El Paso (refinería)	Estados Unidos	Freeport-McMoRan Copper & Gold Inc.	Electrolytic	415
15	Las Ventanas	Chile	Codelco	Electrolytic	410
16	Baiyin Jinguan (refinería)	China	Baiyin Nonferrous Metals	Electrolytic	400
16	Jinguan (refinería)	China	Tongling Non-Ferrous Metals Group	Electrolytic	400
16	Jinlong (Tongdu) (refinería)	China	Tongling Non-Ferrous Metals Corp. 52%, Sharpline International 13%, Sumitomo Corp. 7.5%, Itochu Corp. 7.5%	Electrolytic	400
16	Zijin	China	Zijin Mining Company 50%, Minxi Xinghang 50%	Electrolytic	400
16	Xiangguang Copper (refinería)	China	Yanggu Xiangguang Copper Co	Electrolytic	400
16	Chiefeng (refinería)	China	Chifeng Jinfeng (Yunnan Copper)	Electrolytic	400
16	Jinchuan (Fangchenggang refinería)	China	Jinchuan Non-Ferrous Metal Co.	Electrolytic	400
16	Chinalco Southeast Copper (refinería)	China	Chinalco	Electrolytic	400
16	Morenci (SX-EW)	Estados Unidos	Freeport-McMoRan Inc 72%, 28% affiliates of Sumitomo Corporation	Electrowinning	400

Nota: Los datos de capacidad reflejan capacidades de producción, no necesariamente pronósticos de producción.

Fuente: ICSG (2023).

En conjunto, estas operaciones tienen una capacidad de producción en torno a 11,5 millones TM de cobre fino contenido, lo que representa más de 47% de la producción mundial. De este grupo, las 20 refinerías presentan capacidades de producción por sobre 400 mil TM de cobre fino contenido. Al igual que en el caso de las fundiciones, esto es reflejo de la gran relevancia de las economías de escala que presenta esta industria, y de la estrecha relación entre las operaciones de fundición y refinación. Adicionalmente, es relevante destacar la alta participación de China en este segmento de grandes refinerías de cobre, contando con la refinería más grande del mundo (Guixi de Jiangxi Copper Corp. con una capacidad de 1,1 millones TM de cobre fino contenido al año), con las cinco más grandes globalmente, y con 13 de las 24 refinerías con capacidades de producción por sobre 400 mil TM de cobre fino contenido al año.

En comparación, los proyectos mineros actualmente identificados en Colombia en su conjunto tendrían un potencial de alimentar, como máximo, una refinería con una capacidad de producción de 200 mil TM de cobre fino contenido (Dufey, et al., 2023).

3.4 Industria de semi manufacturas de cobre

- Los productos o bienes semi elaborados de cobre comprenden productos industriales en base a cobre de uso intermedio (se utilizan como insumos para la fabricación de productos finales); y en todos los casos, poseen un nivel de elaboración industrial relativamente bajo (Cochilco, 2021).

Siguiendo la clasificación de la consultora CRU Consulting y del International Wrought Copper Council (IWCC), los productos semi manufacturados de cobre se pueden dividir en cuatro categorías principales: alambroón; tubos; varas, barras y secciones; y pletinas, láminas, tiras y foil (Cochilco, 2021), cuyos usos se identifican en la Tabla 6.

Tabla 6: Clasificación de productos semi manufacturados de cobre y sus principales usos.

Producto	Usos
Alambroón	Fabricación de cables de cobre para construcción, distribución de energía y telecomunicaciones.
Tubos	Construcción, gasfitería y sistemas de calefacción, ventilación, aire acondicionado y refrigeración.
Varas, barras y secciones	Equipamiento industrial no eléctrico y gasfitería.
Pletinas, láminas, tiras y foil	Industria electrónica, automotriz y generación eléctrica.

Fuente: Cochilco (2021).

En general, el alambroón se produce directamente a partir de cátodos de cobre refinado y sólo un porcentaje menor se combina con otros metales, a diferencia del resto de categorías que se pueden fabricar tanto a partir de cobre refinado como de chatarra de uso directo (chatarra que se utiliza directamente en las plantas de semi manufacturas de cobre). Es así como las últimas tres categorías resultan en productos de cobre y aleaciones de cobre con cinc, níquel u otros materiales (Cochilco, 2021).

En lo que sigue de esta subsección, se analiza la industria de semi manufacturas de cobre desde tres perspectivas: los tipos de productos ofrecidos por la industria; la distribución geográfica de la oferta y demanda; y el uso final que se le da a las semi manufacturas de cobre.

En términos del tipo de productos ofertados y demandados por el mercado no existe una diferencia significativa, ya que los distintos mercados de semi manufacturas de cobre presentan un equilibrio de largo plazo (oferta igual a la demanda), con diferencias anuales menores entre oferta y demanda que pueden ser cubiertas por los inventarios disponibles.

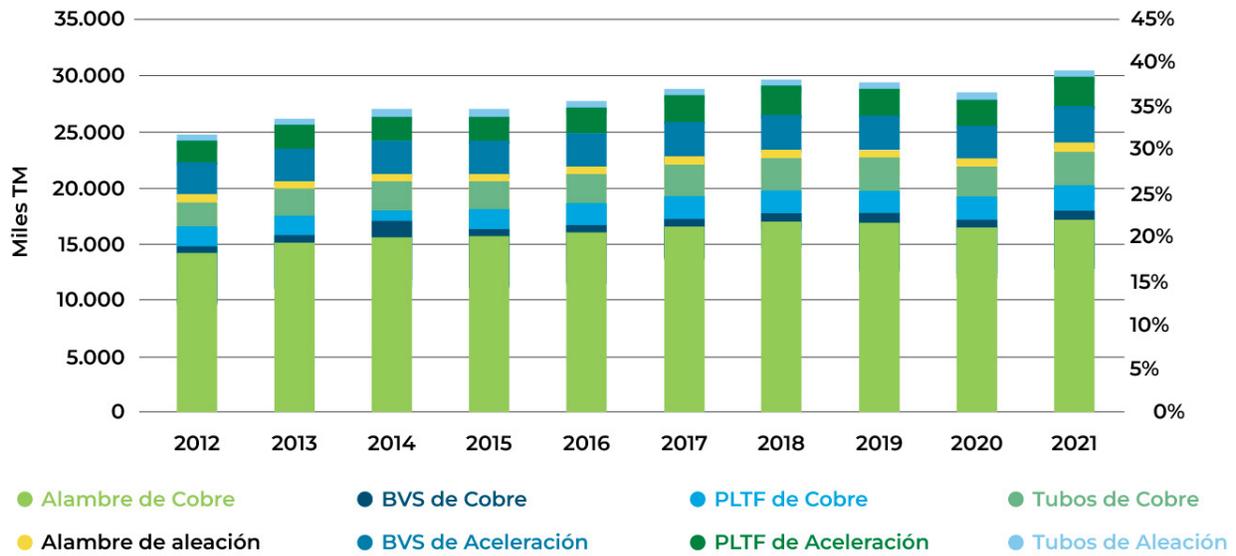
Por otro lado, en términos de origen geográfico de la oferta y la demanda, sí podrían existir diferencias relevantes, generando un mercado de comercio exterior para las semi manufacturas de cobre. No obstante, de la revisión de la base de datos del IWCC (2023) se puede apreciar que, al menos a nivel regional, no existen grandes diferencias entre la producción y la demanda interna de cada región. Es decir, que existe un equilibrio geográfico entre ambas variables. Por tanto, se puede concluir que existe una estrecha relación geográfica entre los productores de semi manufacturas de cobre y quienes la compran para generar manufacturas de uso intermedio o final. En consecuencia, en esta subsección sólo se analiza la producción de semi manufacturas de cobre desde el punto de vista de los tipos de productos ofertados y de la distribución geográfica de esta producción, ya que el análisis de la demanda en estos dos ámbitos es redundante.



3.4.1 Producción de semi manufacturas de cobre

Empleando las categorías presentadas en la Tabla 6, la Figura 34 muestra la evolución de la producción de semi manufacturas de cobre desde 2012 hasta 2021. La tendencia en la producción es creciente, pasando de 24,6 a 30,4 millones TM de cobre fino contenido, con una tasa promedio anual de 2,3% durante ese período. Se observa que el alambroón es el principal producto de semi manufacturas de cobre a nivel mundial, con una participación de 57% del total en 2021. Esto se debe a la importancia del alambroón en los sectores de construcción e infraestructura eléctrica, que representan en torno al 36% y 23% respectivamente del consumo mundial de alambroón de cobre (Cochilco, 2021). Le siguen en importancia las barras, varas y perfiles o secciones (BVS) de aleaciones de cobre; los tubos o cañerías de cobre; las pletinas o placas, láminas, tiras y *foils* (PLTF) de aleaciones de cobre; y, los PLTF de cobre; con participaciones de entre 11 y 8% cada uno.

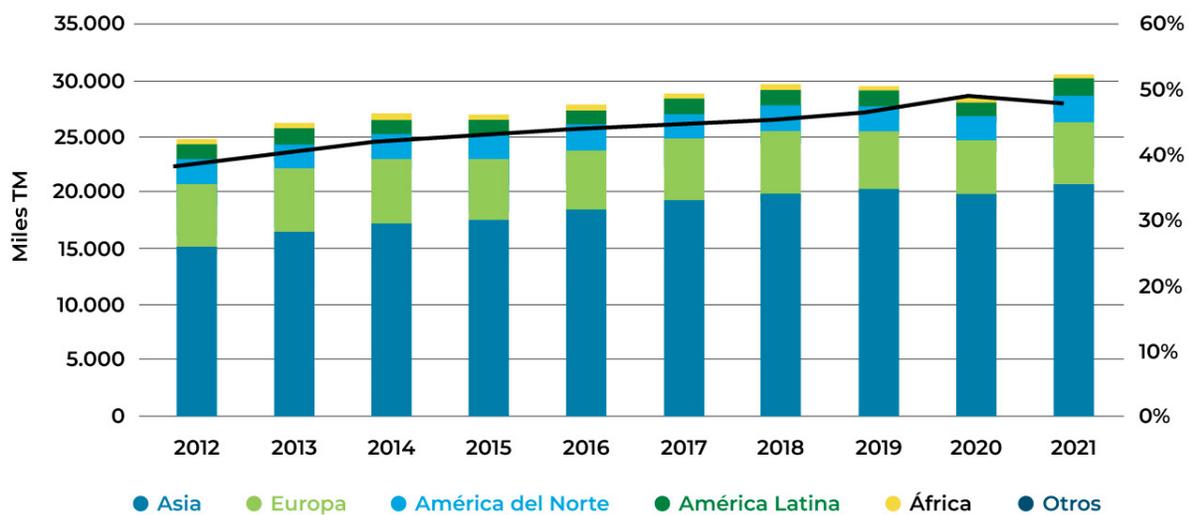
Figura 34: Producción mundial de semi manufacturas de cobre por tipo de producto, 2012-2021. BVS, barras, varas y secciones; PLTF, pletinas o placas, láminas, tiras y foils.



Fuente: Elaboración propia a partir de información del IWCC (2023).

En cuanto a la distribución geográfica de la producción de semi manufacturas de cobre, ésta se concentra considerablemente en Asia, como lo muestra la Figura 35. En la actualidad este continente concentra poco menos de 70% de la producción mundial, seguido de Europa con 18% y el resto de las regiones con menos del 10% cada una. En Asia el mayor contribuyente es China, produciendo 70% de las semi manufacturas de cobre del continente y casi 50% del total mundial en 2021. Otros países relevantes para este mercado desde el punto de vista de la producción son: Japón, Corea del Sur, India y el grupo de países ASEAN (en particular, Indonesia, Malasia Tailandia y Vietnam) en Asia; y Estados Unidos, Alemania, Italia y Rusia en el resto del mundo.

Figura 35: Producción mundial de semi manufacturas de cobre por región, 2012-2021. Participación de China en la producción mundial de semi manufacturas de cobre.



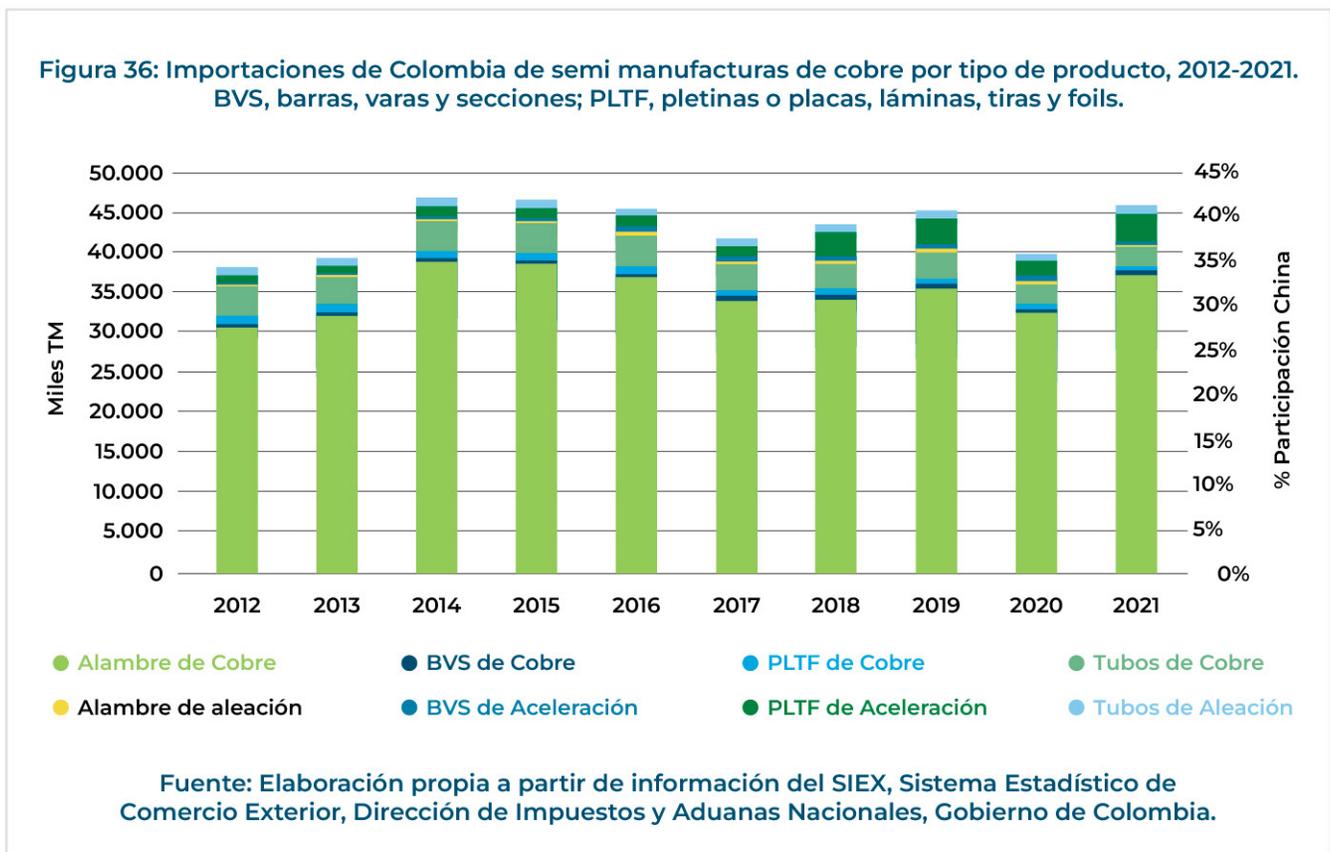
Fuente: Elaboración propia a partir de información del IWCC (2023).

En la Figura 35 también se puede observar la tendencia temporal en la distribución geográfica de la producción de semi manufacturas de cobre. Entre los años 2012 y 2021, el 97% del incremento en la producción fue provisto por Asia, y de ese aumento en la producción, un 92% ocurrió en China. Esta concentración de la producción de semi manufacturas de cobre en este país asiático es una tendencia de larga data y que se ha intensificado en las últimas dos décadas. Según Cochilco (2021), en 2005 China producía casi 4,8 millones TM de semis de cobre, y en 16 años triplicó esta producción al alcanzar un volumen de 14,5 millones TM de semis de cobre en 2021.

En contrapartida, otros países y regiones mostraron una reducción en sus producciones en el mismo período. En 2005 Estados Unidos produjo 3,1 millones TM de semis (14% de la producción mundial), mientras que en 2020 llegó a 2,1 millones TM de semis (7,5% de la producción mundial); y en el caso de Europa, ésta pasó de producir casi 6,4 millones TM en 2005 (28%) a 4,5 millones TM de semis en 2020 (16%) (Cochilco, 2021).

En cuanto a Colombia, no se cuentan con antecedentes sobre la producción de semi manufacturas de cobre en el país. No obstante, si existe información sobre la importación de cobre en distintos niveles de pureza (blíster, ánodos, cátodos), y datos sobre las importaciones de semi manufacturas de cobre. Del primer grupo, se puede comentar que hasta mediados de la década pasada Colombia importaba entre 2 mil y 17 mil TM de cobre fino contenido en diversos productos, principalmente como cátodos de cobre, y luego chatarra y en menor medida otros productos con contenidos de cobre. Sin embargo, a partir de 2015 estas importaciones no han superado los 2,5 mil TM de cobre fino contenido.

En cuanto al segundo grupo, y siguiendo la clasificación de la IWCC, la Figura 36 muestra las importaciones de semi manufacturas de cobre para el período 2012-2021.



Como se puede apreciar, para todo el período de análisis las importaciones de semi manufacturas de cobre de Colombia se han movido entre 40 y 45 mil TM de cobre fino contenido por año, alcanzando 45,8 mil TM de cobre fino contenido en 2021. De éstas, los alambres de cobre representan en torno a 80% de todas las importaciones (37,4 miles de TM de cobre fino contenido).



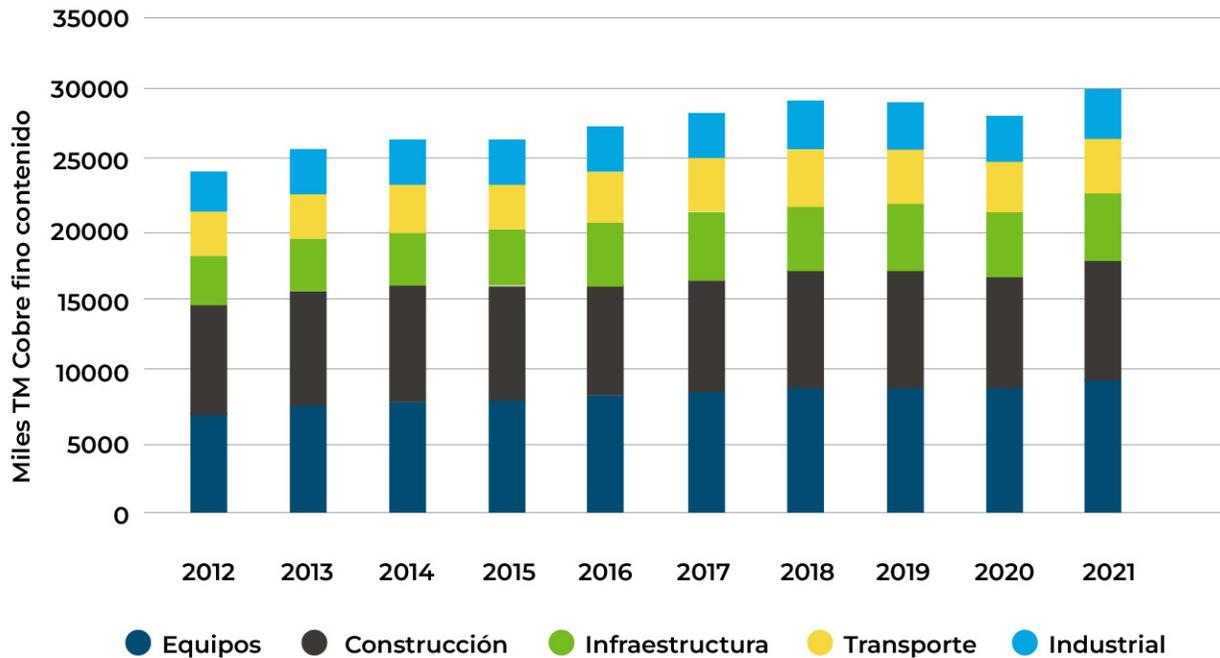
3.4.2 Uso final de semi manufacturas de cobre

Respecto al uso final de productos semi manufacturados de cobre, el IWCC los divide en cinco categorías, las que se enumeran a continuación (IWCC, 2023):

- **Construcción (plomaría o cañerías, instalaciones de edificios, arquitectura, comunicaciones y energía eléctrica).**
- **Infraestructura (transmisión y distribución de energía eléctrica y telecomunicaciones).**
- **Industrial (eléctrico y no eléctrico).**
- **Transporte (automotriz eléctrico, automotriz no eléctrico y otros transporte).**
- **Otros equipos y maquinarias (productos de consumo y generales, equipos de refrigeración, equipos electrónicos y equipos diversos).**

En términos generales, la participación de cada categoría en el uso final del cobre se ha mantenido bastante constante en los últimos años. En la Figura 37 se muestran las toneladas de cobre fino contenido en los productos de cada categoría para la última década.

Figura 37: Uso final de semi manufacturas de cobre por categorías a nivel mundial, 2012-2021.

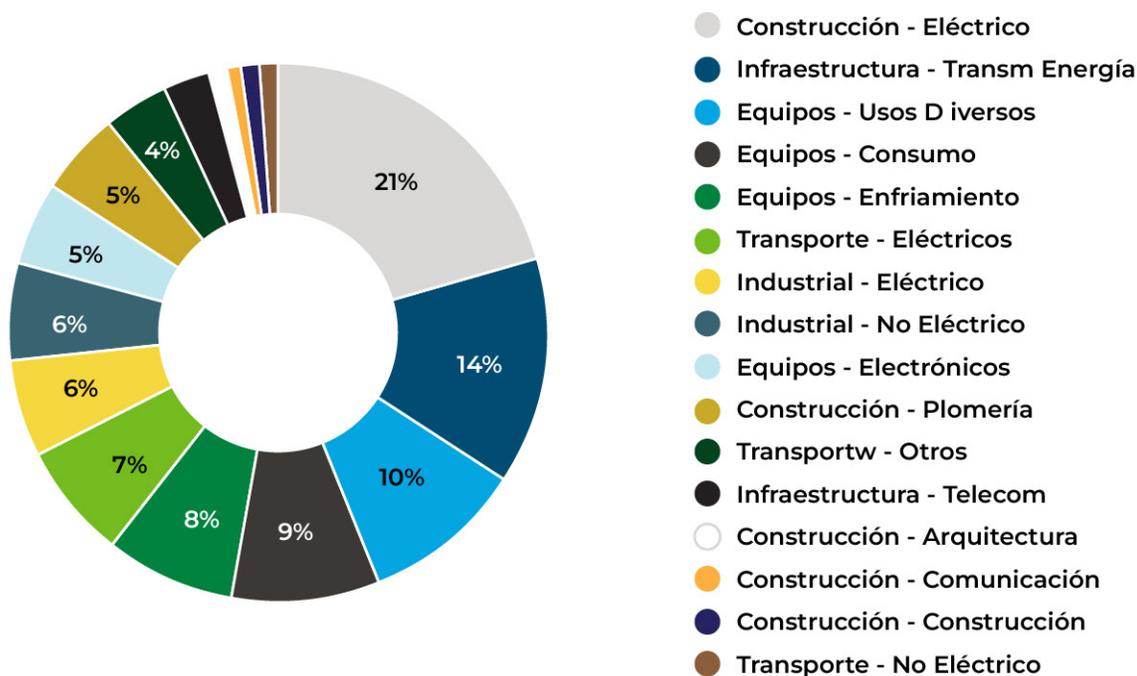


Fuente: Elaboración propia a partir de información del IWCC (2023).

Como se puede apreciar de dicha figura, las dos categorías principales son los equipos y construcción, que en conjunto representan en torno a 60% del uso final del cobre. El cambio más notable, es que la primera superó a la segunda en 2015, y se ha mantenido con el sector más relevante con casi un tercio del consumo de cobre, o casi 9,6 millones TM de cobre fino contenido en equipos de distinta índole en 2021.

Dentro de la categoría equipos, si bien todas las subcategorías han crecido a tasas promedio por sobre 2,5% anual, destaca el crecimiento de los equipos electrónicos, que en la última década muestran alzas anuales promedio de más de 5,7%. En contraste, en la categoría construcción la mayoría de las subclases presentan tasas de crecimiento promedio por debajo de 1%, destacándose sólo la subcategoría instalaciones con un crecimiento promedio de 4,5% anual. Sin embargo, este uso final es el segundo menos relevante en términos de la cantidad de cobre que utiliza (240 mil TM de cobre fino contenido en 2021) y representa menos del 1% de la demanda final del cobre. Adicionalmente, hay que destacar que en la categoría construcción el uso de cobre en instalaciones eléctricas presenta una tasa de incremento anual promedio de 0,9%, que si bien parece relativamente baja es un buen crecimiento para un sector maduro, y que representa por sí misma la principal aplicación del metal rojo con más de 20% de su uso final total en 2021 con 6,1 millones TM de cobre fino contenido (Figura 38).

Figura 38: Uso final de semi manufacturas de cobre por subcategorías a nivel mundial, 2021.



Fuente: Elaboración propia a partir de información del IWCC (2023).

En efecto, la Figura 38 muestra los usos finales para el cobre, pero desagregados en subcategorías, para 2021. Como ya se explicó, el uso en electrificación de construcciones (Construcción – Eléctrico) es el principal con 21% del total. Lo sigue la aplicación en infraestructura para la generación, transmisión y distribución de energía eléctrica con 14%, subcategoría que además muestra la segunda mayor tasa de crecimiento promedio con un 4,7% anual durante la última década (4,0 millones TM de cobre fino contenido en 2021). Luego viene el uso en la fabricación de equipos de diversa índole con 10%, y el resto de los usos siguen con porcentajes menores a un décimo del total (29,8 millones TM de cobre fino contenido en 2021). Por último, cabe destacar que en estas cifras todavía no se aprecia un incremento significativo del uso de cobre relacionado a la electromovilidad. Las categorías transporte suman menos de 12% del uso final de este metal, y presentan tasas de crecimiento relativamente acotadas en la última década (2,4% anual promedio para el uso en transporte en temas eléctricos y 1,7% anual promedio para el uso en otros elementos de los vehículos de transporte). No obstante, se espera que este sector sea un gran impulsor de la demanda de cobre en las próximas décadas, como lo señalan distintos estudios internacionales.



3.5

Mercados, comercio, costos y precios en la industria del cobre

- Las secciones anteriores analizan las tendencias y la desagregación de los principales eslabones de la cadena de valor de la industria del cobre mostrada en la Figura 21. Sin embargo, no se profundiza acerca de cómo están
- estructurados los mercados y el comercio asociado a los principales productos de esta industria. En esta sección se entregan antecedentes adicionales
- acerca del comercio internacional de los productos, estructura de costos y los precios en cada segmento.



3.5.1 Exploración de minerales y proyectos mineros

Si bien el objetivo final del eslabón de exploración, recursos minerales y reservas mineras es proveer mineral de cobre al mercado, es importante destacar que, a diferencia de otras industrias mineras como el hierro o el aluminio en donde se comercializa el mineral sin procesamiento, en el caso del cobre no existe un mercado para este producto intermedio. Por lo tanto, en el caso del cobre el producto de la etapa de exploración son los prospectos o proyectos mineros.

La industria de la exploración minera está conformada principalmente de tres segmentos de empresas: empresas junior, intermedias y *major*. Las primeras son empresas pequeñas, dedicadas exclusivamente al proceso de exploración. Su objetivo es encontrar un depósito mineral con potencial de ser explotado técnica, económica, ambiental y socialmente, para venderlo a otra empresa que finalmente lo desarrolle y explote. En general, avanzan en el desarrollo del recurso mineral desde la exploración básica hasta la exploración de seguimiento o avanzada, es decir, hasta que se tiene un prospecto con información suficiente para sustentar estudios de ingeniería. Por su parte, las intermedias son empresas mineras que tienen operaciones en funcionamiento, pero cuya capacidad productiva es relativamente acotada y no son actores principales en el mercado de producción de cobre. Usualmente, su participación en la etapa de exploración está asociada al crecimiento de su capacidad productiva para uno de dos objetivos: aumentar su influencia en el mercado o bien aumentar su atractivo para ser adquiridas o fusionarse con otras empresas. Finalmente, las empresas *major* son los grandes productores mineros. Usualmente estas empresas participan de las actividades de exploración para aumentar su base de recursos y alimentar su crecimiento. Lo anterior, debido a que el costo de exploración usualmente es menor que el costo de adquirir recursos/depositos mediante la adquisición de otras compañías (usualmente junior o intermedias). No obstante, las empresas *major* igualmente participan activamente en la adquisición o fusión con otras compañías para sustentar su crecimiento.

Si bien no existe información pública con respecto a los presupuestos de exploración de cobre por tipo de compañía (*junior*, intermedias y *major*), si lo está disponible para el total de exploración de minerales no ferrosos. De acuerdo con dicha información, para 2021 las empresas *junior* representaron un 37% del total de gastos de exploración, las *major* un 50%, y las intermedias un 10%. El resto está asociado a la exploración que realizan los gobiernos a través de oficinas o reparticiones relacionadas a sector minero (S&P, 2022). Si bien esta estadística está influenciada por la exploración de oro, que representó el 55% de los gastos en exploración en minerales no ferrosos a nivel mundial en 2021, este segmento es un reflejo de lo que ocurre en otras industrias de minerales no ferrosos. En el caso del cobre, usualmente se aprecia una participación mayor de las empresas

major, lo que va en desmedro del sector *junior*, pero las diferencias no son tan significativas. Por lo tanto, se puede esperar que para el caso del cobre entre 50 y 60% de los gastos de exploración sean llevados a cabo por empresas *major*, y entre 30 y 40% por las *junior*.

En cuanto al financiamiento, el principal mercado de financiamiento de las empresas mineras es la London Stock Exchange (LSE). En esta bolsa de comercio se encuentran listadas las principales empresas mineras *major*. También son relevantes en este segmento las bolsas de comercio de Estados Unidos (NYSE), de Australia (ASX) y de Canadá (TSX). Estos dos últimos mercados, por su parte, son el origen principal de financiamiento de las empresas *junior* de exploración, y también de las empresas mineras intermedias.

En términos de los costos de descubrimiento, durante los últimos 30 años ha existido una gran variabilidad, tal y como lo muestra en la Tabla 2. Al mismo tiempo, es claro que el costo de descubrir una tonelada de cobre fino ha aumentado considerablemente. En efecto, entre 1990 y 2005 el costo varió usualmente entre cinco y 50 USD/t de cobre fino contenido, mientras que en la última década los costos de descubrimiento de cobre no han bajado de 100, llegando incluso a valores por sobre 1,000 USD/t de cobre fino contenido.



3.5.2 Industria primaria del cobre

Como se desprende de las secciones anteriores, en la industria primaria del cobre se tiene, esencialmente, tres tipos de actores y tres tipos de productos principales que se comercializan.

Los actores son las empresas/operaciones mineras que producen concentrados de cobre y cátodos de cobre electro-obtenidos; las fundiciones que comercializan cobre fundido (ánodos de cobre principalmente); y las refinerías que comercializan cátodos de cobre electro-refinados. Entre estos actores se pueden dar distintas formas de arreglos empresariales. Por ejemplo, hay empresas/operaciones que tienen integradas las etapas de minería, fundición y refinación, y otras que integran fundición y refinería. Sin embargo, en la actualidad el esquema más usual es que la operación minera (mina-planta concentradora) se encuentre desintegrada de la fundición, pero que fundición y refinería estén integradas (ver para este último caso la Tabla 4 y la Tabla 5). Con base en ello, los mercados principales están asociados a la comercialización de concentrados de cobre y de cobre refinado. Por ejemplo, en 2021 las exportaciones de concentrados de cobre alcanzaron a casi 12 millones TM y las de refinado 7,6 millones TM de cobre fino contenido; mientras, el cobre blíster³ comercializado internacionalmente llegó a menos de un millón de TM de cobre fino contenido (981

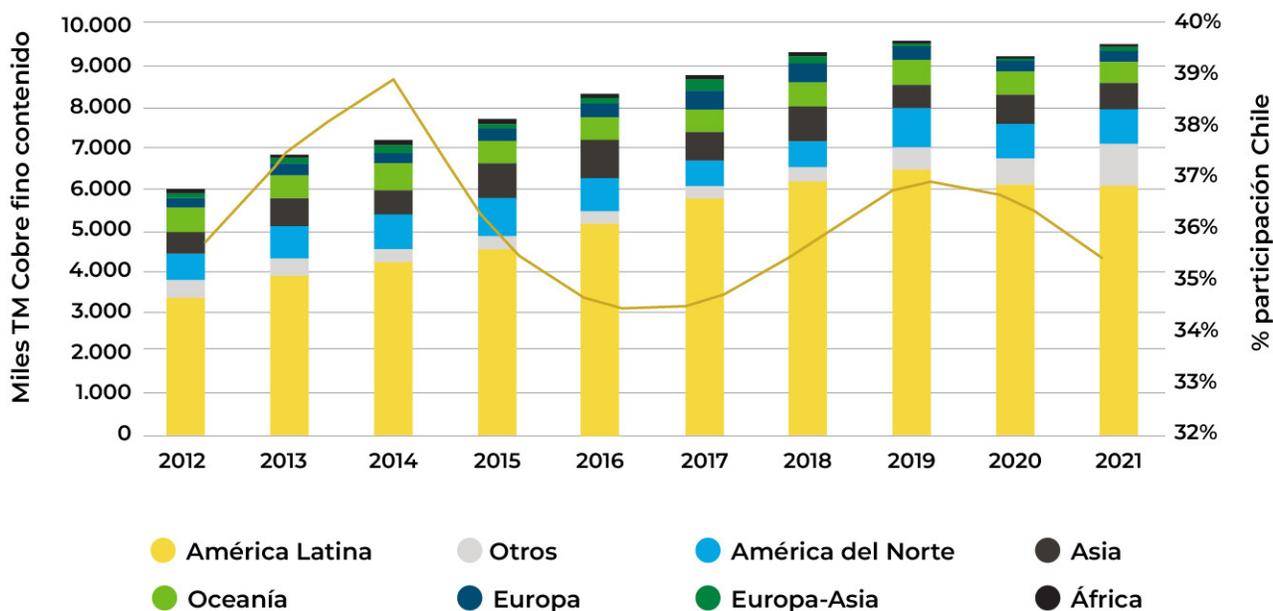
³ Es el cobre impuro proveniente de los hornos convertidores en el proceso pirometalúrgico del cobre. Debido a su apariencia “ampollosa”, producto del aire inyectado en los convertidores, se le llama “blíster” (ampolla, en inglés). Contiene un 99,30% de cobre fino.

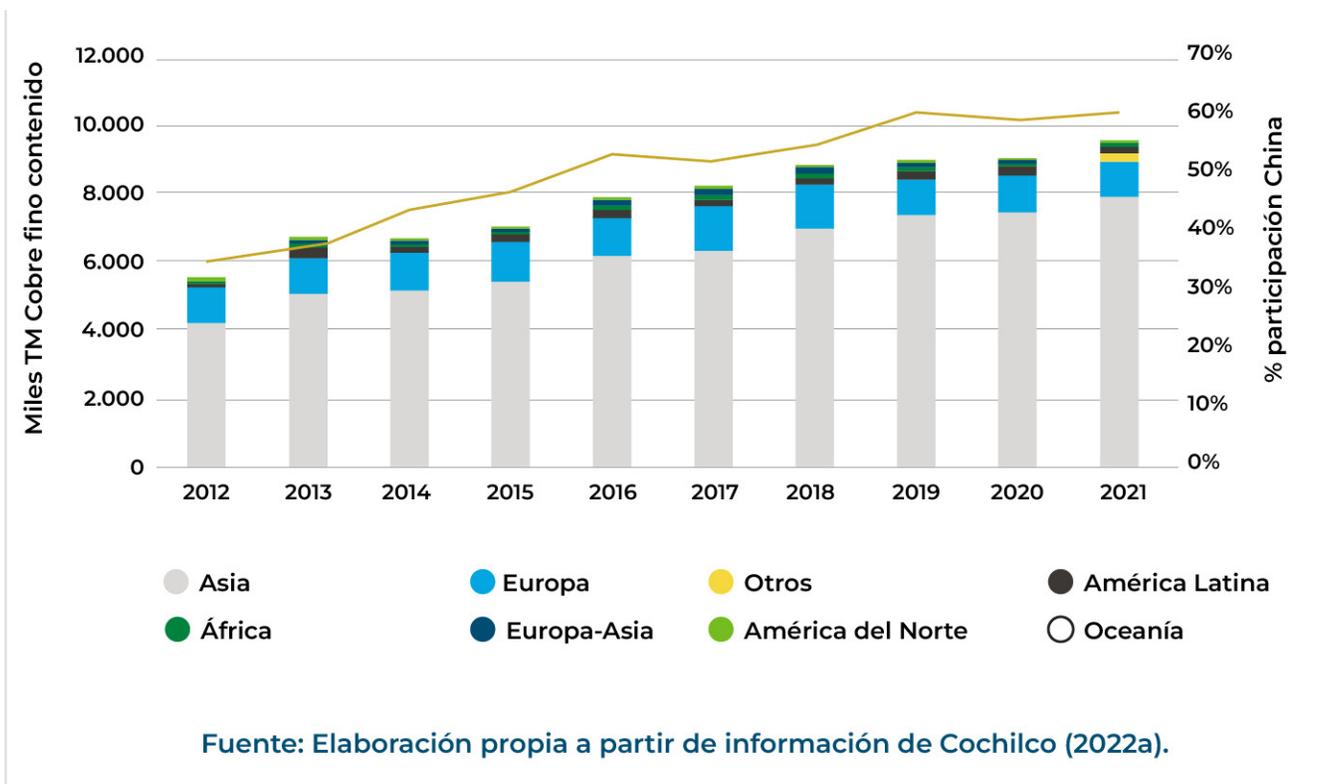
mil TM de cobre fino contenido) (Cochilco, 2022a). Las operaciones mineras se encuentran en las regiones y países que cuentan con recursos minerales de cobre significativos, muchos de los cuales son países en vías de desarrollo con escasa producción manufacturera: Chile, Perú, R.D. del Congo, Zambia, etc.

Por otro lado, las fundiciones y refinerías han sufrido cambios relevantes en su localización geográfica en el último siglo. Durante la primera parte del Siglo XX éstas se instalaban cerca de las operaciones mineras, ya que el costo de transporte tenía un impacto significativo en los costos finales del producto final, en este caso, el cobre refinado. Sin embargo, después de la Segunda Guerra Mundial y con la reducción significativa de los costos de transporte marítimo en las décadas de 1940 a 1970 (Tilton y Guzmán, 2016), una parte relevante de la nueva capacidad de fundición y refinación se instaló cercana a los puntos de consumo final de los productos de cobre (industria manufacturera), principalmente en Europa y en Japón (reconstrucción post guerra). Esa tendencia continuó en las últimas décadas con el desarrollo económico de los países asiáticos; en particular con los procesos de desarrollo y generación de capacidad de producción de manufactura en Corea del Sur y China, y en los últimos años en India y los países del Sudeste Asiático (Indonesia, Malasia, Tailandia y Vietnam, principalmente). Por lo tanto, existe un importante mercado de comercio internacional de concentrados de cobre y de cátodos de cobre o cobre refinado.

La Figura 39 muestra las principales regiones exportadoras e importadoras de concentrados de cobre en términos de cobre fino, donde el grafico superior muestra las exportaciones y el inferior las importaciones. Se observa que América Latina es la principal región exportadora con casi dos tercios del total mundial, en donde Chile y Perú representan más del 85% de la contribución de la región. Esto da cuenta de la relevancia de estos dos países en la producción de cobre de mina. En 2021 Chile representó el 35% de las exportaciones mundiales de cobre en concentrados (3,3 millones TM de cobre fino contenido) mientras que Perú tuvo una participación de 20%. Es posible indicar que en el caso de las exportaciones no ha habido grandes diferencias en participación en la última década. En cuanto a las importaciones, la participación de China muestra una persistente tendencia al alza en las últimas décadas que se ha ido acentuado, reflejado en un incremento de su participación desde un 35% en 2012 a un 61% del total en 2021 (Cochilco, 2022a). Lo anterior nos indica que la compra de concentrados de cobre actualmente se encuentra en su gran mayoría dominado por el país asiático desde la demanda, y por Chile y Perú desde la oferta.

Figura 39: Exportaciones e importaciones de cobre en concentrados por regiones, 2012-2021.

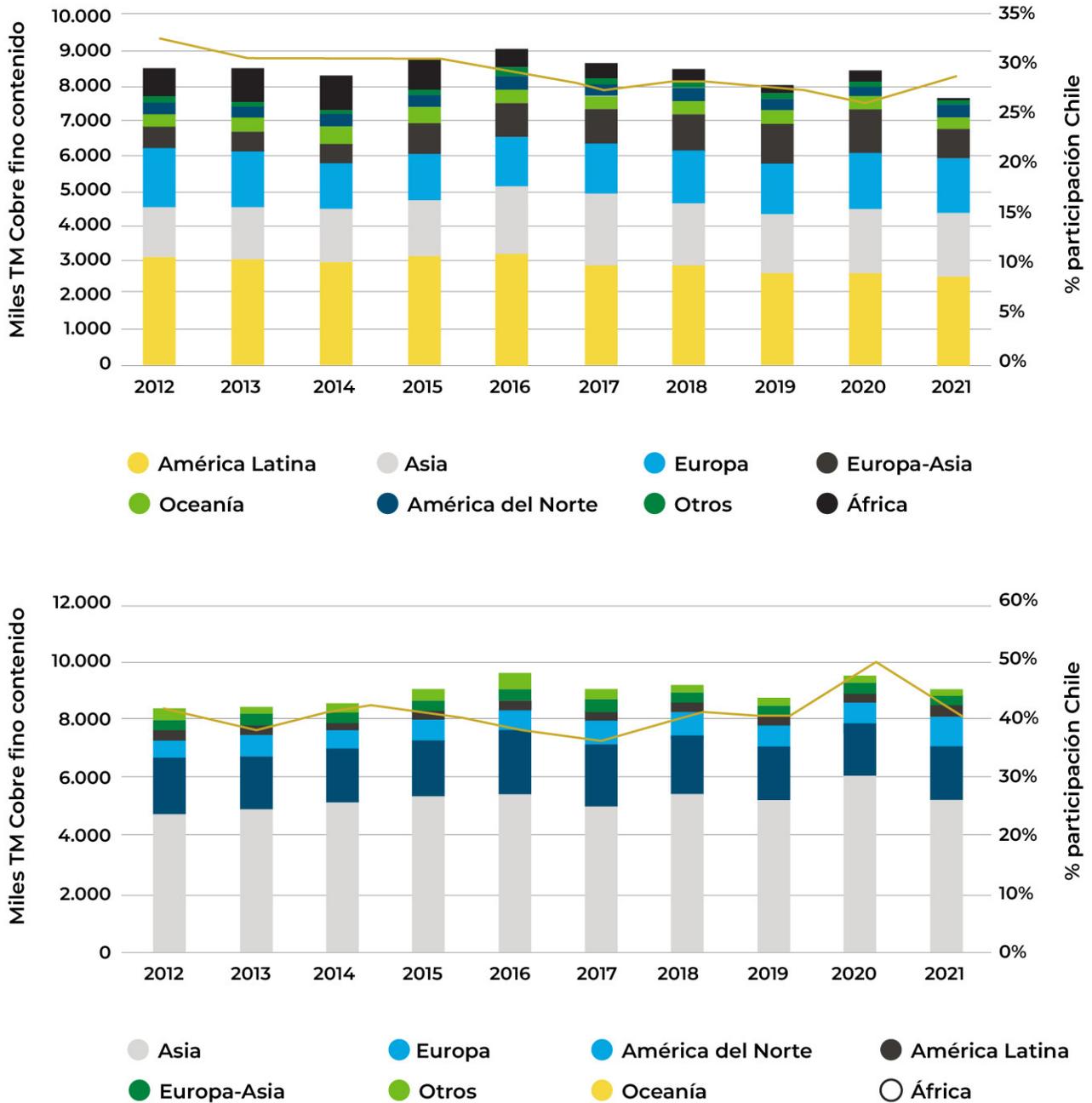




La Figura 40 muestra a los exportadores e importadores de cobre refinado por regiones. Se observa que nuevamente la principal región exportadora es América Latina, con más de un tercio del total mundial en 2021. Chile y Perú representan más de 95% del total regional, y Chile en particular representa una gran porción (2,7 millones TM sobre un total de América Latina de 3.1 millones TM de cobre fino contenido). Las otras regiones que presentan niveles de exportaciones de cobre refinado relevantes son Asia y Europa, destacando Japón, Corea del Sur y China en la primera, y Polonia, Bélgica, Holanda, Alemania y Bulgaria en la segunda.

En términos de importaciones, nuevamente Asia destaca como el gran mercado para los cátodos de cobre con casi 60% de las importaciones mundiales. China presenta una participación relevante pero variable, entre 40% a 50% del total mundial. Eso se debe a las estrategias de gestión de inventarios que maneja el gobierno y las empresas en ese país. En cuanto al resto del mundo, Europa es la región que más importa cátodos de cobre, siendo Italia y Alemania los principales destinos para este comercio internacional con más de la mitad de lo que importa el continente.

Figura 40: Exportaciones e importaciones de cobre refinado por regiones, 2012-2021.

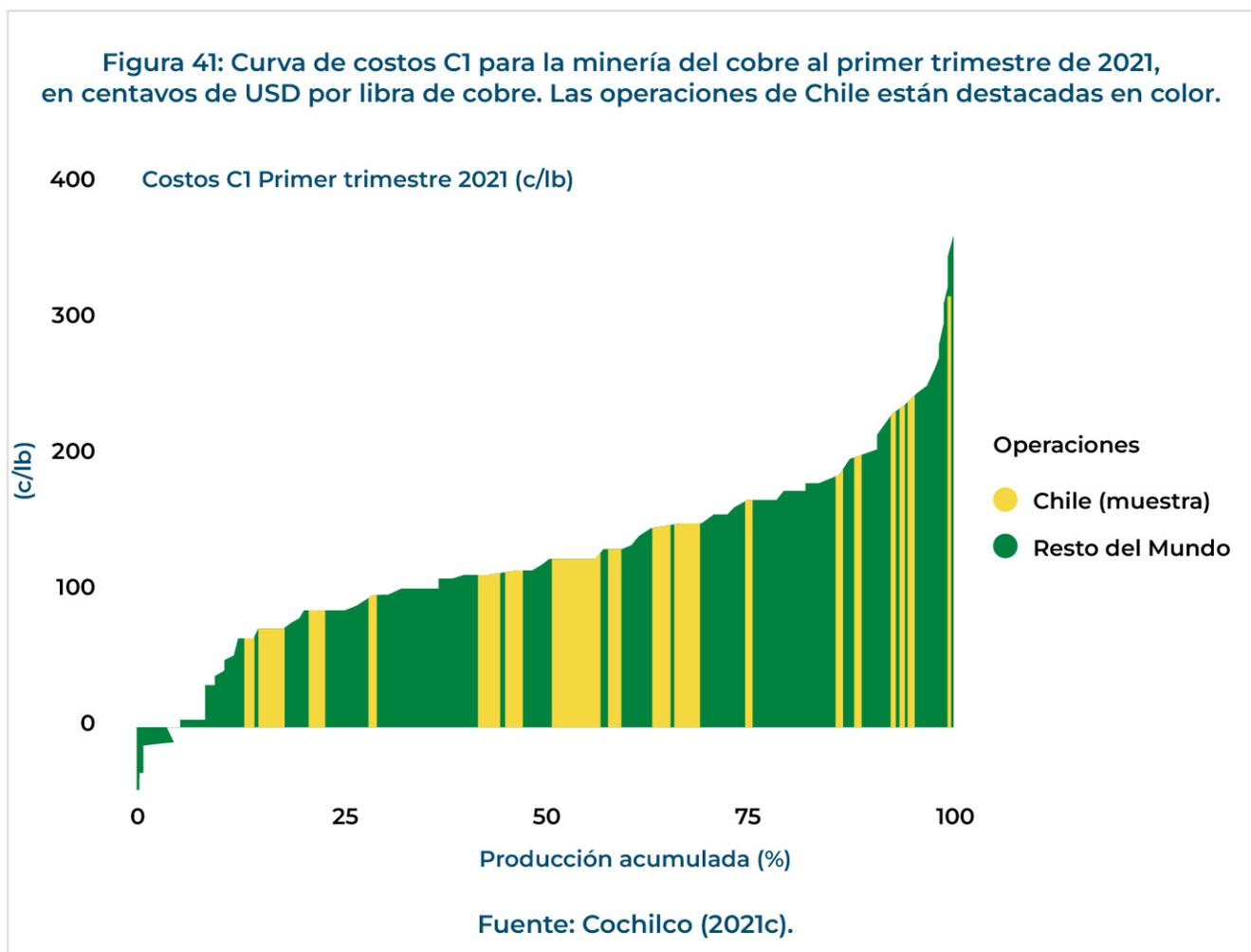


Fuente: Elaboración propia a partir de información de Cochilco (2022a).

En cuanto a los costos, en la minería del cobre la competitividad de las minas se mide en términos de lo que se conoce como C1, que es una aproximación a los costos directos de producción. Según la definición de Wood Mackenzie, los costos C1 incluyen los costos incurridos en la extracción y el procesamiento del mineral (mano de obra, energía, reactivos, materiales) más los costos generales y administrativos, el flete y la realización y venta. Los costos de realización y venta tienen relación directa con los costos de tratamiento y refinación (TC/RC combinados; TC, treatment cost; RC,

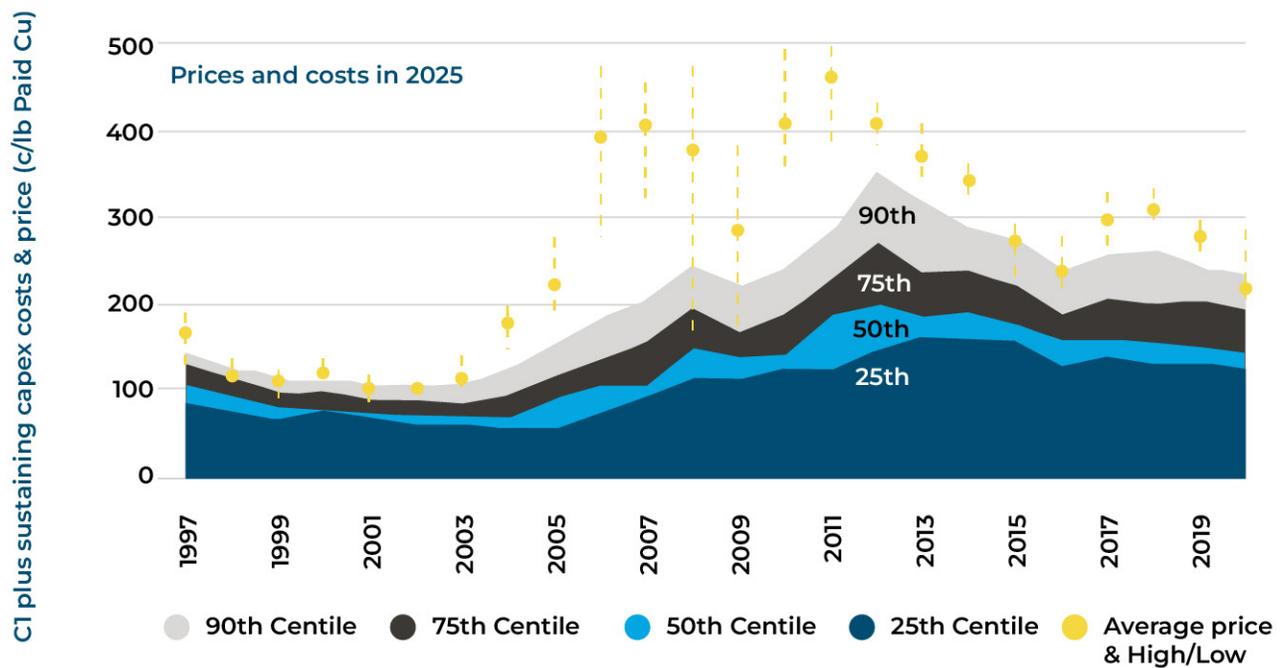
refinery cost) cobrados por las fundiciones y refinerías a las empresas mineras. Adicionalmente, cualquier ingreso por la presencia de subproducto en los concentrados se imputa contra los costos (créditos a los costos C1).

La Figura 41 muestra la curva de costo C1 para la minería del cobre a nivel mundial durante el primer semestre de 2021 en centavos de dólar por libra. Esta curva muestra todas las operaciones significativas de producción de cobre de mina ordenadas de izquierda a derecha por sus costos de producción desde las de menores hasta las de mayores costos. Adicionalmente, el ancho de cada barra representa la producción de dicha operación minera, y su altura su costo medio. Usualmente existen unas pocas operaciones que muestran costos negativos, ya que son pocas las minas en donde los créditos por subproductos son mayores que los costos directos de operación/producción. Por otro lado, la mayoría de las operaciones más pequeñas se encuentran al final de la curva, en el cuarto cuartil de costos. Esto se debe a que en la minería del cobre existen relevantes economías escala.



La Figura 42 muestra una perspectiva en el tiempo con respecto a la relación entre el precio del cobre y los costos C1 más el capital de sustentación de las operaciones mineras que lo producen. Se aprecia que existe una alta correlación en los movimientos de las distintas curvas. En general, en el corto plazo los costos tienden a seguir la curva de precios, pero en el largo plazo existen razones para pensar que la relación es a la inversa (Tilton y Guzmán, 2016). Además, en períodos de precios bajos las operaciones del decil de más altos costos no alcanzan a cubrir sus costos operacionales más el requerimiento de capital de su producción. No obstante, en los períodos de precios altos muestran un margen atractivo como negocio.

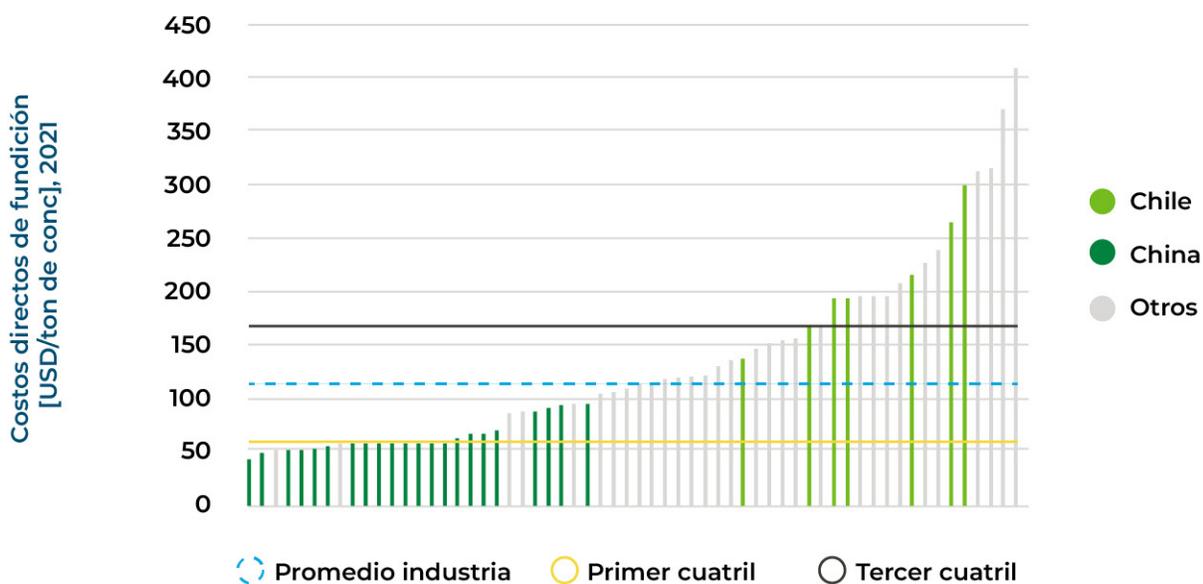
Figura 42: Curva de costos CI para la minería del cobre, con sus percentiles principales y el precio del cobre refinado, 1997-2020.



Fuente: Wood Mackenzie por Mining.com (2020).

Los costos de las fundiciones, por su parte, se miden en dólares por tonelada de concentrado fundido. La Figura 43 presenta los costos directos de fundición en todas las fundiciones de cobre del mundo, ordenados de izquierda a derecha de menor a mayor. Además, destaca los costos de China, principal productor de cobre fundido y refinado del mundo y principal consumidor de cobre refinado; y los costos de Chile, principal productor de concentrados de cobre del mundo. También se aprecia que el costo directo medio de la industria está entre 110 y 120 USD/TM de concentrado fundido. Además, se puede ver que todas las fundiciones de China se encuentran por debajo de este costo medio, y la mayoría en el primer cuartil de costos de la industria; y todas las fundiciones en Chile presentan costos por sobre la mediana, y la mayoría en el cuarto cuartil de costos. Un análisis complementario sobre los costos de las fundiciones a nivel mundial se encuentra en el capítulo 2 de este estudio, sobre tecnologías de producción de cobre refinado.

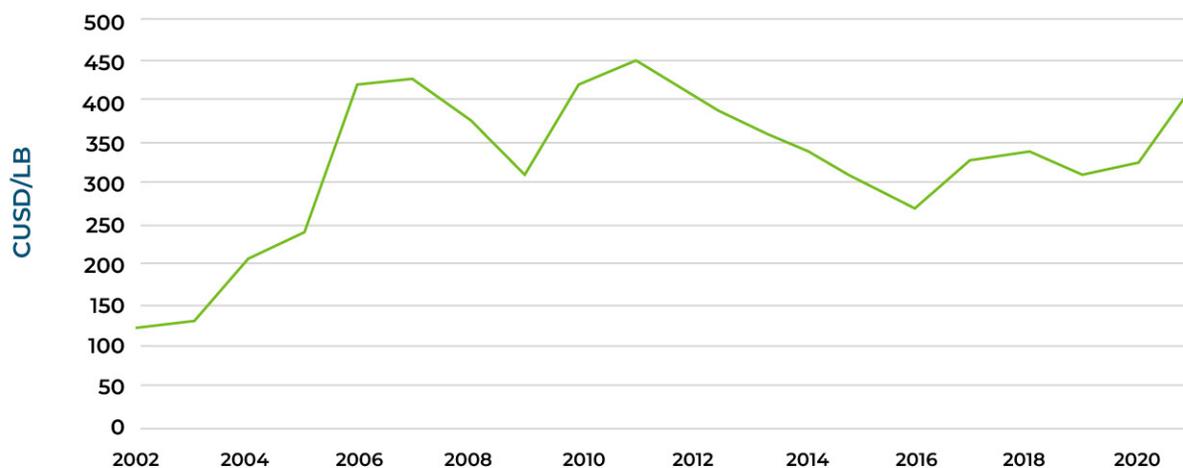
Figura 43: Curva de costos de tratamiento (TC) para las fundiciones de cobre, con sus cuartiles, 2021.

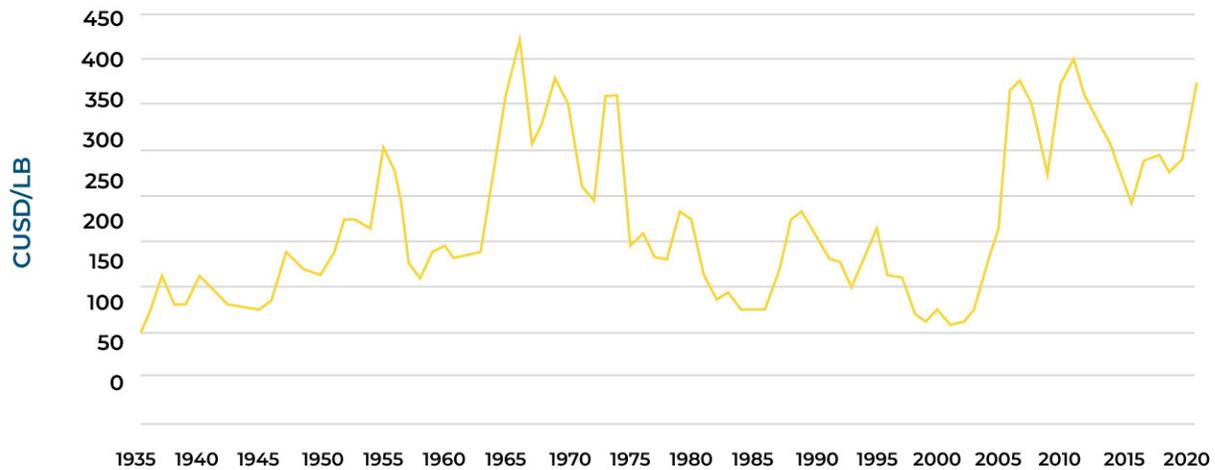


Fuente: Cochilco (2022b).

En cuanto a los precios en la industria primaria, es importante destacar cómo se organiza la industria en forma mayoritaria. El precio de referencia es el del cobre refinado, que está representado por el precio que se paga por los cátodos grado A en la Bolsa de Metales de Londres (LME por sus siglas en inglés), que tienen un contenido mínimo de 99,99% de cobre. Hay otras bolsas de productos primarios que también transan cobre refinado, pero como existe arbitraje usualmente se toma como referencia el LME. Este precio se mide en dólares por libra de cobre o en dólares por tonelada de cobre. La Figura 44 muestra el precio del cobre de la LME para los últimos 20 años, en centavos de USD por libra y en una base real de 2021; y una visión de más largo plazo (85 años).

Figura 44: Precio anual de cobre refinado LME, base real año 2021. Períodos 2002-2021 y 1935-2021.





Fuente: Elaboración propia a partir de información de Cochilco (2023).

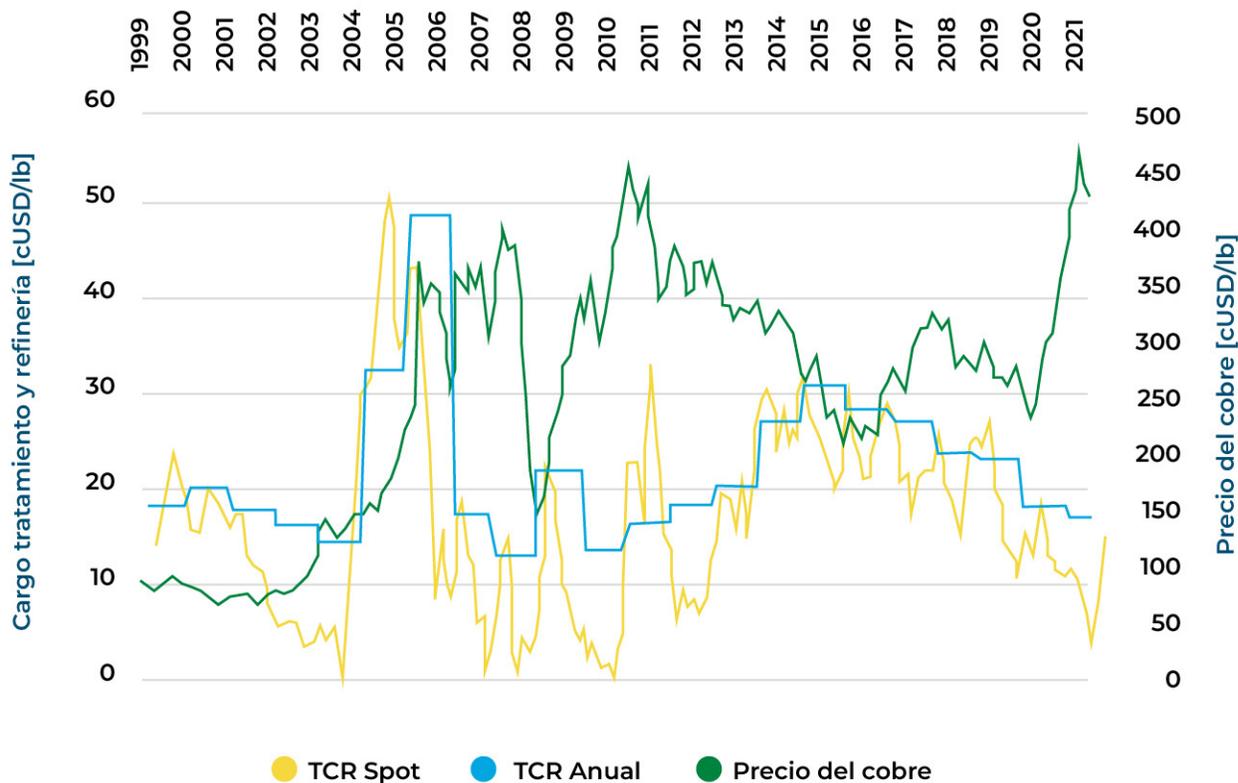
Como se puede apreciar de la Figura 44, el precio real del cobre presenta una alta variabilidad a lo largo del tiempo. En general, está fuertemente influenciado por el ciclo general de la economía mundial, pero, sobre todo está asociado con la producción industrial global. Además de esa ciclicidad, el gráfico inferior de dicha figura muestra que, históricamente, ha presentado períodos de altos y bajos precios, lo que se puede explicar en procesos más estructurales de la economía global. Por ejemplo, el ciclo de precios altos de mediados de los sesenta que duró hasta mediados de los setenta está fuertemente relacionado con la reconstrucción y reindustrialización de Europa y Japón post segunda guerra mundial; y el ciclo de precios altos que inició a mediados de los dos mil está indivisiblemente asociado al desarrollo económico de China con una fuerte base de infraestructura urbana y generación de capacidades de manufactura.

Por otro lado, con respecto a los concentrados de cobre y el cobre fundido no existen precios de referencia, y lo que se tiene es un esquema similar a una maquila para obtener el cobre refinado. De esta manera, las fundiciones pagan a las minas el precio del cobre contenido en los concentrados en base al precio del cobre refinado, pero descontándole/incluyéndoles ciertos ítems. Entre los más importantes, se encuentra la tarifa asociada al costo por fundir el concentrado (costo de tratamiento o TC por sus siglas en inglés); un descuento por la recuperación metalúrgica que se obtiene en la fundición; y un descuento por penalidades o premios (sobrepago al cobre contenido) asociados a impurezas y subproductos que presente el concentrado. El TC es el elemento central de negociación entre empresas mineras y fundiciones, y se mide en dólares por tonelada de concentrado procesado. Por otro lado, las refinerías presentan un esquema similar, en donde el ítem de negociación más relevante es el costo de refinación (RC por sus siglas en inglés). Éste último está usualmente relacionado al TC, siendo la cifra usada normalmente un décimo del TC, pero la unidad de medida en centavos de dólar por libra de cobre refinado producido. Finalmente, con algunos supuestos tales como la concentración de cobre en el concentrado o las pérdidas metalúrgicas de los procesos, se puede obtener el costo o cargo combinado entre fundición y refinación; a esto se le llama TC/RC combinado, que es un reflejo del costo de llevar la producción del concentrado hasta el producto final de la industria primaria que es el cobre refinado.

En la Figura 45 se muestra el valor de los cargos combinados TC/RC, tanto para el mercado spot como para las transacciones directas, y el precio del cobre. Como se aprecia, existe una variabilidad relevante, al igual que en el precio del cobre refinado. En general, los TC/RC se mueven en forma contraria al precio del cobre refinado, ya que cuando el precio del cobre se encuentra alto implica

que hay escasas de oferta y hay mayor aidez por concentrados, y las fundiciones compiten más intensamente por conseguir abastecimiento; mientras que cuando los precios del cobre refinado están bajos implica que existe sobreoferta en el mercado, y por tanto son las empresas mineras las que enfrentan dificultades para ubicar su producción.

Figura 45: Cargos combinados TC/RC para concentrados de cobre, mercado spot y contratos directos, 2011-2020.



Fuente: Cochilco (2022b).

En los últimos 15 años los TC/RC se han mantenido relativamente bajos para los estándares históricos, producto del importante crecimiento de la capacidad de fundición y refinería en China. En la última década se han mantenido bajo 30 cUSD/lb e incluso llegando a valores en torno a 15 cUSD/lb, siendo que los TC/RC combinados de equilibrio para la industria se estiman en alrededor de 30 a 35 cUSD/lb (esto equivale a un costo de tratamiento en fundición de entre 90 y 110 USD por tonelada de concentrado de cobre, y un costo de refinación de entre 9 a 11 centavos de dólar por libra de cobre refinado).

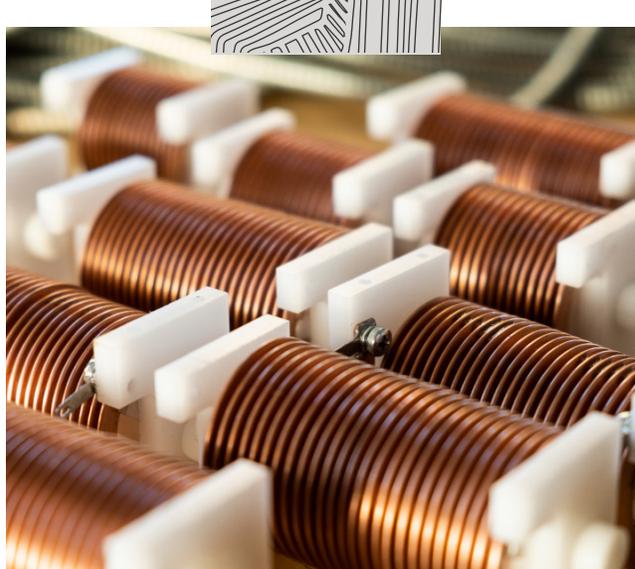
3.6 Conclusiones y recomendaciones

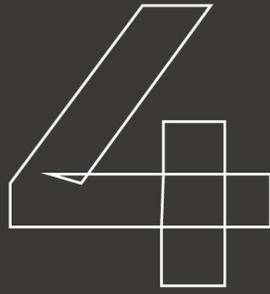
- La cadena de valor de la industria minera de cobre abarca múltiples etapas, cada una con su propio mercado y competidores. Para establecer un mercado de semi manufacturas de cobre es necesario contar con una
- robustez tanto a nivel de capacidad de producción como de tecnologías para
- cada una de las etapas previas, para abastecer la demanda necesaria para la fabricación de estos insumos.

China es un ejemplo que destaca en este ámbito. A pesar de que ocupa una posición relevante entre los principales productores de cobre de mina, su potencial radica en la fundición y refinería. Como resultado, China se ha convertido en el mayor importador de concentrado de cobre para abastecer a sus fundiciones, que poseen una alta capacidad de procesamientos y costos operativos relativamente bajos en comparación con el resto de las tecnologías actuales (60 USD/TM concentrado en la fundición; y 4 a 5 cUSD/lb de cobre producida en la refinería). Esto le permitió convertirse en el mayor productor de cobre refinado del mundo y, como consecuencia, en el mayor productor y consumidor de productos semi manufacturados de cobre. Es así como este país ha fortalecido cada uno de los distintos procesos/etapas de la cadena de valor para mantener actualmente una competitividad alta en el mercado, donde todas las etapas se encuentran interrelacionadas y dependen unas de otras.

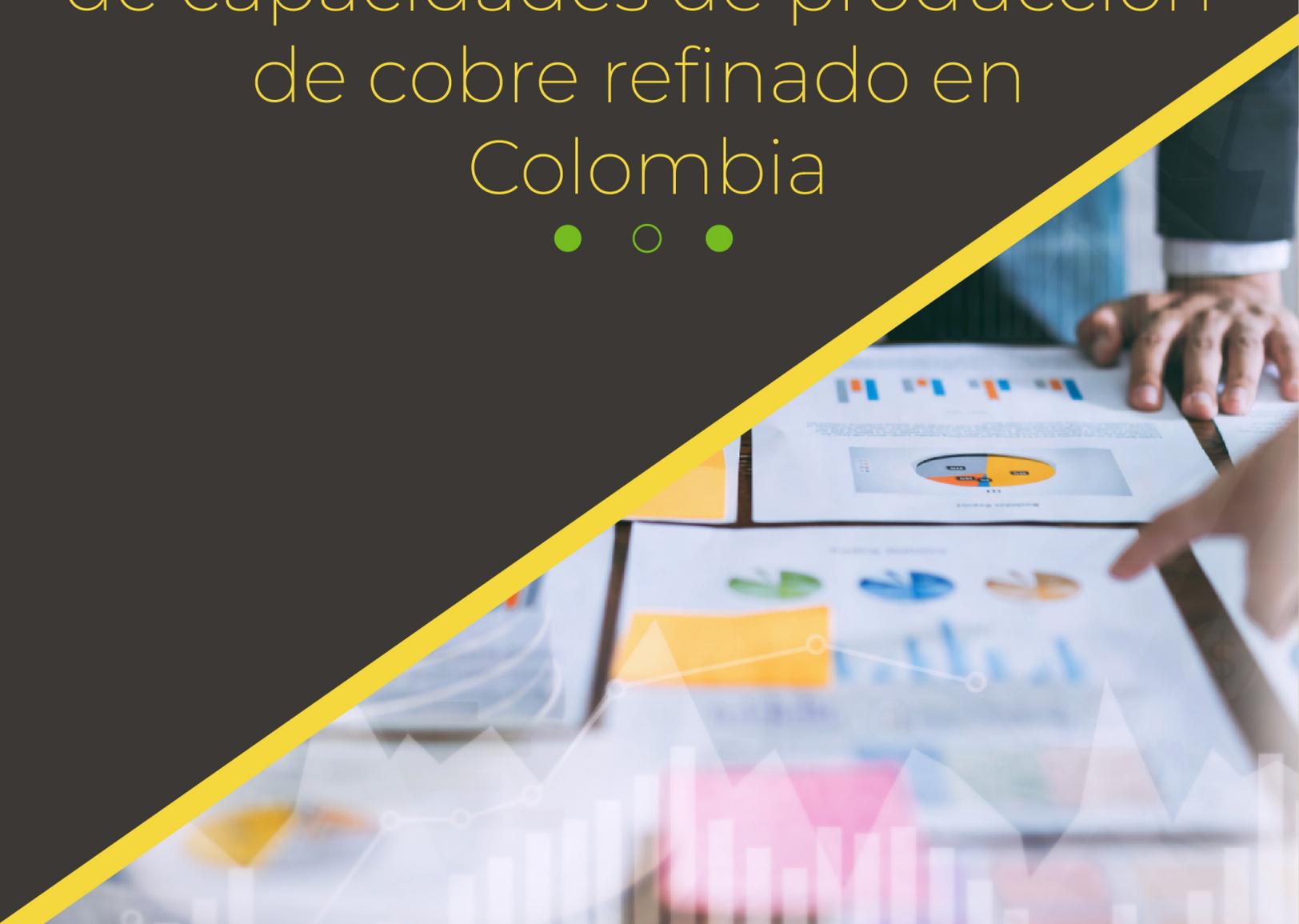
Relativo a los costos variables y márgenes, la experiencia en Chile indica que mientras mayor sea el grado de elaboración del producto mayor es el margen entre el precio y los costos medios variables de producción, pasando desde un 20% el margen para el alambrón hasta un 35% para cables de media tensión.

Finalmente, la última etapa de la cadena de valor de la industria del cobre que corresponde a la producción de manufacturas a partir de bienes intermedios de cobre, su uso es primordialmente al mercado de equipos electrónicos, de refrigeración, instalaciones de edificios, comunicaciones, energía eléctrica, entre otros; que en su conjunto suman aproximadamente un 60% del mercado de manufacturas.





Análisis estratégico sobre
opciones de desarrollo
de capacidades de producción
de cobre refinado en
Colombia



4.1 Introducción

- Para lograr el objetivo de producir cobre refinado en el país, es posible seguir distintos caminos o rutas de desarrollo de los eslabones que conforman la cadena de valor de la industria del cobre (Figura 21). Cada una de estas rutas o caminos conforman distintos escenarios de análisis, los cuales presentan fortalezas, oportunidades, debilidades y amenazas (análisis FODA) que deben ser consideradas para el desarrollo de políticas públicas y la toma de decisiones por parte del Gobierno y sus entidades relacionadas.

Como estos caminos o rutas de desarrollo son diversos, no es posible analizarlos todos en detalle. Por ello, se ha decidido evaluar dos escenarios en este ámbito: un escenario de desarrollo secuencial, y una alternativa de desarrollo simultáneo.

A partir de estos escenarios y el análisis FODA se podrá definir una estrategia, objetivos, metas, y líneas de acción para poder alcanzar el objetivo que Colombia produzca cobre refinado y éste impulse significativamente el proceso de (re)industrialización.

En la sección 4.2 presentamos dos potenciales escenario o trayectorias – escenario secuencial y escenario simultaneo – para el desarrollo de la cadena de valor de la industria del cobre en Colombia, desde la exploración hasta la producción de semi manufacturas y manufacturas, incluyendo un incremento en la producción y procesamiento de cobre a través del desarrollo de capacidades de fundición y refinería u otra tecnología.

En la sección 4.3 describimos el escenario secuencial, considerado más beneficioso para impulsar inversiones de calidad y para promover un crecimiento sostenible, acompañado por una transformación productiva y tecnológica y creación de empleo de calidad para una mayor prosperidad a nivel nacional y local. Finalmente, en la última sección se presentan las principales conclusiones de este capítulo.





4.2 Escenarios de análisis para el desarrollo de la cadena de valor de la industria del cobre en Colombia

- En las siguientes subsecciones se describen los dos escenarios analizados durante el estudio, y se presenta el análisis FODA de ambos con base en la información levantada en tres talleres en los cuales participaron distintos actores públicos y privados del sector minero.
-
-



4.2.1 Descripción de los escenarios secuencial y simultáneo

4.2.1.1 | Escenario Secuencial

El primer escenario analizado corresponde al desarrollo secuencial de los eslabones productivos de la cadena de valor de la industria del cobre. Los principales hitos de este escenario se describen a continuación:

1

Desarrollo acelerado de la **industria primaria del cobre**, conformada por la exploración, minería y procesamiento de minerales de cobre hasta obtener un producto comercializable: concentrados de cobre. El desarrollo de esta industria primaria debe ser sostenible y responsable, cumpliendo con los más altos estándares en términos de seguridad y salud ocupacional, respeto y cuidado del medioambiente, y contribuyendo en forma positiva al desarrollo de las comunidades locales, regionales y del país en su conjunto. El objetivo último de este eslabón es generar una oferta significativa de cobre de mina que permita desarrollar y abastecer un porcentaje significativo de la capacidad de producción local del siguiente eslabón de la cadena productiva que es la producción de cobre refinado. En paralelo, se van construyendo las capacidades necesarias para el desarrollo de los siguientes eslabones de la cadena de valor, realizando prospectiva tecnológica y estudios para evaluar las mejores alternativas para el momento en que se alcance la escala productiva necesaria para abastecer la producción local de cobre refinado.

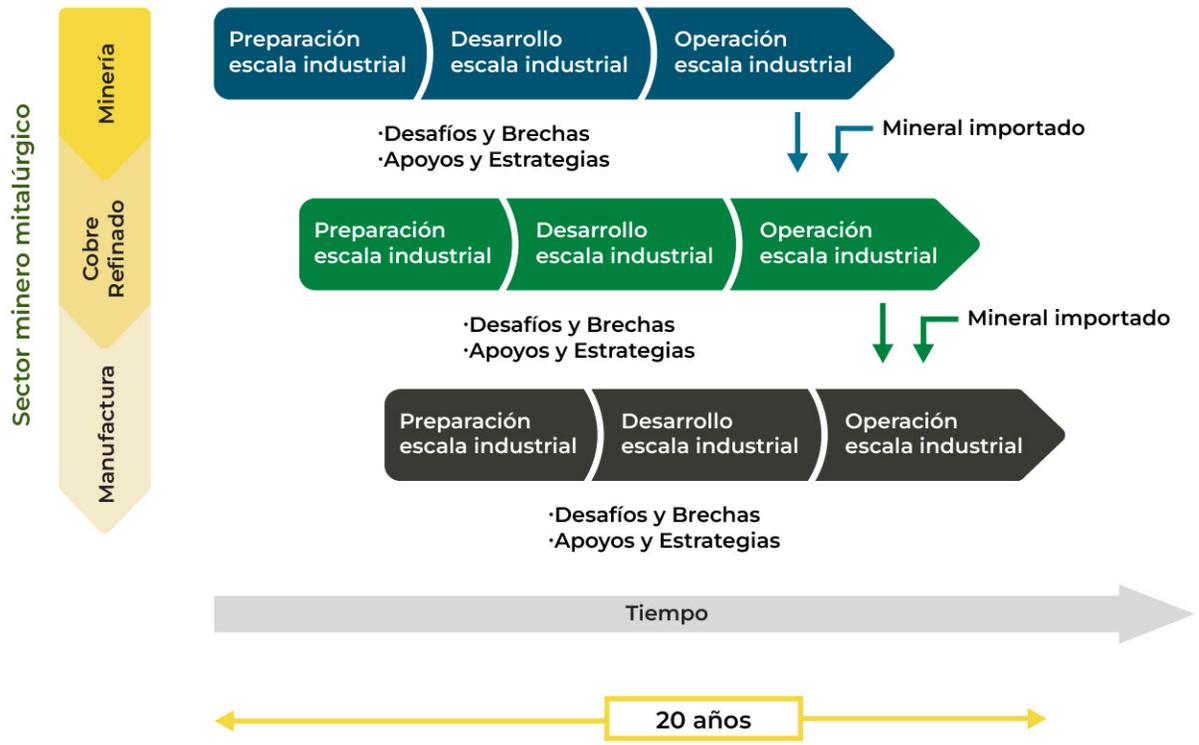
2

Una vez alcanzada una determina escala de producción de cobre de mina como concentrado u otros productos, que permita asegurar el desarrollo y abastecimiento del segundo eslabón de la **industria metalúrgica del cobre**, se desarrollan las instalaciones piro/ electrometalúrgicas y/o hidrometalúrgicas para producir cobre refinado. Esto según la mejor combinación que surja de los avances tecnológicos metalúrgicos y el desarrollo de la industria primaria de cobre a nivel local. En esta etapa también es fundamental que las capacidades que se generen cuenten con altos estándares de sustentabilidad, adoptando las mejores prácticas en términos de eliminación, reducción y/o reutilización de los residuos generados por la metalurgia del cobre.

3

Finalmente, en la medida que se consolide la capacidad de producción de cobre refinado, comienza el desarrollo de la **industria de semi manufacturas de cobre** y/o manufacturas de bienes intermedios y finales con contenidos de cobre. En esta etapa es importante identificar industrias y nichos específicos en donde el país cuenta con ventajas y oportunidades para integrarse a cadenas de valor globales que apoyen a la (re)industrialización del país, y asegurar el abastecimiento para la industria de manufacturas para el mercado local.

Figura 46: Escenario de desarrollo secuencial de los eslabones de la industria del cobre en Colombia.



Fuente: Elaboración propia.

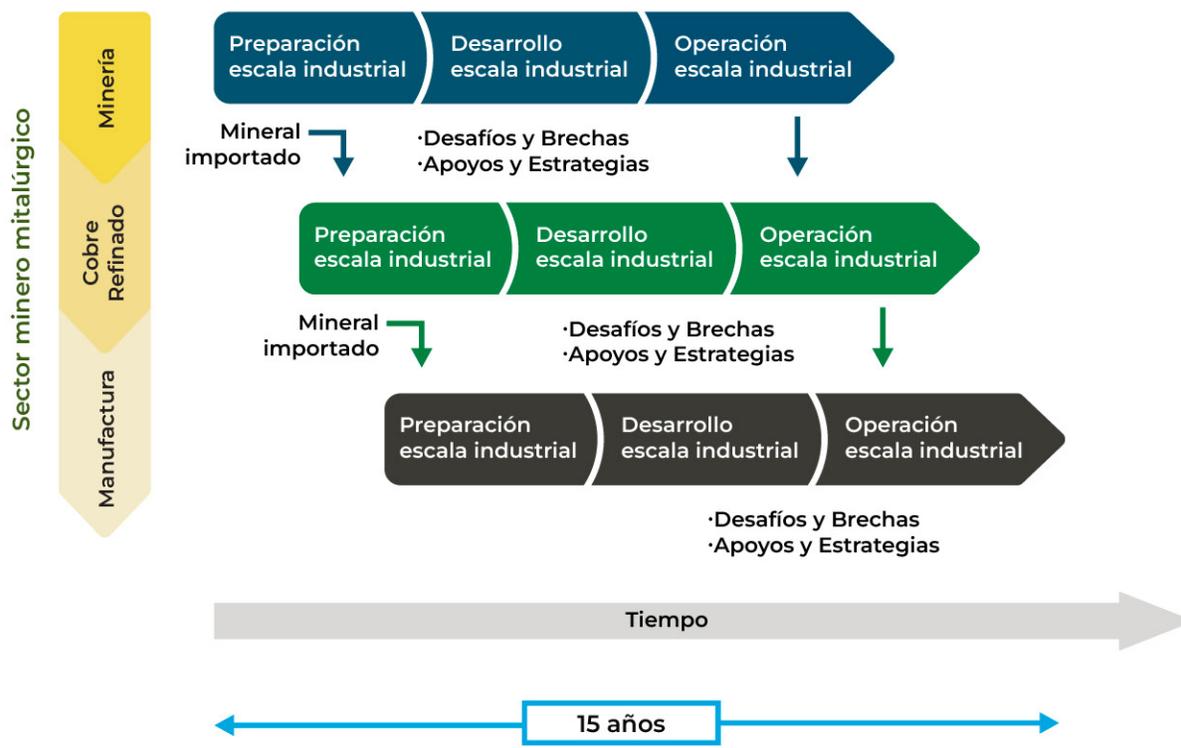
En este escenario, mientras se desarrolla cada eslabón también se van realizando acciones para preparar el desarrollo y materialización de los eslabones siguientes de la cadena de valor. Esto requiere una visión de largo plazo y la toma de decisiones estratégicas por parte de los distintos agentes de la industria, con el fin de enfrentar los desafíos que conlleva avanzar en la cadena de valor de la industria y aprovechar las ventajas y oportunidades que se irán presentando en el tiempo conforme avanzan los desarrollos tecnológicos y los requerimientos de la sociedad.

4.2.1.2 | Escenario Simultáneo

El segundo escenario analizado corresponde al desarrollo simultáneo de los eslabones productivos de la cadena de valor de la industria del cobre, con un foco especial de atención en la industria metalúrgica del cobre y la producción de cobre refinado. En este escenario el foco está puesto en lograr la producción de cobre refinado en el menor tiempo posible, desarrollando los otros eslabones (industria primaria y semi manufacturas) en paralelo o en forma posterior a la capacidad de producción de cobre refinado. Los hitos principales de este escenario son los siguientes:

- 1** Desarrollo de la **industria metalúrgica del cobre**, conformada por una fundición y refinería (FURE) para el procesamiento de concentrados de cobre, dado que las otras alternativas tecnológicas no se encuentran en un nivel de madurez suficiente para su aplicación industrial. Para ello, se plantea iniciar a la brevedad los estudios de perfil, prefactibilidad y factibilidad para la construcción de una FURE con la escala de procesamiento mínima viable técnica, económica, ambiental y social de la operación (en torno a 700 mil TM de concentrados de cobre o 200 mil TM de cobre contenido en los concentrados). Esto permitirá abastecer, en un horizonte de entre cinco y siete años, a la industria de semi manufacturas de cobre del país y producir otros bienes intermedios y finales con contenidos de cobre en Colombia. Para ello, inicialmente se requerirá obtener suministro de concentrados desde el exterior (idealmente de fuentes regionales) a través de contratos de mediano-largo plazo que permitan la sustentación de la operación, ya que la capacidad de producción local de cobre de mina (concentrados) no permitirá alcanzar la escala económica productiva necesaria para un complejo metalúrgico de estas características en un horizonte de tiempo acotado. El desarrollo de esta industria debe ser sostenible y responsable, cumpliendo con los más altos estándares en términos de seguridad y salud ocupacional, respeto y cuidado del medioambiente, y contribuyendo en forma positiva al desarrollo de las comunidades locales, regionales y del país en su conjunto. El objetivo último del desarrollo acelerado de este eslabón productivo es aumentar el valor agregado de la producción primaria de cobre del país, y abastecer e impulsar la (re)industrialización de Colombia a través de la inserción en las cadenas globales de la industria del cobre.
- 2** En paralelo se irá desarrollando gradualmente la industria primaria de cobre, aumentando paulatinamente la producción local de cobre de mina que pueda ir reemplazando el abastecimiento exterior de concentrados para el complejo metalúrgico. En esta etapa también es fundamental que las capacidades que se generen cuenten con altos estándares de sustentabilidad, adoptando las mejores prácticas en términos de cuidados del medioambiente y generación de valor social.
- 3** Adicionalmente, se buscará impulsar el desarrollo de la industria de **semi manufacturas de cobre** y/o manufacturas de bienes intermedios y finales con contenidos de cobre, en paralelo a la industria metalúrgica del cobre y como parte de los esfuerzos de la política de (re)industrialización del Gobierno de Colombia. Al igual que en el escenario secuencial, en esta etapa será importante identificar industrias y nichos específicos en donde el país cuenta con ventajas y oportunidades para integrarse a cadenas de valor globales. Además, la identificación y desarrollo de estas industrias generará un impulso a la producción local de cobre refinado y a la industria primaria de cobre en el país debido a sus necesidades de abastecimiento de materia prima.

Figura 47: Escenario de desarrollo simultáneo de los eslabones de la industria del cobre en Colombia.



Fuente: Elaboración propia.



4.2.2 Análisis FODA de los escenarios de desarrollo de la cadena de valor de la industria del cobre en Colombia

En la sección anterior se presentaron los dos escenarios de análisis elegidos para abordar el desarrollo de la cadena de valor de la industria del cobre en la economía colombiana. En esta sección se presenta un análisis FODA de los dos escenarios propuestos, con el fin de visualizar el espectro más amplio de elementos y acciones que pueden emprenderse para cumplir con el objetivo último planteado.

Adicionalmente, el análisis se complementó con la perspectiva PESTAL, que permite identificar y agrupar las variables de contexto en distintas categorías: Políticas, Económicas, Sociales, Tecnológicas, Ambientales y Legales. Esto facilita la identificación y agrupación de los riesgos y las oportunidades en un contexto estratégico, ayudando a estructurar los objetivos y las líneas de acción para cumplir con un objetivo final. Así, en el análisis FODA cada una de las temáticas identificadas se agruparon en cuatro categorías:



Este análisis se realizó en forma colaborativa, con diversos actores y representantes del sector minero público y privado de Colombia, en tres talleres desarrollados presencialmente entre los días 30 de mayo y 2 de junio de 2023. En ellos participaron más de 30 personas, con formaciones y experiencias diversas dentro del sector minero del país.

Los talleres se estructuraron en las siguientes etapas: primero se presentaron los objetivos del proyecto y antecedentes generales sobre los escenarios a trabajar y acerca de la industria del cobre a nivel mundial. Luego se desarrolló el análisis FODA + PESTAL por grupos de trabajo. Finalmente, se fomentó una discusión sobre el trabajo realizado para evaluar y priorizar las respuestas de los participantes en forma grupal.

A continuación, se presenta la consolidación de los resultados de los tres talleres realizados, y un resumen de los hallazgos del ejercicio para cada escenario.

4.2.2.1 | Análisis FODA+PESTAL escenario secuencial

En las Figura 48 y Figura 49 se presenta la compilación de los resultados del análisis para el escenario secuencial. En rosado se identifican los elementos asociados a aspectos tecnológicos-económicos; en azul las temáticas políticas-sociales-legales; en verde lo referente a variables políticas-ambientales-sociales; y en amarillo a otras temáticas no clasificadas por los participantes. Finalmente, en tonos más oscuros los elementos más destacados de cada categoría.

Cabe destacar que, si bien existe una coherencia general en la clasificación PESTAL de los elementos en las categorías señaladas, existe un número de ellos que no fueron clasificados adecuadamente. Lo mismo ocurre en cuanto a la identificación de las temáticas en el ámbito interno (fortalezas y debilidades) y externo (oportunidades y amenazas). Esto refleja, en parte, la complejidad de los desafíos que enfrenta la iniciativa de desarrollar la cadena de valor de la industria del cobre en el país; y, por otro lado, la diversidad de perspectivas de los participantes involucrados en el ejercicio. No obstante, del ejercicio y las discusiones en los talleres se pueden sacar algunas conclusiones.

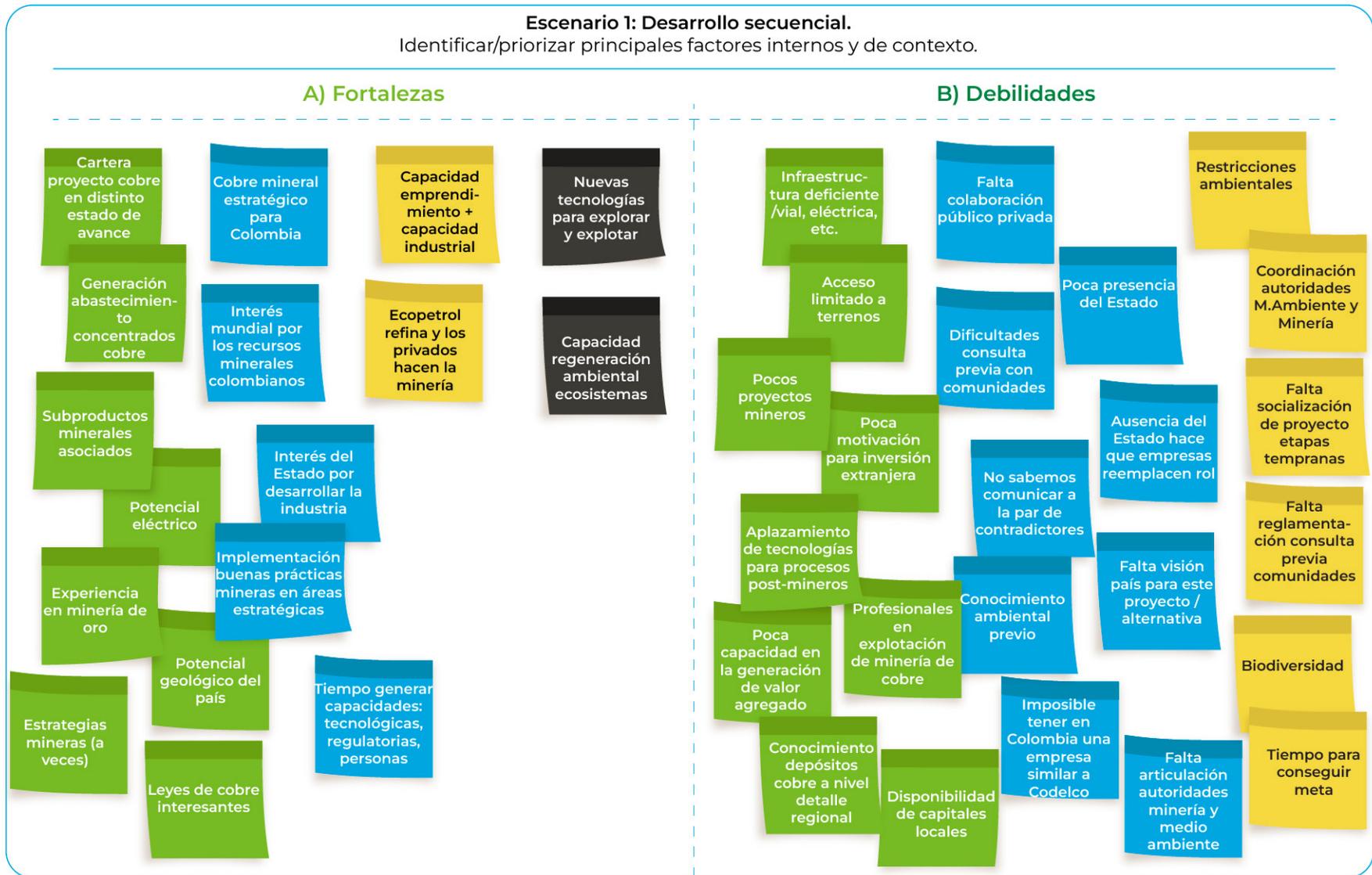
En primer lugar, para el escenario secuencial existe un consenso que la mayor fortaleza de Colombia es su potencial geológico, el que permitiría desarrollar una industria primaria de cobre de una escala relevante en el mediano plazo (Figura 48). También se destaca que el interés por desarrollar la industria para abastecer la cadena de valor aguas abajo sería una ventaja, ya que ello podría ayudar a solucionar las principales trabas al desarrollo minero que existen actualmente en el país. Además, el hecho de desarrollar la industria en forma secuencial entrega tiempo para generar capacidades en distintos ámbitos, adecuar regulaciones, mejorar estándares e implementar mejores prácticas de forma paulatina y en concordancia con los requerimientos que la sociedad actualmente impone a la actividad minera. Adicionalmente, se ve como una fortaleza la capacidad de regeneración de algunos ecosistemas del país; no obstante, la falta de información actualizada y herramientas que permitan conciliar la minería con la protección y regeneración de la biodiversidad del territorio colombiano también es destacada como una debilidad, por cuanto restringe las posibilidades de realizar actividades mineras en parte importante de su geografía. Por último, se considera que este escenario permitiría aprovechar la ventana de oportunidad de la transición energética y la electrificación del transporte para involucrarse en las cadenas de valor globales asociadas a estos procesos; no obstante, sería necesario acelerar el desarrollo del sector primario, ya que los plazos de desarrollo de los proyectos mineros son extensos.



En términos de debilidades (Figura 48), en los resultados de este escenario se reflejan tanto las principales restricciones que enfrenta el desarrollo minero en la actualidad en Colombia, como la falta de experiencia y capacidades del país en términos de minería y metalurgia del cobre. Ejemplo de lo primero son: los escasos proyectos mineros en desarrollo; las restricciones ambientales y la baja coordinación de los organismos y autoridades sectoriales (medioambiente y minería, principalmente); y la falta de o la necesidad de actualización de la regulación en diversos aspectos (especialmente en temas de consulta previa a comunidades étnicas, y en menor medida en temáticas técnicas más específicas). En el segundo caso, por nombrar sólo un par de temas, se tiene: el bajo conocimiento de la geología y de los depósitos de cobre a nivel regional y de detalle (local); y la falta de profesionales con experiencia en minería del cobre, en actividades de exploración, explotación y procesamiento de los minerales. Otras debilidades relevantes identificadas tienen que ver con la falta de una visión común para el desarrollo de la industria, lo que se refleja en la escasa coordinación, tanto entre actores del aparato estatal como entre el mundo público y privado, y con la sociedad.

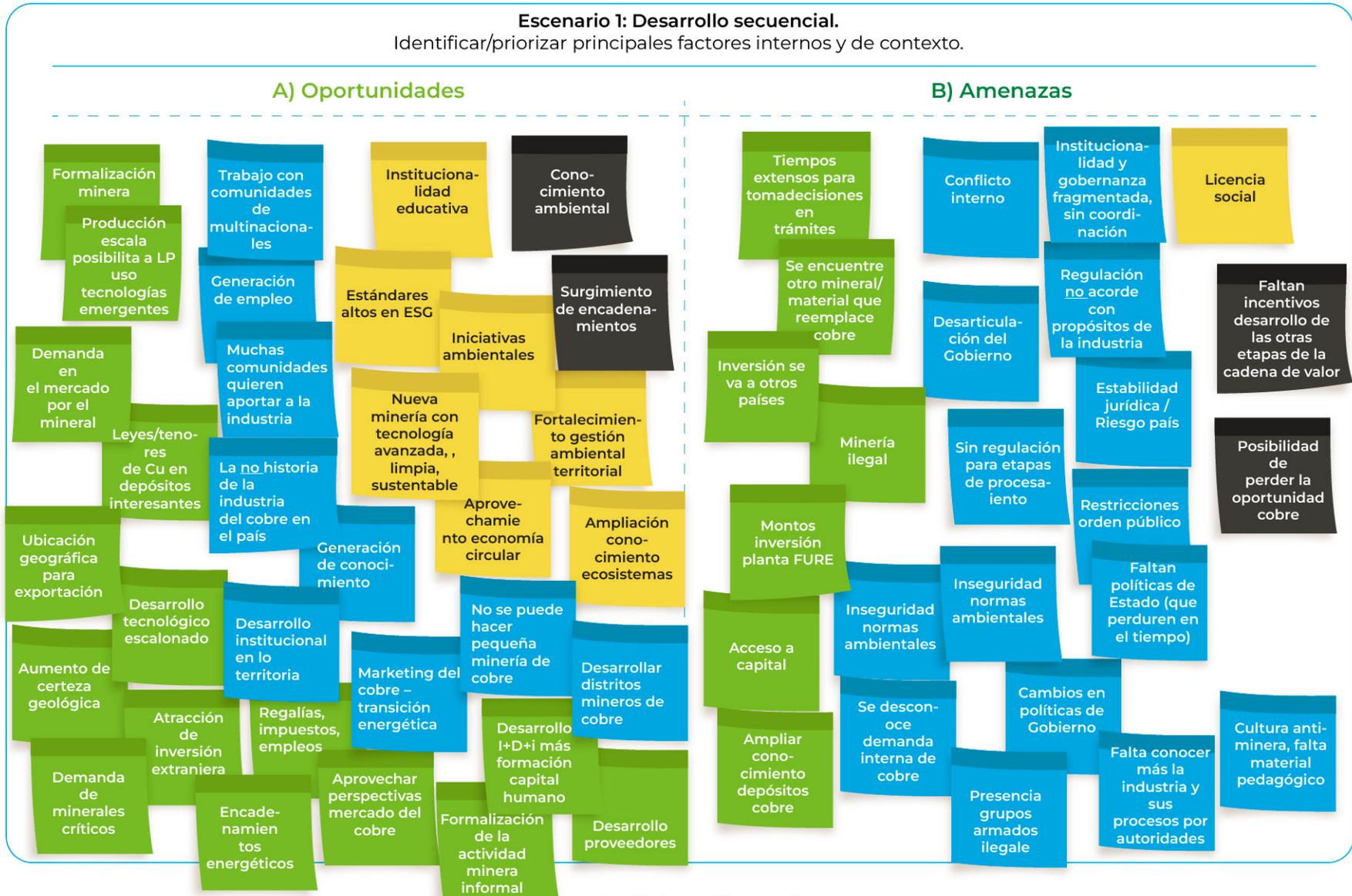


Figura 48: Identificación de fortalezas y debilidades del escenario de desarrollo secuencial de la cadena de valor de la industria minera en Colombia.



Fuente: Elaboración propia.

Figura 49: Identificación de oportunidades y amenazas del escenario de desarrollo secuencial de la cadena de valor de la industria minera en Colombia.

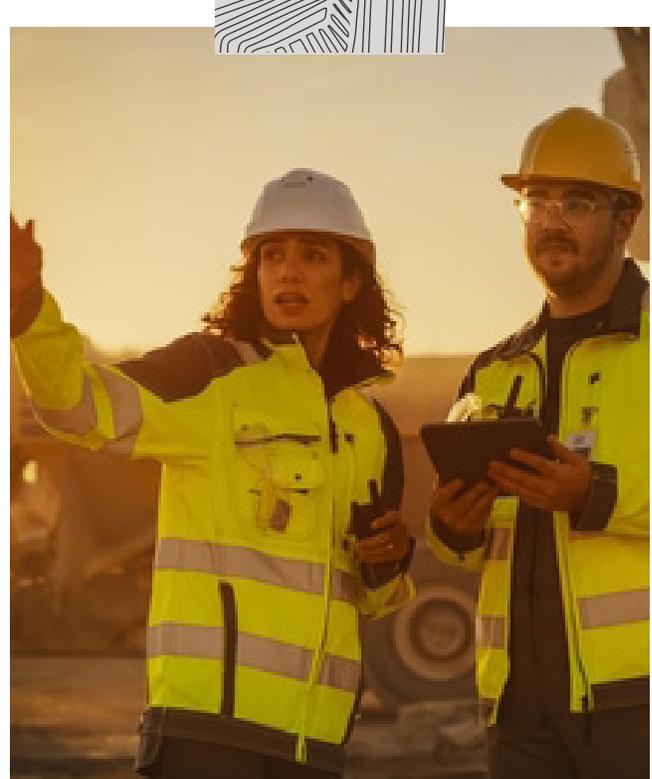


Fuente: Elaboración propia.

En cuanto a la perspectiva externa, las oportunidades (Figura 49A) son bastante claras y están asociadas primariamente a: la transición hacia una economía más sustentable, que implicará un aumento en la demanda por metales y minerales críticos, y en particular por cobre; la posibilidad de aprovechar y desarrollar nuevos conocimientos y tecnologías para una producción minera más limpia y diversificada, y con mayor valoración por parte de la sociedad por su rol en el combate del cambio climático; y la generación de empleos y encadenamientos productivos con impacto local, regional y nacional. También se destacan la inexistencia de una historia de la minería del cobre en Colombia, que permitiría construir un relato basado en sus aspectos positivos y desligarse de las experiencias negativas de otras industrias que pueden haber generado impactos socioeconómicos y/o socioambientales en el pasado. Esto se enlaza con otra oportunidad destacada: partir una industria que desde el inicio involucre los más altos estándares ESG, con alta circularidad en sus procesos productivos, que utilice las mejores y más nuevas tecnologías para mejorar su desempeño ambiental y social, y que ayude a mejorar el conocimiento ambiental y de los ecosistemas del país, fortaleciendo su gestión territorial.

Por otro lado, las amenazas (Figura 49) están bastante entrelazadas con las debilidades, y tienen que ver con las siguientes temáticas: la estabilidad política, económica y social del país, ya que los primeros eslabones de la cadena de valor de la industria del cobre (exploración, minería y metalurgia) son de alto riesgo y elevados montos de inversión; la disponibilidad de financiamiento para desarrollar los distintos eslabones de las cadena de valor; la madurez institucionalidad y regulatoria, general y específica para el sector minero, ya que no hay una amplia experiencia en este tipo de minería ni metalurgia en el país; la presencia de minería ilícita y su relación con actividades violentas; y por último, un tema altamente relevante es la posibilidad de perder la oportunidad que genera la industria del cobre, debido a la incapacidad de aprovechar el potencial geológico del país por los tiempos que conlleva desarrollar los primeros eslabones de la cadena productiva, o que la industria deje de ser atractiva producto del reemplazo del cobre en sus aplicaciones para una economía más sustentable.

En definitiva, el escenario secuencial es un escenario fuertemente basado en las oportunidades naturales que presenta Colombia para desarrollar minería de cobre (ventajas comparativas), pero que también refleja las debilidades de la institucionalidad y de valoración social que presenta el sector minero en la actualidad. Especialmente destacados en forma positiva son el potencial geológico del país, su ubicación geográfica y geopolítica, y una base de capacidades humanas e institucionales que le permitirían desarrollar ese potencial generando diversos beneficios. Por el lado de las debilidades y amenazas, los temas relacionados a las restricciones ambientales a los proyectos mineros, y la falta de o la necesidad de mejorar la reglamentación de la consulta previa a comunidades se ven como temas altamente críticos. Sin embargo, también es identificada como una necesidad el comunicar e informar a la sociedad y a los tomadores de decisiones del país sobre los beneficios y los desafíos de la minería, con el objetivo de construir una visión país acerca de esta industria.



4.2.2.2 | Análisis FODA+PESTAL escenario simultáneo

En las figuras Figura 50 y Figura 51 se presenta la compilación de los resultados del análisis para el escenario simultáneo. La identificación de colores para los elementos y los problemas de clasificación son los mismos que los previamente identificados para el escenario secuencial.

En primer lugar, para el escenario simultáneo existe un relativo consenso que la mayor fortaleza de Colombia es su potencial geológico (Figura 50A), el que permitiría sustentar la etapa de metalurgia del cobre para abastecer de minerales y concentrados propios al complejo metalúrgico (FURE) en el futuro (mediano y largo plazo). Además, se ve como positivo que exista una política de (re) industrialización a nivel nacional, que incentive la producción primaria de cobre (minería) y su procesamiento (metalurgia), debido a la necesidad de abastecer el complejo metalúrgico (FURE) que se construiría. El reconocimiento de la necesidad de generar alianzas público-privadas para todo el desarrollo de la cadena de valor del cobre también se reconoce como algo a destacar, ya que se aprecia que es difícil que el Estado por sí sólo desarrolle los procesos de producción primaria y refinado, asegurando el abastecimiento para la producción de semi manufacturas y manufacturas de cobre. Finalmente, una de las fortalezas de la iniciativa enfocada en producir cobre refinado tiene relación con el reconocimiento que hace el Estado y la sociedad colombiana al rol que juega la industria del cobre, en su conjunto, para enfrentar los desafíos del cambio climático. Esto cambia la perspectiva de esta industria, enfocándose en su contribución positiva y en cómo reducir o eliminar sus impactos negativos, lo que podría ayudar a mejorar las probabilidades de desarrollar una industria primaria responsable y sostenible en Colombia.



Por otro lado, la principal debilidad del escenario simultáneo (Figura 50) dice relación con el abastecimiento de concentrados para sustentar una operación rentable de un complejo metalúrgico FURE en el corto a mediano plazo. Con la situación actual de la exploración y desarrollo minero de la industria primaria del cobre en Colombia, no se vislumbra un aumento significativo de la producción de cobre de mina en la próxima década. Actualmente el país produce alrededor de 8 mil TM de cobre fino contenido en concentrados, versus las cerca de 200 mil TM que se requieren para abastecer a una fundición moderna y competitiva. En segundo lugar, se ve que existe una falta de recursos a nivel local para construir y sustentar una operación FURE como la señalada previamente. La falta de experiencia y capacidades, desde el punto de vista de capital humano y marco regulatorio especializados en la minería y metalurgia del cobre, también serían falencias de este escenario. En contraposición, en el caso del escenario secuencial las capacidades podrían ir construyéndose con el tiempo a medida que se avanza en la cadena de valor de la industria del cobre. En cambio, en el escenario simultáneo estas capacidades deberían desarrollarse en forma acelerada o importarse, disminuyendo la contribución que esta industria aportaría al desarrollo sustentable del país.

Otro aspecto mencionado tiene relación con la escasa o nula experiencia del país en la producción de semi manufacturas y manufacturas de cobre. Esto podría implicar que bajo este escenario Colombia deba importar concentrados de cobre a precios altos, produzca cobre refinado para exportarlo con poco valor agregado, y luego deba importar las semi manufacturas de cobre desde el exterior producto de la inexistencia de una industria local que consuma la producción colombiana de cobre refinado. Finalmente, otras debilidades destacadas para este escenario son compartidas por el escenario secuencial. Dentro de las más importantes a destacar se pueden señalar: bajos niveles de inversión en exploración; escaso conocimiento de la geología de detalle de las zonas de mayor interés desde el punto de vista geológico-minero; diversidad y falta de coordinación de autoridades y regulaciones; y restricciones ambientales y sociales al desarrollo de proyectos de la industria primaria del cobre (minería y metalurgia), esto último especialmente relacionadas a la actualización de la Ley Segunda⁴ de 1959 para las sustracciones de las áreas protegidas y a la reglamentación de la Consulta Previa a Comunidades Étnicas.

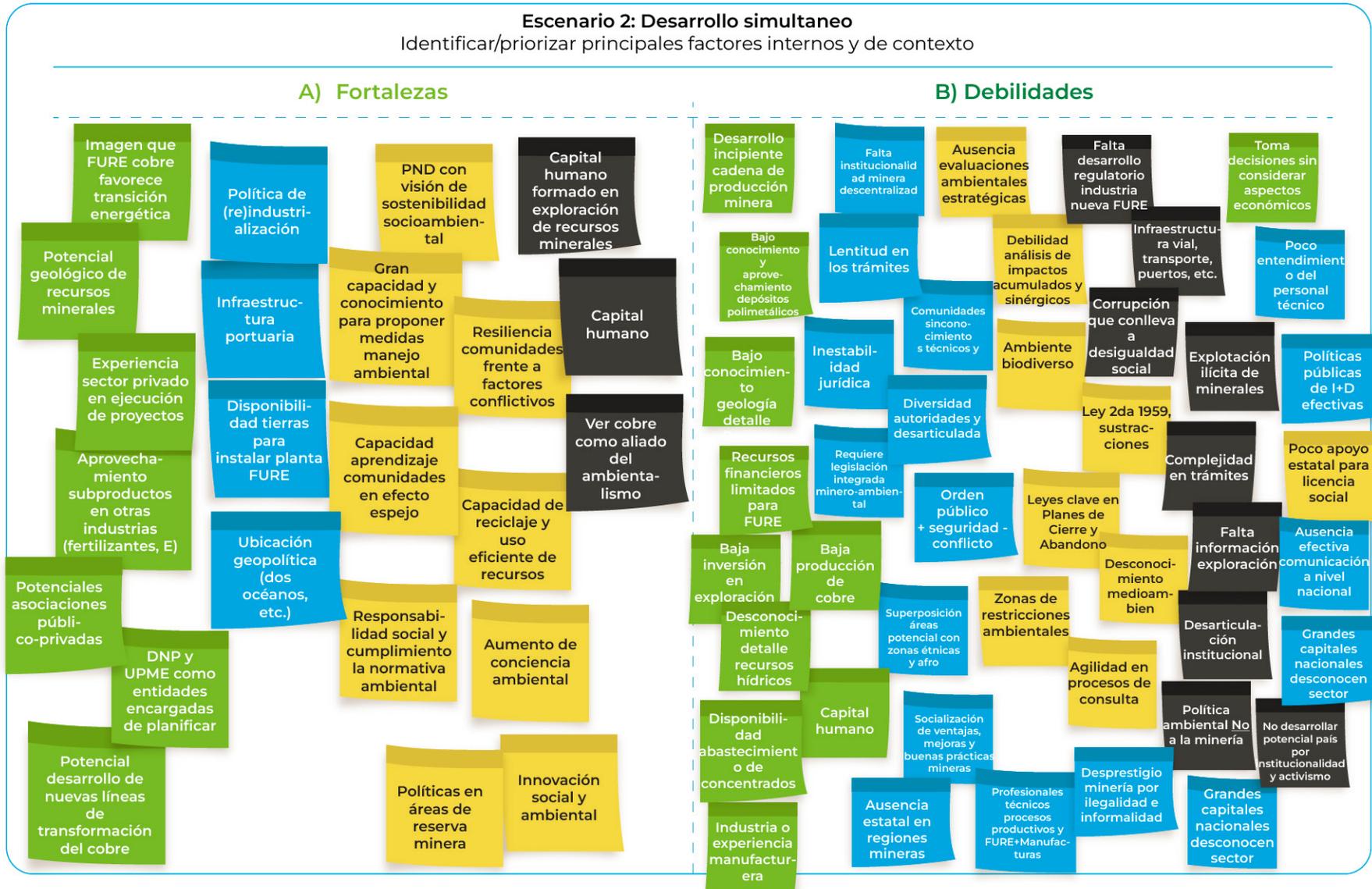
En cuanto a la perspectiva externa, las oportunidades (Figura 51) que se vislumbran son bastante similares a las del escenario secuencial: el potencial geológico del país; el desarrollo de industrias en crecimiento que demandan cantidades importantes de cobre; crecientes oportunidades por la transición desde una economía globalizada hacia economías más sustentables y basadas fuertemente en mercados regionales y locales; y la posibilidad de generar proveedores locales, y en general, encadenamientos productivos aguas arriba y aguas abajo a nivel local, regional y nacional. Por otro lado, en la discusión durante los talleres se remarcaron un par de oportunidades que en el escenario secuencial son menos evidentes o no están presentes. La creación de capacidad de procesamiento generaría una suerte de impulso a la producción primaria de cobre (cobre de mina) con el fin de abastecer al complejo metalúrgico (FURE). Esto permitiría aprovechar más rápidamente la ventana de oportunidad de la transición energética y la electrificación del transporte (actualidad a 2050) para agregar valor a la producción primaria y ayudar a la (re)industrialización del país, lo que en el escenario secuencial podría tomar más tiempo y podría no aprovecharse plenamente por los plazos de desarrollo de los proyectos mineros.

En cuanto a las amenazas (Figura 51), éstas también están bastante relacionadas con las debilidades presentadas previamente. Lo más destacado tiene relación a la dificultad de conseguir el abastecimiento de materia prima para el complejo metalúrgico FURE, debido a la alta competencia por concentrados de parte de China (y otros países), y al interés de otros gobiernos de la región por avanzar en la cadena de valor de la industria del cobre (e.g., Chile, Ecuador, México y Perú). Otra amenaza relevante es la desinformación y el desconocimiento que existe sobre la industria. Adicionalmente, en este escenario también aparecen las restricciones ambientales como una amenaza significativa, en particular lo relativo a las consultas y participación de comunidades. Por último, existe una amenaza en torno a las capacidades del Estado para impulsar esta iniciativa en forma adecuada, lo que podría derivar en que se generen “elefantes blancos” asociados a ésta (una FURE con baja utilización y malos resultados operacionales producto de la restricción de abastecimiento de concentrados).

En definitiva, el escenario simultáneo es un escenario que se basa en la concepción de que Colombia tiene un gran potencial en sus recursos minerales, que debe ser aprovechado para generar encadenamientos productivos y la mayor cantidad de valor agregado posible, apoyando el proceso de (re)industrialización del país. Sin embargo, enfrenta el desafío y los riesgos de poner en valor ese gran potencial en un plazo acotado y desarrollando la cadena de valor de forma acelerada e inorgánica.

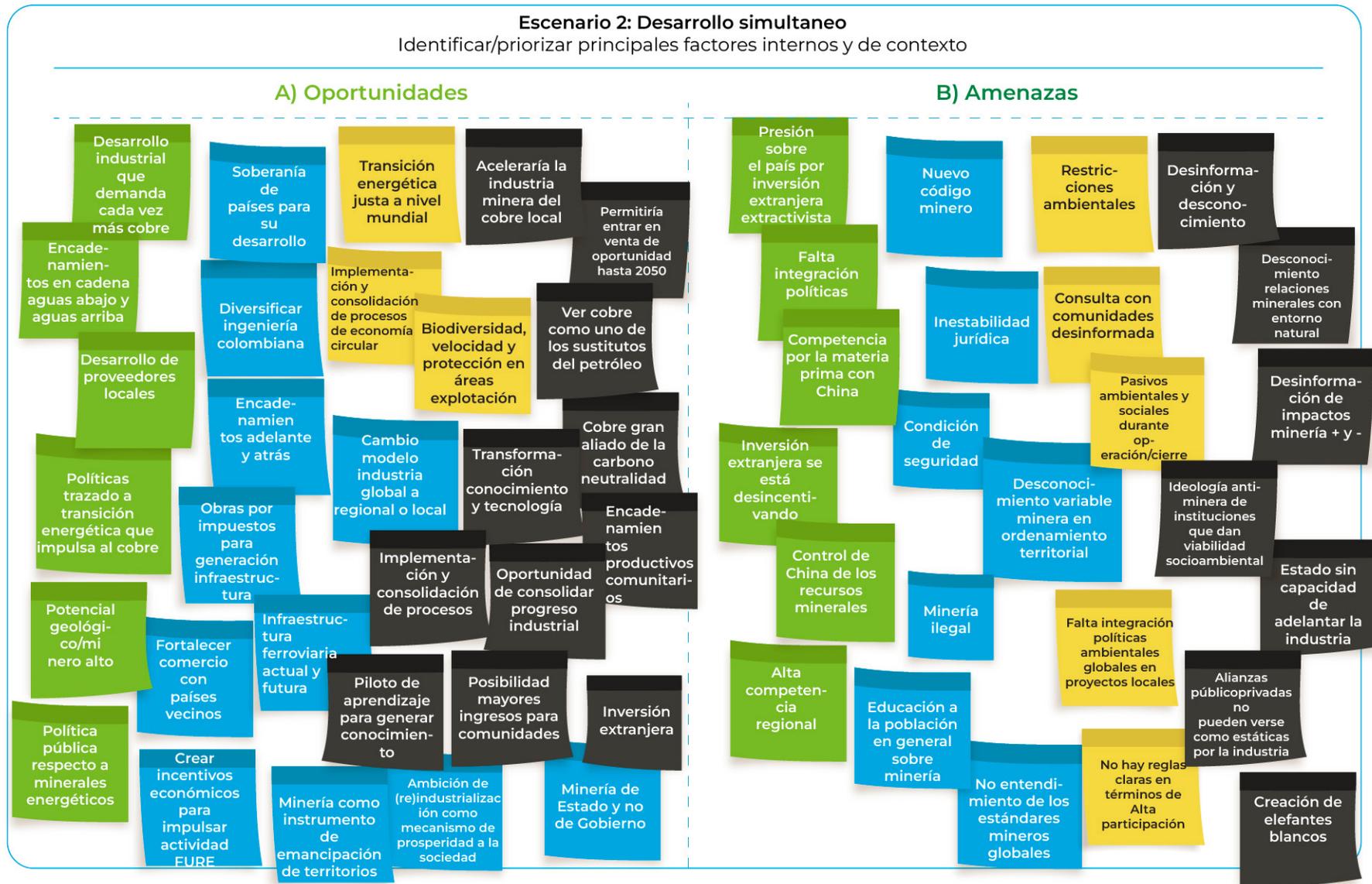
⁴ La Ley Segunda de 1959 de Colombia trata sobre la economía forestal de la nación y la conservación de recursos naturales renovables. Para el desarrollo de la economía forestal y protección de los suelos, las aguas y la vida silvestre, la Ley establece con carácter de “Zonas Forestales Protectoras” y “Bosques de Interés General”, según la clasificación de que trata el Decreto Legislativo 2278 de 1953, artículo 4, siete grandes zonas de reserva forestal. Estas áreas no son áreas protegidas; sin embargo, en su interior se encuentran áreas del Sistema Nacional de Áreas Protegidas SINAP y territorios colectivos. La Ley promueve tres tipos de figuras jurídicas, las cuales han sido objeto de una evolución normativa, que se puede enmarcar de la siguiente forma: (1) Zonas Forestales Protectoras, atendiendo a la definición contenida en el Decreto 2278 de 1953, orientado a la protección de rondas, suelos, áreas forestales protectoras, áreas de reserva forestal, recurso hídrico, POMCH o POMCAS, entre otros; (2) Bosques de Interés Nacional, definidos en el Decreto 2278 de 1953 como áreas que contienen especies de elevado valor comercial que económicamente conviene conservar; (3) Parques Nacionales Naturales, entendida como una estrategia para la conservación de la flora y la fauna.

Figura 50: Identificación de fortalezas y debilidades del escenario de desarrollo simultáneo de la cadena de valor de la industria minera en Colombia.



Fuente: Elaboración propia.

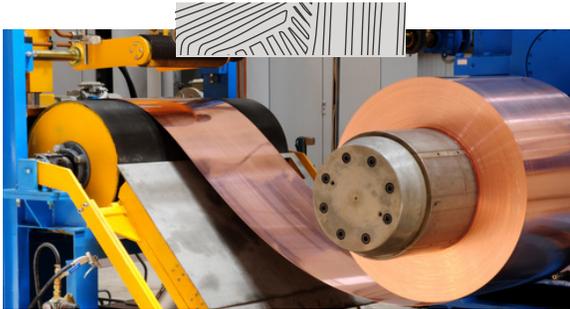
Figura 51: Identificación de oportunidades y amenazas del escenario de desarrollo simultáneo de la cadena de valor de la industria minera en Colombia.



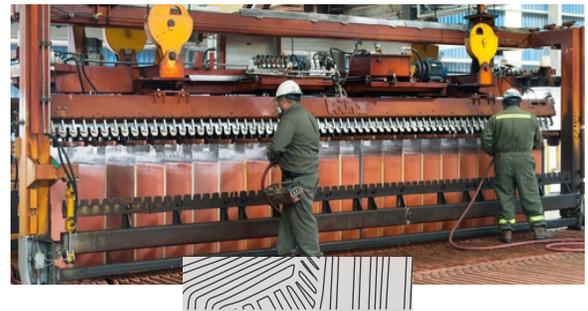
Fuente: Elaboración propia.

4.3 Hoja de ruta para el desarrollo de capacidades de procesamiento de cobre en Colombia

- Una vez descritos los escenarios de desarrollo de la cadena de valor de la industria del cobre en Colombia, y analizadas sus ventajas y desventajas, se puede construir una hoja de ruta que lleve a progresar en los siguientes objetivos:



(1) Avanzar en la agregación de valor en la cadena productiva del cobre.



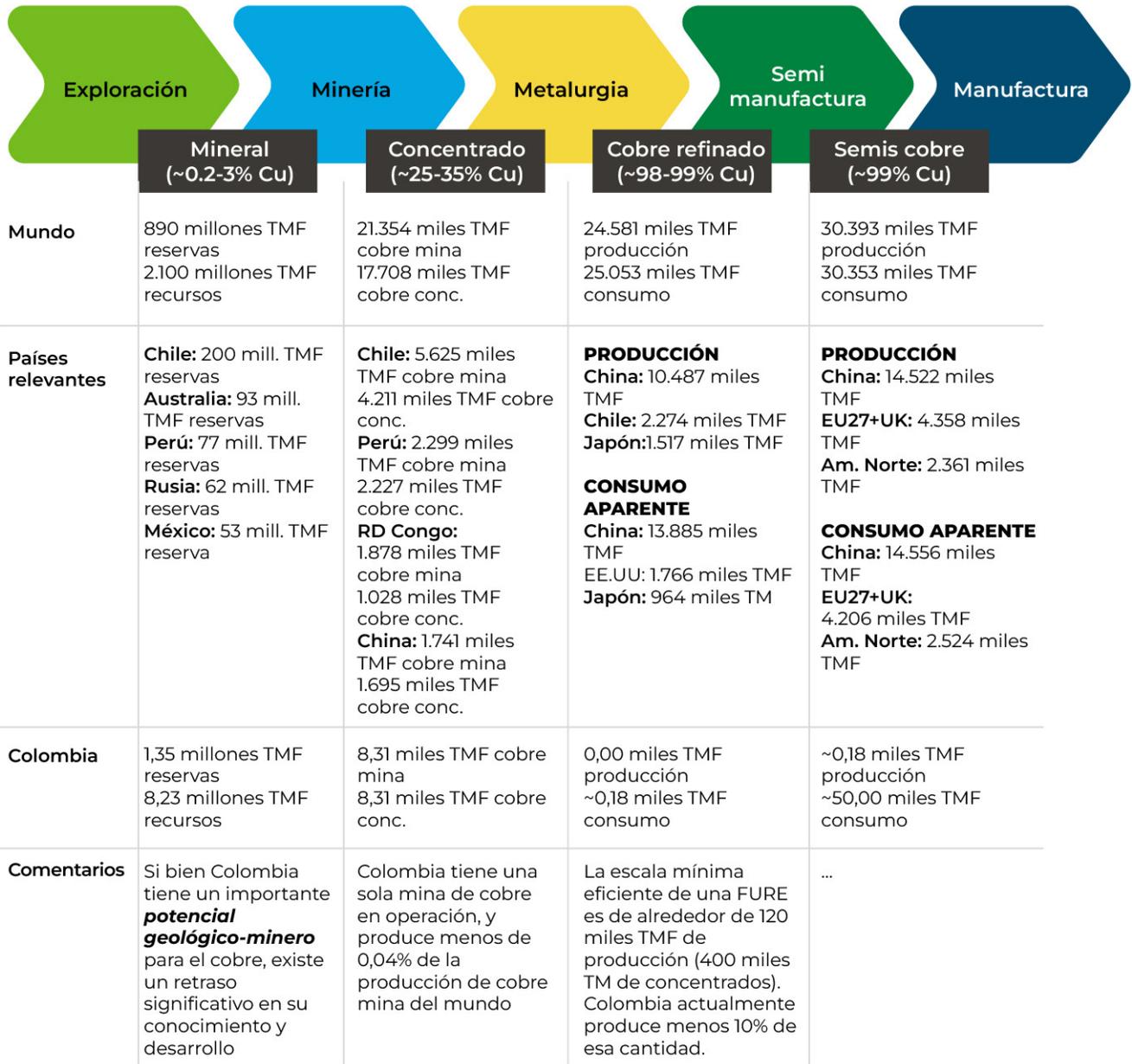
(2) Asegurar el abastecimiento de materias primas para el proceso de (re)industrialización de la economía colombiana, y con ello ayudar al éxito de éste.

Para ello, el primer paso es seleccionar el mejor escenario para el desarrollo de las capacidades de procesamiento de cobre. Luego, se requiere identificar las brechas para la materialización de esta iniciativa. Y finalmente, proponer líneas de acción para el cierre de las brechas identificadas. En las subsecciones siguientes se abordan estas temáticas.

4.3.1 Selección del escenario para el desarrollo de las capacidades de procesamiento de cobre en Colombia

En la Figura 52 se presenta la cadena de valor de la industria del cobre, con algunos valores de referencia para el mundo, de los principales países participantes en cada eslabón productivo y Colombia. Este esquema permite visualizar la situación actual del país en relación con los mercados globales, con el objetivo de evaluar la pertinencia y probabilidad de éxito de los escenarios de desarrollo analizados.

Figura 52: Cadena de valor de la industria del cobre, con referencias a principales participantes en cada eslabón y la contribución de Colombia.



Fuente: Elaboración propia

En primer lugar, se puede ver que, si bien Colombia cuenta con un potencial geológico de albergar depósitos de cobre de clase mundial, el nivel de desarrollo de las actividades de exploración y el conocimiento de detalle de sus recursos es relativamente acotado, tal como se identificó en el análisis FODA + PESTAL. En cuanto a la producción de cobre de mina, la situación de retraso productivo con respecto a otros países es aún más marcada en términos del número reducido de proyectos y operaciones de cobre en Colombia. Sin embargo, si se consideran los recursos totales

reportados para el país, se estima que Colombia podría alcanzar una producción de cobre de mina anual máxima de alrededor de 200 mil TM de cobre fino contenido (Dufey et al., 2023). Lo anterior, bajo el supuesto que todos los proyectos actualmente identificados se pusieran en operación en un mismo horizonte de tiempo, para que produzcan simultáneamente.

Por otra parte, desde el punto de vista productivo, es importante destacar que Colombia no cuenta con capacidad de fundición y refinación de cobre, por lo que no presenta estadísticas de producción de cobre refinado.

En cuanto a la demanda de cobre refinado por parte de Colombia, no existe información pública disponible. Sin embargo, se puede hacer una aproximación en base a las estadísticas de comercio exterior de cobre fundido y refinado, y de semi manufacturas de cobre de Colombia. Las importaciones de cobre fundido y refinado han venido sostenidamente a la baja desde un máximo histórico de 10,8 mil TM de cobre fino contenido en 2013, a menos de 200 TM en 2021. En cuanto a la importación de semi manufacturas, éstas muestran valores entre 38 y 45 mil TM de cobre fino contenido por año en la última década (45,8 mil TM de cobre fino contenido en 2021). Por otro lado, las estadísticas de exportaciones de semi manufacturas muestran valores marginales, y las de minerales de cobre volúmenes similares a la producción de concentrados de la mina El Roble (entre 8 y 15 mil TM de cobre fino contenido). Por lo tanto, se puede asumir que actualmente la demanda aparente por cobre refinado y semi manufacturas de cobre de Colombia es similar a la importación de estos productos, y se encuentra en torno a 50 mil TM de cobre fino contenido en total.

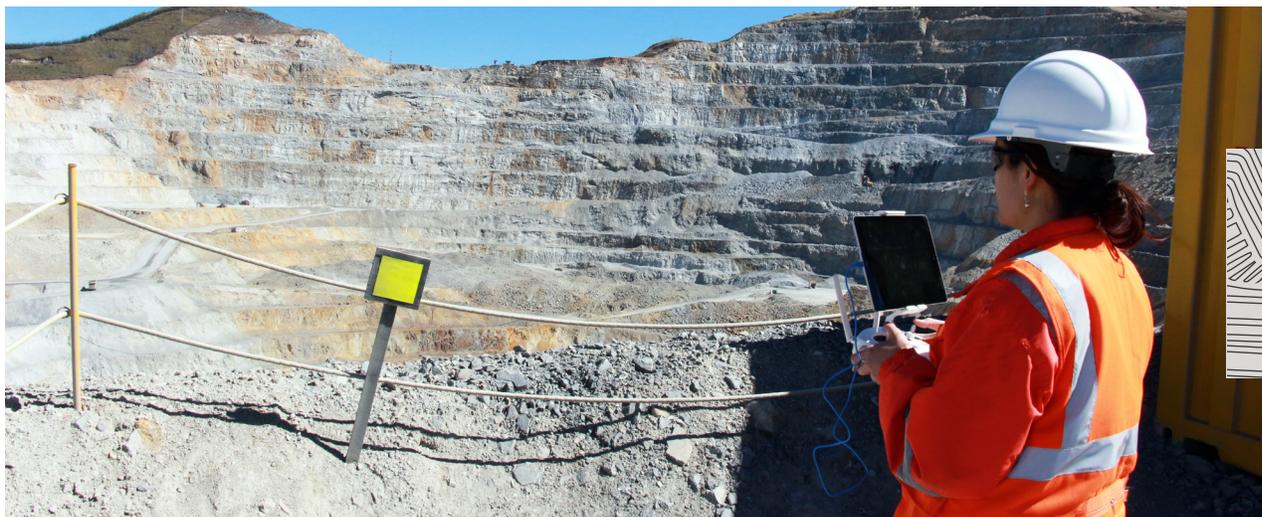
Finalmente, es importante considerar las economías de escala en los costos operacionales y de capital, y los requerimientos técnicos para las tecnologías de fusión y conversión más modernas (plantas FURE). Actualmente los proyectos de fundiciones a nivel global consideran capacidades de procesamiento por sobre 700 mil TM de concentrados o alrededor de 200 mil TM de cobre fino contenido producido anualmente, como se destaca en el capítulo 3.

Por tanto, de la revisión de esta información estadística y del análisis FODA + PESTAL se pueden resumir los siguientes hallazgos acerca del desarrollo de la cadena de valor del cobre en Colombia:

- ▶ El nivel de reconocimiento de sus recursos minerales y la producción minera de cobre de Colombia no se condice con el potencial geológico-económico que diversos actores del mercado e instituciones estiman que tiene el país (e.g., Bernal et al., 2023; Dufey et al., 2023; Harris, 2021; 2023).
- ▶ La actual producción de cobre de mina de Colombia no permitiría cubrir las necesidades internas de la economía colombiana, y mucho menos generar excedentes para la exportación. Tampoco permitiría desarrollar un complejo metalúrgico para la producción de cobre refinado, debido a que cubriría un porcentaje muy menor del abastecimiento de concentrados que requeriría si la escala productiva de la fundición y refinería (FURE) es competitiva en términos técnico-económicos.
- ▶ Desarrollar un complejo metalúrgico de fundición y refinería (FURE) de cobre en el corto a mediano plazo en Colombia implicaría necesariamente importar concentrados de cobre, en un mercado que es altamente competitivo y considerado estratégico por varios países que presentan ventajas en uno u otro extremo de la cadena de valor de la industria del cobre (Chile, Perú, RD Congo, Zambia por nombrar algunos en términos de la oferta de concentrados; China, Japón, Corea del Sur, India, Unión Europea por nombrar otros en cuanto a la demanda de concentrados y de cobre refinado).

- ▶ No obstante lo anterior, en Colombia existe el potencial de recursos minerales para sustentar un nivel de producción de cobre de mina que en el mediano a largo plazo permita:
 - Abastecer con concentrados un porcentaje significativo de la capacidad de procesamiento de un complejo metalúrgico para la producción de cobre refinado en el país.
 - Cubrir parte importante de la demanda/consumo aparente de la economía colombiana. Sin embargo, el desarrollo de ambos eslabones de la cadena de valor de la industria del cobre (producción de cobre de mina y producción de cobre refinado) requerirá cambios y mejoras institucionales y regulatorias significativas, y un plazo no menor a una década para materializarse si es que se abordan las brechas identificadas dentro de los próximos años.

Dados estos hallazgos, resulta razonable optar por el escenario secuencial para el desarrollo de la cadena de valor de la industria del cobre en Colombia, ya que presenta menores riesgos desde el punto de vista técnico-económico. A continuación, se describen los objetivos y focos de desarrollo de este escenario en el tiempo.



En el corto plazo a mediano plazo (tres a ocho años), la etapa inicial de este escenario busca aumentar significativamente la capacidad de producción de cobre de mina de Colombia de manera sostenible y responsable, con el objetivo de que esta producción represente una proporción significativa del abastecimiento del complejo metalúrgico que producirá cobre refinado en el país. Para esto, es necesario viabilizar la actual cartera de proyectos mineros de cobre, y en el mediano plazo incentivar el desarrollo de nuevas iniciativas. Para esto último es fundamental generar aceptación social de la actividad minera, mejorando la institucionalidad y regulación del sector, y destrabando los procesos administrativos para la aprobación socioambiental de los proyectos. En paralelo, el Gobierno Nacional debe mejorar sus capacidades institucionales y regulatorias, y generar nuevas capacidades para enfrentar el desafío de desarrollar los siguientes eslabones productivos de la cadena de valor del cobre (producción de cobre refinado y semi manufacturas de cobre). En particular, tiene que establecer una prospectiva tecnológica en procesamiento de minerales y producción de cobre refinado, y debe realizar un mapeo de los mercados de semi manufacturas y manufacturas de cobre en las cuales Colombia tiene más posibilidades de integrarse a cadenas productivas globales. Además, este período es crucial para generar las capacidades a nivel de personas y servicios que permitan el mayor encadenamiento local posible en los distintos eslabones de la cadena de valor de la industria del cobre.

En el mediano plazo (ocho a 15 años) el objetivo de este escenario es materializar la construcción de un complejo metalúrgico que sea, al menos, capaz de sustentar una producción de cobre refinado que cubra la demanda interna del país. Para ello, serán fundamentales las acciones que se desarrollen en la etapa inicial; en particular, el aumento de producción de cobre de mina que sustente el abastecimiento del complejo metalúrgico, y la prospectiva tecnológica que permita identificar las mejores oportunidades para el desarrollo de estas capacidades en el país. Además, durante esta etapa se tendrán que desarrollar las acciones para sustentar la producción de cobre de mina y refinado en el largo plazo (nueva cartera de proyectos), y las condiciones y los incentivos para desarrollar la industria de semi manufacturas y manufacturas de cobre en el país.

Finalmente, en el mediano-largo plazo se espera que Colombia logre desarrollar una industria de semi manufacturas de cobre y manufacturas de productos con contenidos relevantes del metal rojo. Para ello, será fundamental identificar los nichos y mercados en donde el país presente mayores ventajas frente a sus competidores.



4.3.2 Brechas y oportunidades para la materialización del escenario secuencial

El escenario secuencial requiere partir por impulsar un aumento de la producción de cobre de mina en Colombia, con el objetivo de proveer la materia prima para la producción de cobre refinado en el mediano plazo.

A ese respecto, Dufey et al. (2023) es un buen punto de partida, ya que identifica las brechas institucionales, regulatorias y de mercado para impulsar el desarrollo significativo de una minería responsable y sostenible en Colombia. Ese reporte establece dos elementos centrales: i) un marco conceptual para analizar el estadio de desarrollo del sector minero, a través de cinco pilares; y ii) el análisis de brechas y recomendaciones para desarrollar la industria minera en Colombia, con base en esa metodología⁵.

A continuación, se resumen los hallazgos de ese estudio, complementado con el trabajo realizado en este proyecto (levantamiento de información, entrevistas, y talleres FODA o FODA + PESTAL).

4.3.2.1 | Pilar 1: Inversiones y operaciones de calidad para el desarrollo de una minería responsable

Este pilar busca establecer las condiciones para impulsar las actividades de exploración y producción minera, desarrollando inversiones de calidad (sostenibles y responsables). Para ello, se divide en dos áreas de análisis: promoción de las exploraciones mineras; e impulso a las inversiones y continuidad operacional.

⁵ Para detalles de la metodología ver Dufey et al 2023

Promoción de las exploraciones:

En general, se aprecia que Colombia cuenta con un arreglo institucional y regulatorio sectorial adecuado para el nivel de desarrollo de su actividad minera, que puede ir fortaleciéndose a medida que el sector minero vaya creciendo. No obstante, se reconoce una debilidad en cuanto a la relación y coordinación de las instituciones y la regulación sectorial con otros sectores y reparticiones del aparato público. En especial, con el Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible (MADS) y la Autoridad Nacional de Licencias Ambientales, quienes son los responsables de establecer y fiscalizar las regulaciones y entregar las licencias ambientales para el desarrollo de la actividad minera.



En términos del conocimiento de la geología del país y sus depósitos minerales, todavía hay bastante espacio de mejora. Se requieren esfuerzos adicionales por parte del Estado para avanzar en cobertura y profundidad de la información geocientífica precompetitiva, necesaria para la exploración minera, como lo demuestran diversos estudios a nivel internacional (e.g., Bernknopf et al., 1997; Duke, 2010; Gildemeister et al., 2018). La información geocientífica precompetitiva permite reducir el alto riesgo de las etapas iniciales de exploración, en donde la probabilidad de éxito es bajísima, incentivando la participación de diversos actores. Además, esta información presenta características de bien público, ya que no existe rivalidad ni agotamiento en su uso. Adicionalmente, sirve para otros fines más allá de la exploración minera, tales como planificación territorial, mitigación de desastres naturales, etc. (Gildemeister et al., 2018). No obstante, es importante destacar la relevancia de que Gobierno Nacional reconozca que para avanzar decididamente en esta línea también es fundamental viabilizar los trabajos de exploración por parte de los privados, ya que la exploración es una actividad de alto riesgo, que requiere montos de inversión relevantes, y presenta plazos extensos para obtener resultados; y, por tanto, una actividad difícil de sustentar únicamente desde el Estado en el mediano-largo plazo, y que puede acelerar su desarrollo con la participación de privados o en asociaciones público-privadas.

En cuanto al sistema de derechos mineros, éste es razonable, pero tiene espacios de mejora principalmente en términos de su gestión y administración. Además, es fundamental modificar ciertos aspectos de la regulación y otorgar mayores capacidades a la Agencia Nacional de Minería para realizar de manera adecuada su tarea de fiscalización de los contratos mineros.

Impulso a las inversiones y continuidad operacional:



La normativa e institucionalidad para impulsar grandes proyectos de inversión en el país (llamados Proyectos de Interés Nacional Estratégico o PINE) se encuentra bien estructurada y debería ayudar a enfrentar los desafíos del sector minero a través de la coordinación de las distintas reparticiones del Estado y sus procesos respectivos. Sin embargo, del diagnóstico se aprecia que, en términos de los proyectos mineros de gran escala, el sistema no ha cumplido con su objetivo. Esto se debe, en parte, a los siguientes motivos:

- **La reticencia/rechazo que este sistema genera en autoridades de distintas jerarquías territoriales y los conflictos entre ellas.**
- **Los problemas asociados con la institucionalidad y las regulaciones que restringen y/o prohíben el desarrollo minero por temáticas socioambientales.**
- **El bajo conocimiento y aceptación de la actividad minera como un motor de desarrollo por parte de tomadores de decisión claves en el mundo político y social, y de la población en general.**



En cuanto a las instituciones públicas y la normativa sectorial para grandes proyectos mineros, éstas tienen un buen nivel de desarrollo, pero con oportunidades de mejora en varias áreas. En términos de la institucionalidad, ésta se encuentra bien estructurada, con objetivos y competencias adecuadas para el nivel de desarrollo actual del sector, aunque se prevé que requerirá fortalecerse a medida que el sector minero metálico vaya creciendo (particularmente en capacidades de fiscalización). No obstante, la falta de una visión compartida de la minería como motor de desarrollo sostenible y responsable puede reducir o anular los avances logrados en los últimos años, porque falta una. Por otro lado, la regulación es adecuada y pertinente, con algunas temáticas relevantes presentando retrasos que se están abordando por las distintas reparticiones públicas (e.g., regulación para los depósitos de colas/relaves, y legislación asociada a los planes de cierre y abandono de faenas mineras).

Por su parte, y como se mencionó previamente, la evaluación y aprobación socioambiental de proyectos es una de las áreas que presenta mayores dificultades y, por lo tanto, también donde existen mayores oportunidades de mejora. Dentro de las temáticas asociadas a este punto aparecen dos como centrales. Primero, una parte significativa del territorio del país está bajo algún tipo de protección ambiental y/o social y sin una definición absoluta y transparente sobre las áreas restringidas o prohibidas para el desarrollo de la minería. Además, falta mejorar los procesos para viabilizar proyectos en áreas restringidas, pero no prohibidas para el desarrollo minero, dada la amplia extensión del territorio del país bajo estas figuras de protección (zonas restringidas para la actividad minera). En particular, se destaca la necesidad de revisar y actualizar la Ley Segunda, y mejorar el proceso de sustracción de áreas asociado a dicha legislación. Además, es importante definir claramente los límites de áreas de prohibición, por ejemplo, en el caso de los páramos.



En segundo lugar, los procesos de consulta a comunidades étnicas no están completamente regulados, existiendo conflictos diversos asociados a éstos.

Por último, en términos de la protección a las inversiones, existe un sistema bastante robusto que ha dado seguridad a la inversión. Sin embargo, se aprecia una mayor judicialización de los procesos, terminando algunos conflictos socioambientales siendo judicializados en tribunales, en la Corte Constitucional del país y/o en instancias internacionales. En estos procesos la mayor dificultad radica en los extensos plazos resolutivos, que generan incertidumbre en el sector.

4.3.2.2 | Pilar 2: Encadenamientos virtuosos y tecnológicos y capital humano para un desarrollo productivo y empleo de calidad

Este pilar analiza las condiciones necesarias para que la minería impulse la economía del país a través del desarrollo de encadenamientos productivos y la formación de capital humano avanzado. Para ello, se divide en dos áreas de análisis: desarrollo de proveedores y encadenamientos productivos; y desarrollo de capital humano.

Desarrollo de proveedores y encadenamientos productivos:



El país cuenta con una base industria atractiva, lo que le permitiría generar emprendimientos a nivel regional y nacional con capacidades de diseño e ingeniería suficientes para involucrarse en las cadenas de valor de la industria del cobre, primero como proveedores de bienes y servicios intermedios (adaptación o mejoras de bienes, servicios y procesos), para luego avanzar en la generación de desarrollos propios. Para lograr esto, se necesitará atraer proveedores internacionales para ayudar a la sofisticación de los bienes y servicios entregados a través del apoyo y la colaboración.



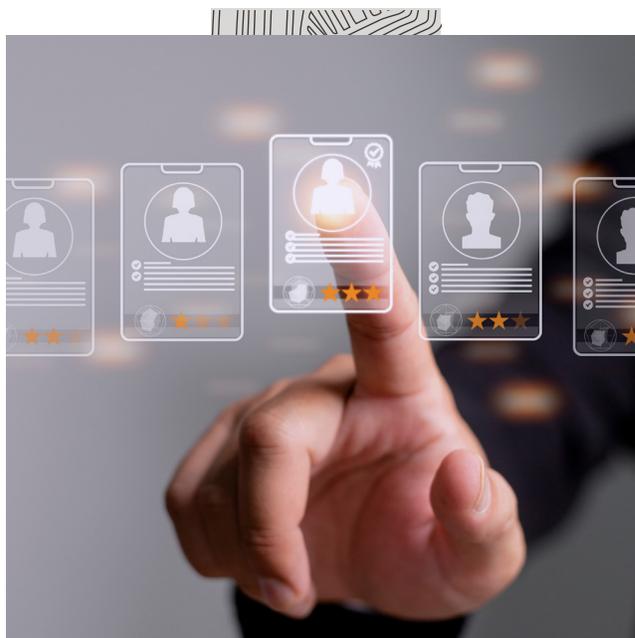
No obstante, el país requiere de acciones decididas hacia promover los encadenamientos productivos asociados a la minería. Las instituciones nacionales y las políticas públicas locales, regionales y nacionales pueden tener un mayor grado de coordinación en pro de atender esta necesidad que se manifiesta en el bajo nivel de intercambio económico que existe entre el sector minero y otros sectores de la economía colombiana.

También se destaca una falta o retraso en el desarrollo de normativas y capacidades institucionales relacionadas a esta temática. Los esfuerzos en generar compras locales y encadenamiento productivos usualmente son aislados y discontinuos en el tiempo, y dependen fuertemente del interés de las compañías. Lo mismo ocurre con las iniciativas asociadas a generar investigación, desarrollo e innovación (I+D+i) para la minería local, aún muy menores.

La falta de infraestructura logística y de transporte, y las bajas capacidades institucionales a nivel regional y local (con algunas excepciones), también dificultan el desarrollo de un ambiente de negocios competitivo que permita el desarrollo emprendimientos locales asociados a la cadena de valor de la industria minera.

Desarrollo de capital humano:

En Colombia hay una base relevante de capital humano especializado, con programas de formación en las principales especialidades de muchos rubros industriales. Sin embargo, en algunas áreas necesarias para el desarrollo de una minería industrial competitiva existen deficiencias generadas por la falta de un mercado laboral local atractivo (tamaño de la industria). También existen brechas relevantes en términos de las necesidades de la nueva economía; por ejemplo, en términos de capacidades digitales en la población. Adicionalmente, no se aprecia una colaboración fluida para enfrentar los desafíos de formación de capital humano, y cada actor del ecosistema (empresas, centros de formación y universidades) trabaja de manera independiente (no hay programas colaborativos).



El Estado puede profundizar sus esfuerzos para coordinar el desarrollo de capital humano para el sector minero. El Servicio Nacional de Aprendizaje (SENA) ha focalizado su trabajo en la minería artesanal, debido a su impacto en términos sociales y ambientales. Por otro lado, falta conocimiento geocientífico básico sobre el potencial existente para cobre en el país, y no existen centros de entrenamientos para operadores de equipos mineros especializados y tecnológicamente avanzados, debido también a la falta de demanda por estos servicios. Por último, aunque existen instituciones de formación superior de alta calidad en el país, y la formación de ingenieros en Colombia compite a nivel internacional, los programas de especialización en temáticas mineras (geología económica, ingeniería de minas, ingeniería metalúrgica, entre otros) están focalizados principalmente en minería del carbón, esmeraldas, oro y minerales industriales, existiendo poco conocimiento sobre la minería del cobre.

4.3.2.3 | Pilar 3: Factores críticos para una minería verde, competitiva y de baja huella ecológica-ambiental

Este pilar busca evaluar las condiciones necesarias para desarrollar una minería que sea competitiva pero también sostenible y responsable, con un alto control de sus impactos y minimizando su huella ecológica-ambiental. Para ello, el análisis se divide en siete áreas: gestión sostenible del agua; protección de la biodiversidad; mitigación de cambio climático y energía sostenible; adaptación y resiliencia climática; depósitos de colas/relaves y otros pasivos ambientales mineros; economía circular; y trazabilidad para el acceso a mercados.

Gestión sostenible del agua:



En Colombia existe un buen desarrollo normativo e institucional relacionado al acceso al agua y su calidad. El uso de agua por parte del sector minero está regulado, requiriéndose contar con un permiso por parte de la autoridad ambiental y cumplir con las normas de aprovechamiento y calidad. Además, el país avanza en adoptar un enfoque de cuencas y políticas para la integrar los impactos asociados al cambio climático en lo relativo a la gestión y fiscalización de este recurso.

Por otro lado, está en elaboración la normativa asociada a la construcción y gestión de depósitos de colas/relaves, y se está trabajando en una ley para el cierre y abandono de operaciones mineras, en donde la gestión del agua es un tema central. No obstante, se identifica una brecha en cuanto a información y estadísticas públicas para la gestión del agua, tanto a nivel local como regional y nacional, que sustenten la gestión territorial que realiza el Estado sobre este recurso de vital importancia.

En cuanto a la aplicación práctica de esta institucionalidad y marco regulatorio en minería, existen diferencias relevantes entre las operaciones existentes y los proyectos nuevos. Estos últimos están comprometiendo en sus procesos de evaluación ambiental a tener un enfoque de cuenca en la gestión del agua, y actividades de monitoreo de la disponibilidad y calidad de este recurso. Por otro lado, los primeros (operaciones existentes) recién están avanzando hacia la implementación de las mejores prácticas de la industria. Por último, el sector empresarial ha comprometido su adhesión a estándares de sustentabilidad y gestión de agua reconocidos internacionales, pero esto aún se encuentra en un nivel aspiracional debido al nivel de avance de la cartera de proyectos mineros.

Protección de la biodiversidad:

Como se comentó previamente, éste es uno de los temas más críticos para avanzar en el desarrollo de una minería sostenible y responsable. El país cuenta con una regulación de protección de áreas y ecosistemas que cubre un porcentaje significativo de su territorio. Estos instrumentos regulan la potencial operación minera en áreas protegidas y su impacto en la biodiversidad, y las zonas de prohibición a la actividad minera. Sin embargo, existen varias deficiencias asociadas a estos procesos, y una de las normas principales (Ley Segunda) es bastante antigua y debe ser revisada y actualizada.



Por otro lado, aunque existe una regulación sobre un fondo de remediación, la compensación de pérdidas de biodiversidad y la promoción de un enfoque de impacto cero aún dista de ser un enfoque regenerativo.

Por último, al igual que con el agua, se presentan diferencias relevantes entre los proyectos existentes y las nuevas iniciativas. Los primeros recién están avanzando hacia medidas de compensación, mientras que los segundos están comprometiendo en sus evaluaciones de impacto ambiental al monitoreo y ganancia positiva en biodiversidad. Además, los proyectos nuevos están adhiriéndose a estándares de sustentabilidad internacionales que abordan esta temática, pero debido al nivel de avance de la cartera de proyectos mineros todavía esto se encuentra sólo a nivel de compromiso.

Mitigación de cambio climático y energía sostenible:



En Colombia existen diversos instrumentos y regulaciones para la reducción de emisiones de gases de efecto invernadero (GEI), incluyendo la contribución determinada a nivel nacional (CND) que compromete la reducción de 51% de las emisiones GEI al 2030 y la carbono neutralidad para 2050); la Estrategia Climática de Largo Plazo; un impuesto al carbono; y un set de medidas y requerimientos concretos para la minería. Algunas metas y/o medidas para el sector minero son: 100% de instrumentos de planeación sectorial incorporando variables de cambio climático; 70% de abastecimiento energético por energías renovables al año 2030; medidas de eficiencia energética; gestión de demanda; reducción de emisiones fugitivas; y el uso de buses eléctricos para el transporte de personal; entre otras.



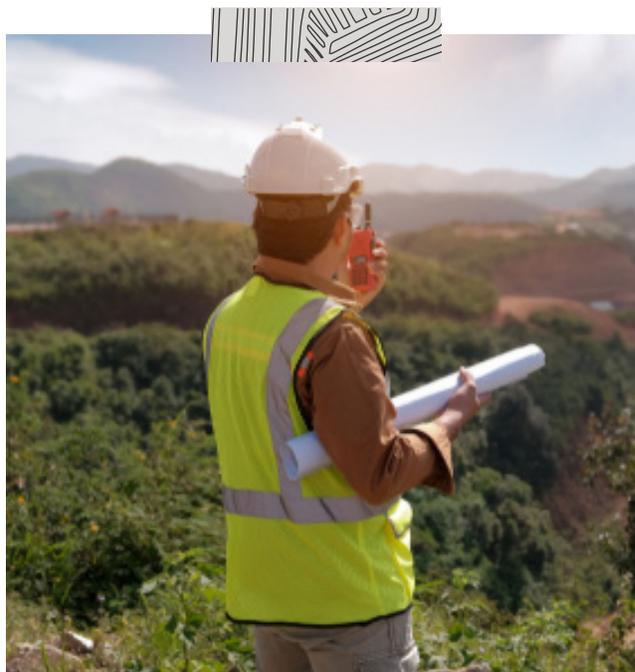
No obstante, el nivel de desarrollo de la normativa y de la estrategia general para el país, y particular para la minería, todavía es insuficiente, de acuerdo con lo requerido por la ciencia. Además, el nivel del impuesto al carbono es bajo y con posibilidad de compensación por lo que no incentiva al cambio tecnológico.

Por otro lado, la matriz energética del país es mayoritariamente renovable, con una participación alta de la hidroelectricidad. Sin embargo, existen metas de aumento de participación de energías renovables no convencionales.

Por último, desde el punto de vista de la aplicación de estos instrumentos y regulaciones, se encuentra que para las actuales operaciones no hay información disponible públicamente que indique la existencia de una política climática ni metas o medidas de reducción de emisiones. En proyectos nuevos, las matrices cuentan con compromiso de carbono neutralidad, pero no se identifican acciones específicas para los proyectos en el país.

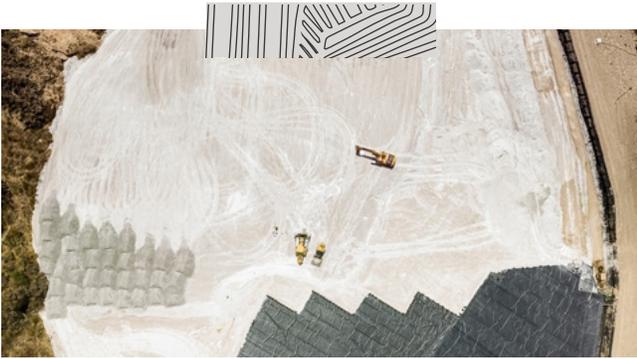
Adaptación y resiliencia climática:

Al igual que en la temática de mitigación del cambio climático, en temas de adaptación y resiliencia en Colombia existen diversa normativa e instrumentos para enfrentar los desafíos y fortalecer la resiliencia. Entre otros, están las medidas comprometidas en la contribución determinada a nivel nacional, la cual incluye 30 metas enfocadas en las áreas de recursos hídricos, protección de ecosistemas costeros, terrestres y marinos, restauración, áreas protegidas, infraestructura y agricultura; el Plan Nacional de Adaptación y la Estrategia Climática de Largo Plazo, los que establecen medidas generales aplicables a la minería y algunas específicas para el sector. No obstante, todavía no es claro el nivel de profundidad y completitud que puedan alcanzar para reducir y eliminar los riesgos climáticos. Más aún, no se identifican la bajada de estas herramientas a distintos niveles territorial ni sectoriales.



En cuanto a la aplicación de estos instrumentos en el sector minero, no se encontró información disponible respecto de acciones desde las empresas para el fortalecimiento de la resiliencia climática. Por otro lado, en 2021 la Asociación Colombiana de Minería se comprometió a aplicar el estándar Towards Sustainable Mining (TSM) de la Asociación Minera de Canadá. Este estándar abarca el cambio climático y establece una guía para considerar sus riesgos y oportunidades, así como para incorporar criterios de adaptación en la toma de decisiones.

Depósitos de colas/relaves y pasivos ambientales mineros:



El Ministerio de Minería y Energía publicó una propuesta de lineamientos técnicos para los procesos relacionados con depósitos de colas o relaves, y recientemente fue expedida la Ley 2327 que crea y define legalmente los pasivos ambientales. En cuanto a los planes de cierre y abandono de minas, existen diversas disposiciones relacionadas, pero no se cuenta con una Ley que regule todos los aspectos relevantes.

En términos de la aplicación práctica de estas temáticas, existen diferencias entre proyectos en operación e inversiones nuevas. Los proyectos en operación han presentado diversas problemáticas en su operación de depósitos de colas/relaves en las últimas décadas, aunque han avanzado en mejorar las condiciones de construcción y operación. Los proyectos nuevos declaran manejo de relaves y pasivos de alto estándar, y sus empresas matrices forman parte de la iniciativa TSM de la Asociación Minera de Canadá que aborda esta temática.

Economía circular:

En Colombia existe una estrategia nacional sobre economía circular. Sin embargo, está primariamente enfocada en el reciclaje y la reducción de la huella ambiental más que en la generación de una economía y emprendimientos asociados a procesos productivos circulares. Por lo tanto, la normativa y sus procedimientos todavía no permiten una mayor participación de privados.



En cuanto al desarrollo privado, hay algunas iniciativas principalmente en industrias asociadas al comercio. Sin embargo, en minería solo se aprecian casos parcelados y acotados a algunos procesos y desechos puntuales de las operaciones mineras.

Trazabilidad para el acceso a mercados:



Colombia cuenta con sistemas de metrología nacionales y laboratorios especializados que permiten algunas aplicaciones de trazabilidad para la minería. Sin embargo, no se identifican estándares de sostenibilidad para la minería que permitan una trazabilidad de los procesos y productos mineros, como están empezando a demandar los principales mercados. Si bien las empresas mineras de la Asociación Colombiana de Minería (ACM) están adheridas al International Council on Mining and Metals (ICMM), el cual posee diversos protocolos para avanzar en la sustentabilidad de la industria minera, y muchas de ellas se encuentran adoptando el estándar de sostenibilidad internacional TSM, todavía no se ve su aplicación práctica por el estado de avance de la cartera de proyectos.



4.3.2.4 | Pilar 4: Conectividad y corredores logístico-mineros de alto desempeño y sostenibles

Este pilar busca analizar los elementos de infraestructura habilitantes para el desarrollo de una minería moderna, competitiva y responsable. Para ello, el análisis se divide en dos temáticas: corredores mineros logísticos de alta eficiencia; y aprovechamiento de la revolución digital.

Corredores mineros logísticos de alta eficiencia:

Durante los últimos años Colombia ha mostrado un aumento significativo en la inversión y el desempeño de su infraestructura logística, la cual se encuentra principalmente enfocada en la exportación de mercancías. Además, existe normativa e iniciativas públicas para el desarrollo de nodos logísticos. Sin embargo, no hay un foco prioritario en evaluar las necesidades y las oportunidades que puede brindar el sector minero a este respecto.



Desde el punto de vista del sector privado, no se identifican aportes relevantes en materia logística, debido principalmente al estado de desarrollo de la cartera de proyectos que todavía se encuentran en etapas iniciales.

Aprovechamiento de la revolución digital:



La penetración de internet y las nuevas tecnologías ha venido creciendo sostenidamente durante la última década en el país, y de la mano la inversión en la infraestructura de soporte para la revolución digital. Recientemente ha empezado el despliegue de la tecnología 5G en el país y esto permitirá incrementar el intercambio comercial interno y externo del país.



La participación del sector privado ha sido fundamental en estos procesos, fuertemente apoyada por la Ley de Alianzas Público Privadas (APP) de 2021, que entrega incentivos a la inversión en infraestructura logística y tecnológica. Por tanto, se observa un ecosistema de negocios centrado fuertemente en desarrollos asociados a las tecnologías 4G y 5G, pero con foco en sectores económicos distintos a la minería.

4.3.2.5 | Pilar 5: Régimen fiscal e institucional virtuoso y gobernanza para la acción colectiva

Este pilar busca establecer las condiciones para que el sector minero contribuya al desarrollo de un entorno económico y social positivo y justo para el país, y para que la actividad minera goce de un apoyo social sostenible a través del tiempo. Para ello, se divide en dos áreas de análisis: entorno económico favorable y régimen fiscal virtuoso; e inserción en el territorio y apoyo social sostenible.

Entorno económico favorable y régimen fiscal virtuoso:

En general, durante la última década en Colombia han existido una regulación económica y un entorno que han sido favorable para la atracción de inversiones de calidad, con un manejo macroeconómico adecuado en términos de inflación, tipo de cambio y deuda pública, y una mayor apertura de su economía al mundo.



Por otro lado, la regulación económica también ha sido propicia, con mayores libertades para el emprendimiento e incentivos para la cooperación público-privada, un reconocimiento adecuado de los derechos de propiedad y un buen nivel de seguridad jurídica. No obstante, en términos de inversión en grandes proyectos productivos una restricción es la gestión de permisos, la cual presenta algunas brechas relevantes en el ámbito socioambiental ya discutidas previamente. A pesar de ello, en general los procesos de permisos se encuentran regidos principalmente por parámetros técnicos. Adicionalmente, se está revisando la normativa de ordenamiento territorial.

Sin embargo, existen grupos fuertemente ambientalistas y anti-minería, que intentan ralentizar el desarrollo de la actividad. Por otro lado, hay grupos de presión que buscan aumentar considerablemente la carga tributaria para el sector, pudiendo dejarla por encima de las tasas máximas efectivas de otros distritos que compiten con el país por atraer inversión en minería. De momento la política de desarrollo productivo está poniendo más acento en el impulso de la agricultura, el turismo y los servicios ambientales y no tanto en la minería.

Desde el punto de vista privado, los mercados financieros y de capitales locales están en desarrollo, y todavía requieren mayor profundidad y madurez. A nivel local y en las zonas más apartadas o remotas y en comunidades pequeñas, los bienes y servicios que se pueden adquirir o contratar como proveedores son informales, lo que dificulta su inserción en la cadena de valor de la minería formal. Por otro lado, existe un importante nivel de actividad económica informal en el país; y, en particular, un desarrollo significativo de la minería informal e ilícita, esencialmente ligado a la minería del oro, y en menor medida a las piedras preciosas (esmeraldas).

Por lo tanto, más allá de los aspectos positivos del entorno económico y tributario, la violencia y la corrupción asociada al narcotráfico y a las actividades ilícitas, todavía generan erosión de las instituciones y la estabilidad política y social.

Inserción en el territorio y apoyo social sostenible:



A nivel regional y local las capacidades institucionales son escasas salvo algunas excepciones, lo que dificulta la gestión y administración de los recursos (regalías) y otros beneficios provenientes de la actividad minera. Además, existen espacios relevantes de discrecionalidad y corrupción.

● ○ ●

Por otro lado, la aceptación de la minería difiere entre los territorios. El sector ha ido generando espacios de diálogo; sin embargo, en las zonas urbanas, donde hay una mayor oposición a la minería, todavía existe un desconocimiento importante de la actividad minera. En general, si se realiza un trabajo adecuado de sociabilización e inserción territorial de los proyectos – esto es desde la etapa inicial de conceptualización de los mismos, de tal forma que se vincule a las comunidades del área de influencia desde la etapa inicial de adquisición de los derechos mineros a explorar y explotar los minerales de propiedad del Estado - se puede llegar a un buen nivel de aceptación en el plano local, pero no a nivel central.

Por último, para lograr un apoyo social sostenible a la actividad minera se identifica la necesidad de generar una visión y relato común de parte de los actores públicos y privados que conforma el sector. Dicho relato debería buscar entender qué quiere de la minería la sociedad colombiana, y comunicar los beneficios que entrega y los desafíos que enfrenta este sector.



4.3.3 Objetivos y líneas de acción prioritarias para el escenario secuencial de desarrollo de la cadena de valor de la industria del cobre en Colombia para la industria primaria del cobre

Para materializar el escenario secuencial de desarrollo de la cadena de valor de la industria minera en Colombia se requiere establecer objetivos y metas con líneas de acción y esfuerzos colaborativos. Como se ha mencionado previamente, los objetivos últimos que motivan la producción de cobre refinado en Colombia son:

(1) Avanzar en la agregación de valor en la cadena productiva del cobre.

(2) Asegurar el abastecimiento de materias primas para el proceso de (re)industrialización de la economía colombiana, y con ello ayudar al éxito de éste.

Para ello, el escenario secuencial establece tres pasos o etapas a seguir, de acuerdo con la conformación de la cadena de valor de la industria: desarrollo de la **industria primaria del cobre** (producción de cobre mina); desarrollo de la **metalurgia del cobre** (producción de cobre refinado); y desarrollo de la industria de **semi manufacturas y manufacturas de cobre**. A continuación, se presentan los objetivos, metas y líneas de acción asociados a la primera de estas etapas -la industria primaria del cobre.

El objetivo de esta etapa es asegurar el abastecimiento de la materia prima (concentrados u otros) y generar las capacidades necesarias para desarrollar un complejo metalúrgico que permita producir cobre refinado en Colombia.

La meta propuesta para esta etapa es alcanzar una producción de cobre de mina que cubra al menos 80% de la demanda/consumo aparente anual de cobre fino de Colombia al 2035, estimada en 80 mil TM de cobre fino contenido o, en su defecto, llegar a un nivel de producción que alcance a abastecer 75% de la capacidad de tratamiento del complejo metalúrgico en forma técnica, económica, ambiental y socialmente sostenible y responsable a desarrollar en el país. El monto de producción dependerá de la tecnología de procesamiento elegida para el complejo metalúrgico. Si es una FURE, se estima una escala de producción mínima eficiente en torno a 200 mil TM de cobre fino contenido en concentrados al año (equivalentemente a 700 mil TM de concentrados de cobre por año con una ley/tenor entre 26% y 30%). Por otro lado, si es por la vía hidrometalúrgica, que todavía no se encuentra madura desde el punto de vista técnico-económico, el nivel de producción necesario podría ser significativamente menor, entre 5 mil y 50 mil TM de cobre fino contenido.

Para lograr estos objetivos, se recomiendan las siguientes líneas de acción al sector minero colombiano en pleno:

Desarrollo de la actual cartera de proyectos mineros de cobre:

- ▶ Establecer un proceso de diálogo tripartito entre el Estado, las empresas mineras y la sociedad civil para confluir en una visión y relato común acerca del rol que debe tener la minería en el desarrollo sostenible y responsable de Colombia; en particular, la minería de minerales críticos para la transición energética y el combate al cambio climático. Por parte del Estado y la sociedad civil es fundamental involucrar a representantes regionales y locales de los principales municipios y departamentos en donde se encuentran emplazados los principales proyectos mineros de cobre.

- ▶ Identificar y establecer como Proyectos de Interés Nacional Estratégico (PINE) a un número reducido de proyectos mineros de cobre que tengan un potencial de producción adecuado para avanzar hacia la siguiente etapa de la estrategia. La elección de estos proyectos será crítica para avanzar en los objetivos planteados, y deberá considerar aspectos técnicos, económicos, ambientales y sociales. Entre ellos, el estado de avance actual de los proyectos jugará un rol central, ya que iniciativas en etapas tempranas pueden tardar más de una década en iniciar su producción y, por lo tanto, pueden poner en riesgo el aprovechamiento de la ventana de oportunidad que se presenta con la industria del cobre.
- ▶ Establecer un proceso de colaboración público-privado entre el Estado y las empresas dueñas de estos proyectos para adelantar los procesos de aprobación ambiental y social de estas iniciativas, considerando las mejores prácticas y los más altos estándares de la industria. El Estado debe establecer un grupo de trabajo para apoyar la gestión de estos proyectos con las diferentes reparticiones estatales involucradas en su desarrollo.
- ▶ Establecer nuevas cláusulas en los contratos mineros de estos proyectos que permita la primera opción de compra de la producción por parte del Estado. Esta primera opción de compra debe ser a precio de mercado o considerando un descuento acotado en los precios; este último puede estar asociado a los ahorros producto de la reducción de costos de transporte y de logística de la producción. El objetivo de esta acción es asegurar y consolidar, en forma competitiva, el suministro suficiente de la materia prima (concentrados de cobre) necesaria para el desarrollo del complejo metalúrgico que se establezca en el país.

Generación de condiciones para sustentar el desarrollo de nuevos proyectos mineros de cobre en el largo plazo:

- ▶ Ampliar el diálogo tripartito entre el Estado, las empresas mineras y la sociedad civil para generar una estrategia/política minera país, con foco en los minerales estratégicos para la transición energética para los cuales Colombia cuenta con potencial geológico-minero, y que permita enfrentar los desafíos de desarrollar una minería sostenible y responsable de estos minerales. Este trabajo debe materializarse paulatinamente, y aprovechando las experiencias positivas que se vaya ganando en los Proyectos de Interés Nacional Estratégico (PINE), para mostrar con evidencia que se puede desarrollar una minería que es respetuosa del medioambiente y que aporta al desarrollo de las comunidades en que se inserta. Este proceso deberá ser parte de los insumos necesarios para la actualización de los planes de desarrollo territorial de los departamentos y municipios del país. Lo anterior, requiere de fortalecer la articulación entre los niveles nacional, regional y municipal.
- ▶ Revisar los procesos asociados a la sustracción de áreas de la Ley Segunda de 1959, y mejorar la reglamentación de los procesos de consulta a comunidades étnicas y a la sociedad civil en general. Esto con el objeto de entregar seguridad a los inversionistas y las empresas, pero también permitiendo que las comunidades puedan participar y aportar en las definiciones relevantes del desarrollo de los proyectos mineros.
- ▶ Mejorar el conocimiento y la disponibilidad de información sobre el potencial geológico-minero del país, a través del trabajo del Servicio Geológico Colombiano y de las empresas de exploración y mineras. Esto servirá para priorizar áreas estratégicas para el desarrollo minero, lo que impactará en los procesos de viabilización de la cartera de proyectos de largo plazo.

- ▶ Regular por ley la primera opción de compra de los minerales por parte del Estado, con el fin de que éste tenga la posibilidad de coordinar los esfuerzos necesarios para avanzar en la cadena de valor de la industria del cobre, y de otras industrias minerales relevantes para la nueva economía.
- ▶ Actualizar la normativa y regulación técnica y ambiental del sector, con el fin de incorporar las mejores prácticas y estándares internacionales de la industria minera. En particular, se deben materializar los esfuerzos actuales relacionados al diseño y gestión de los depósitos de colas/relaves y pasivos ambientales mineros, y concernientes a los planes de cierre y abandono de operaciones mineras.
- ▶ Incorporar instrumentos y mecanismos que incentiven el empleo y las compras locales y nacionales, y el desarrollo de I+D+i colaborativa con participación colombiana en los proyectos mineros. Estos mecanismos podrán establecer niveles mínimos y deseados requeridos por los distintos niveles político-administrativos, con el fin de fortalecer los encadenamientos productivos y la contribución de la actividad minera al desarrollo sustentable de las comunidades y del país.
- ▶ Fortalecer la generación de capital humano avanzado y en I+D+i en temáticas relacionadas a la minería del cobre y otros minerales estratégicos. Para ello, se podrán establecer convenios de colaboración con otros gobiernos e instituciones ya involucradas en la minería del cobre. En particular, es relevante mejorar el conocimiento de la minería del cobre por parte del personal de las instituciones estatales encargadas de la aprobación de los instrumentos técnico-mineros y ambientales, y de fiscalizar y controlar los proyectos y operaciones mineras.
- ▶ Mantener y robustecer las iniciativas del Estado relacionadas a la regularización de las actividades mineras informales y al control y eliminación de la minería ilícita y brindar apoyo para la seguridad física de los proyectos mineros PINE en las zonas rurales, a través de convenios de cooperación con la fuerza pública. Parte de este proceso requerirá asegurar el apoyo y la protección del Estado a los proyectos y operaciones mineras formales que cuenten con todos los requerimientos establecidos para su funcionamiento.

Preparación para la producción de cobre refinado:

- ▶ El Estado deberá establecer un marco regulatorio y normativo específico para la etapa de procesamiento y refinación de cobre (metalurgia del cobre), y otros productos minerales y subproductos. Dentro de la regulación deberá considerar aspectos técnico-económicos, ambientales y sociales. En particular, para el caso de las fundiciones y refinería es necesario establecer normas de emisión gaseosas específicas para el sector, considerando los estándares internacionales actualmente aceptados.
- ▶ Preparar capital humano avanzado específico relacionado a la metalurgia del cobre, tanto a nivel de técnicos como de profesionales. Las instituciones estatales deberán participar de este proceso para contar con las capacidades necesarias para la regulación y fiscalización del sector, pero también es importante desarrollar un proceso más generalizado para proveer de personal a la industria incipiente que se generará.

- ▶ El Estado deberá generar un proceso de prospectiva tecnológica y de mercado asociada a la producción de cobre refinado. Este proceso será clave para definir el momento de avanzar a la siguiente etapa de desarrollo en la cadena de valor de la industria, y para seleccionar las tecnologías asociadas al proceso de producción de cobre refinado. Esta tarea puede ser desarrollada por la Unidad de Planeación Minero Energético (UPME), entidad adscrita al Ministerio de Minas y Energía, siendo suficiente una revisión anual del estado del arte en la materia.



4.4

Conclusiones y recomendaciones

Con base en lo anterior, Colombia puede apalancar su rica geología y las capacidades tecnológicas y productivas acumuladas en las últimas décadas, asociadas tanto a su experiencia minera en sectores tales como petróleo, carbón y níquel, como a la producción de químicos, maquinaria y equipo eléctrico, para impulsar un desarrollo industrial moderno en torno a un significativo aumento de su producción primaria de cobre, y acompañar esto con mayores niveles de procesamiento a través de la construcción de una FURE de cobre o de la mejor tecnología que esté disponible al momento de contar con suficiente producción de cobre de mina (complejo metalúrgico).

Para lograr el objetivo de producir cobre refinado en el país, en este estudio se analizaron dos rutas de desarrollo de los eslabones que conforman la cadena de valor de la industria del cobre (incluyendo la producción de cobre refinado a partir de concentrados): un escenario de desarrollo secuencial y otro simultáneo (Figura 46 y Figura 47).

De acuerdo con el análisis realizado, y los antecedentes previamente recolectados, una primera conclusión de este estudio es que un complejo metalúrgico para la producción de cobre refinado presenta actualmente requisitos técnico-económicos mínimos para su desarrollo. Algunos de estos requisitos se detallan a continuación:

- ▶ Las tecnologías de procesamiento de concentrados de cobre por la vía hidrometalúrgica todavía no se encuentran en un estado de madurez suficiente para ser consideradas en un proyecto industrial a desarrollarse en el corto a mediano plazo (cinco a ocho años).
- ▶ Existen diversas alternativas tecnológicas para los procesos de fusión y conversión de una fundición de cobre, cada uno con ventajas y desventajas frente a sus competidores. No obstante, todas presentan desempeños operacionales y ambientales similares: recuperaciones metalúrgicas en torno a 98%; consumo energético en el rango de 3,5 a 4,0 MWh por TM de cobre fino producido (considerando el proceso de electro-refinación); captura de gases sobre 98,5%; entre otros. Por tanto, la elección de la tecnología debería estar principalmente asociada a sus desempeños y riesgos económicos. En esa línea, las tecnologías emergentes chinas y los hornos flash de Outotec son las que presentan menores costos operacionales y mayor nivel de soporte tecnológico, y las elegidas primariamente para los nuevos proyectos de fundición.

- ▶ La escala mínima viable de operación de una fundición está en torno a 350 mil a 400 mil TM de concentrados, o 100 mil TM de cobre fino contenido. Sin embargo, la mayoría de los proyectos desarrollados durante la última década han tenido capacidades de procesamiento de concentrado por sobre 700 mil y usualmente mayores a 1,2 millones TM de concentrados al año (producción de entre 200 mil a 350 mil TM de cobre fino contenido al año). Esto es consecuencia de las marcadas economías de escala en el costo de capital (Capex) y en los costos operacionales (Opex) de este eslabón productivo.
- ▶ La ubicación geográfica de las fundiciones y refinerías responde a una de dos alternativas: si están integradas a una operación minera usualmente se encuentran cercanas a ésta; y si no están integradas, usualmente se ubican en nodos logísticos cercanos a puertos por los requerimientos de transporte y agua, o cercanas a grandes centros de consumo (industria de semi manufacturas).

Por otro lado, el análisis FODA+PESTAL de los escenarios secuencial y simultáneo nos permite concluir lo siguiente:

- ▶ Existe un bajo nivel de conocimiento de los recursos minerales de cobre en Colombia, y la producción actual de cobre de mina del país no se condice con el potencial geológico-económico que se estima tiene éste.
- ▶ La actual producción de cobre de mina de Colombia no permitiría cubrir las necesidades internas de la economía colombiana. Tampoco permitiría desarrollar un complejo metalúrgico para la producción de cobre refinado, dados los requerimientos de escala comentados previamente.
- ▶ Desarrollar un complejo metalúrgico de fundición y refinería (FURE) de cobre en el corto plazo implicaría conseguir parte importante del abastecimiento de concentrados de cobre desde el exterior, en un mercado altamente competitivo y estratégico.
- ▶ En Colombia existe el potencial de recursos mineros para sustentar un nivel de producción de cobre de mina que permita abastecer con concentrados la capacidad de procesamiento de un complejo metalúrgico para la producción de cobre refinado, cubrir la demanda/consumo aparente de la economía del país, y generar excedentes para su comercialización al exterior.
- ▶ No obstante, el desarrollo de esta cadena de valor de la industria del cobre presenta mayores riesgos y dificultades si su desarrollo es acelerado e inorgánico. Por lo tanto, el escenario secuencial sería la mejor alternativa para avanzar en la producción de cobre refinado en Colombia.

Para lograr los objetivos últimos que motivan al Gobierno Nacional para la producción de cobre refinado en Colombia, se propusieron objetivos y líneas de acción concretas que pueden ser abordadas colaborativamente entre el Estado, las empresas y la sociedad civil.

Finalmente, se destaca que Colombia está en condiciones de definir una trayectoria de desarrollo de su minería que le permita transitar desde la explotación de carbón a impulsar una transformación productiva posicionándose como un actor relevante de minerales críticos para la transición energética, como cobre, desarrollando encadenamientos productivos agua arriba y aguas abajo e incorporando de forma creciente conocimiento e innovación nacional y local, y generando posibilidades de empleo de calidad para la población. Así, el desarrollo minero se transformará en una plataforma de (re)industrialización, desarrollo sostenible y responsable que va más allá de la minería.



Referencias

- Ackerman, J.B., Anderson, C.G., Nordwick, S.M., Krys, L.E. (1993). Hydrometallurgy at the Sunshine Mine Metallurgical Complex. In Proceedings of the AIMA Meeting "Hydrometallurgy: fundamentals, technology and innovations" (477-498). https://www.researchgate.net/publication/287997283_Hydrometallurgy_at_the_Sunshine_Mine_Metallurgical_Complex
- Agencia Nacional de Minería (2023). Minería en Colombia. Agencia Nacional de Minería. <https://mineriaencolombia.anm.gov.co/sites/default/files/2023-02/Ficha%20Colombia%2001%202023.pdf>
- Agnew, C.J., Welham, N.J. (2005). Oxidation of chalcopryrite by extended milling. International Journal of Mineral Processing, 77, 208-216. <https://doi.org/10.1016/j.minpro.2005.05.001>
- Ahmadi, A., Ranjbar, M., Schaffie, M. (2012a). Catalytic effect of pyrite on the leaching of chalcopryrite concentrates in chemical, biological and electrobiochemical systems. Minerals Engineering 34, 11-18. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2012.03.022>
- Ahmadi, A., Ranjbar, M., Schaffie, M. (2012b). Effect of Activated Carbon Addition on the Conventional and Electrochemical Bioleaching of Chalcopryrite Concentrates. Geomicrobiology Journal 30, 237-244. <https://doi.org/10.1080/01490451.2012.665152>
- Alexander, C., Johto, H., Lindgren, M., Pesonen, L., Roine, A. (2021). Comparison of environmental performance of modern copper smelting technologies. Cleaner Environmental Systems 3, 100052. <https://doi.org/10.1016/j.cesys.2021.100052>
- Anders, R. (2022). Copper discoveries – Declining trend continues. S&P Global Market Intelligence. <https://www.spglobal.com/marketintelligence/en/news-insights/research/copper-discoveries-declining-trend-continues>
- Anderson, C.G. (2003). Treatment of copper ores and concentrates with industrial nitrogen species catalysed pressure leaching and non-cyanide precious metals recovery. Journal of the Minerals, Metals & Materials Society 55, 32-36. <https://doi.org/10.1007/s11837-003-0085-z>
- Anderson, C.G. (2013). The optimization, design and economics of industrial NSC oxidative pressure leaching of complex sulphide concentrates. The International Journal of Engineering and Sciences 2, 1-16. <https://theijes.com/papers/v2-i11/Part.2/A02110201016.pdf> y https://www.researchgate.net/publication/288003733_The_Optimization_Design_and_Economics_of_Industrial_NSC_Oxidative_Pressure_Leaching_Of_Complex_Sulfide_Concentrates
- AngloGold Ashanti (2022). Mineral Resource and Mineral Reserve Report, as at December 2022. <https://reports.anglogoldashanti.com/22/wp-content/uploads/2023/05/AGA-RR22.pdf>
- Banco Mundial (2024). World Development Indicators. Washington, DC: Banco Mundial.
- Balaz, P., Achimovicova, M. (2006). Mechano-chemical leaching in hydrometallurgy of complex sulphides. Hydrometallurgy, 84, 60-68. <https://doi.org/10.1016/j.hydromet.2006.04.006>
- Batty, J.D., Rorke, G.V. (2006). Development and commercial demonstration of the BioCOP™ thermophile process. Hydrometallurgy, 83, 83-89. <https://doi.org/10.1016/j.hydromet.2006.03.049>
- Bernal, A., Husar, J., Bracht, J. (2023). Latin America's opportunity in critical minerals for the clean energy transition. International Energy Agency. <https://www.iea.org/commentaries/latin-america-s-opportunity-in-critical-minerals-for-the-clean-energy-transition>
- Brierley, C.L., Brierley, J.A. (2013). Progress in bioleaching: part B: applications of microbial process by the mineral industries. Applied Microbiology and Biotechnology 97, 7543-7552. <https://doi.org/10.1007/s00253-013-5095-3> y https://www.researchgate.net/publication/282083182_Progress_in_bioleaching_Part_B_Applications_of_microbial_processes_by_the_minerals_industries
- Caro, C. (2018). Pressure oxidation at Freeport McMoRan. Presentation at Hydrometallurgy of Copper Concentrates: Opportunities and Complexities, Santiago, Chile.
- Carranza, J. E. et al. (2018). "La industria colombiana en el siglo XXI", Ensayos sobre Política Económica (ESPE), núm. 87, noviembre, DOI: 10.32468/espe.87. <http://investiga.banrep.gov.co/es/espe>

- Cochilco (2015). Tecnologías en fundiciones de cobre. Comisión Chilena del Cobre. https://www.cochilco.cl/Listado%20Temtico/Tecnologias_fundiciones_v1.pdf
- Cochilco (2022d) “Demanda de cobre a partir de la transición energética” - DEPP 06/2022. <https://www.cochilco.cl/Mercado%20de%20Metales/Demanda%20de%20cobre%20a%20partir%20de%20la%20transicion%20energetica.pdf>
- Cochilco (2022a). Anuario de Estadísticas del Cobre y Otros Minerales 2002-2021. Comisión Chilena del Cobre. <https://www.cochilco.cl/Lists/Anuario/Attachments/25/Ae2021final.pdf>
- Cochilco (2022b). Informe de actualización del consumo energético de la minería del cobre al año 2021. <https://www.cochilco.cl/Mercado%20de%20Metales/Informe%20de%20Consumo%20de%20Energ%C3%ADa%20al%202021%20Final.pdf>
- Cochilco. (2022c). Informe mercado de fundiciones, Actualización 2022. Comisión Chilena del Cobre, Santiago. <https://www.cochilco.cl/Mercado%20de%20Metales/Informe%20Fundiciones%202022%20Versi%C3%B3n%20Final%20RPI.pdf>
- Defreyne, J., Cabral, T. (2009). Early copper production results from Vale’s hydrometallurgical CESL refinery. In Proceedings of ALTA 2009 Copper 13, 298-309. <https://www.teck.com/media/CESL-Publication-Copper-Vale-Metallurgical-Results-ALTA-2009.pdf>
- Dixon, D. G., Baxter, K. G., & Sylwestrzak, L. A. (2007). Galvanox™ treatment of copper concentrates. In Proceedings of ALTA 2007 Copper 11, 57-76.
- Dixon, D. G., Mayne, D. D., & Baxter, K. G. (2008). Galvanox™ - A novel galvanically assisted atmospheric leaching technology for copper concentrates. Canadian Metallurgical Quarterly 47, 327-336. <https://doi.org/10.1179/cmqr.2008.47.3.327> y https://www.researchgate.net/publication/233505985_Galvanox_-_A_novel_galvanically-assisted_atmospheric_leaching_technology_for_copper_concentrates
- Dong, T., Hua, Y., Zhang, Q., Zhou, D. (2009). Leaching of chalcopyrite with Brønsted acidic ionic liquid. Hydrometallurgy 99, 33-38. <https://doi.org/10.1016/j.hydromet.2009.06.001>
- Dreisinger, D. (2006). Copper leaching from primary sulphides: Options for biological and chemical extraction of copper. Hydrometallurgy 83, 10-20. <https://doi.org/10.1016/j.hydromet.2006.03.032> y https://www.researchgate.net/publication/222566711_Copper_leaching_from_primary_sulfides_Options_for_biological_and_chemical_extraction_of_copper
- Dufey, A. et al. (2023) “Bases para impulsar una minería sostenible y responsable: Una ventana para dar un salto de prosperidad en el s. XXI - El caso de Colombia” Banco Interamericano de Desarrollo (BID) <http://dx.doi.org/10.18235/0005024>
- Errington, W.J., Edwards, J.S., Hawkins, P. (1997). Isasmelt technology-current status and future development. Journal of the South African Institute of Mining and Metallurgy 97, 161-167. <https://www.saimm.co.za/Journal/v097n04p161.pdf>
- Estay, H. (2019). Apuntes Curso MI4100 - Fundamentos de metalurgia extractiva (Hidrometalurgia). Departamento de Ingeniería de Minas, FCFM, Universidad de Chile.
- Everett, P.K. (1995). Status of the Intec process for copper concentrates. In Proceedings of ALTA 1995 Copper 1, 95-108.
- Everett, P.K. (1996). The Intec copper process low cost treatment of chalcopyrite. In Proceedings of ALTA 1996 Copper 2, 363-388.
- Gilbertson, B.P. (2000). Creating value through innovation: biotechnology in mining. Transactions of the Institution of Mining and Metallurgy, Section C, 109, 61-67. <https://doi.org/10.1179/mpm.2000.109.2.61>
- Harris, P. (2021). Colombia’s real copper potential. Mining Journal. <https://www.mining-journal.com/base-metals/news/4067631/colombias-real-copper-potential>
- Harris, P. (2023). Colombia: great potential, great challenges. Mining Journal. <https://www.mining-journal.com/latin-america/news-analysis/4143633/colombia-great-potential-great-challenges>
- Hourn, M., Rohner, P., Bartsch, P., Ngoviky, K. (2005). Benefits of using the Albion process for a North Queensland project, and a case study of capital and operating cost benefits versus bacterial oxidation and pressure oxidation. <http://www.albionprocess.com/en/downloads/TechnicalPapers/Benefits-of-Using-the-Albion-Process-for-a-North-Queensland-Project-Randoll-2006-%283%29.pdf>

- Hourn, M., Turner, D. (2012). Commercialisation of the Albion process. In Proceedings of ALTA 2012 Gold Conference, 231-248. [https://www.glencoretechnology.com/rest/api/v1/documents/d666da87329a538a4ad848818e263b6e/Albion-Process-Update-Alta-2012-\(3\).pdf](https://www.glencoretechnology.com/rest/api/v1/documents/d666da87329a538a4ad848818e263b6e/Albion-Process-Update-Alta-2012-(3).pdf)
- ICSG (2023). World Copper Factbook 2022. International Copper Study Group, Lisboa. <https://icsg.org/copper-factbook/>
- IWCC (2023). IWCC Statistics and Data Series. International Wrought Copper Council, Londres. <https://www.coppercouncil.org/iwcc-statistics-and-data>
- Jara, J.J. (2019). Industria de fundición/refinería de concentrados de cobre en Chile: Algunas ideas para la discusión. Centro de Estudios del Cobre y la Minería.
- Jara, J.J. (2022). Apuntes curso IMM1003 - Introducción a la minería. Departamento de Ingeniería de Minería UC, Escuela de Ingeniería, Pontificia Universidad Católica de Chile.
- Johnson, G. (1995). The Activox® process for treatment of copper concentrates. In Proceedings of ALTA 1995 Copper 1, 73-79.
- Lagos, G., Peters, D., Salas, J. C., Parra, R., Pérez, V. (2021). Análisis económico de las cadenas globales de valor y suministro del cobre refinado en países de América Latina. Comisión Económica para América Latina y El Caribe. https://repositorio.cepal.org/bitstream/handle/11362/47451/S2100583_es.pdf?sequence=1&isAllowed=y
- Lightfoot, C. (2007). The BioCOP™ process. Chalcopyrite leaching Short Course, Copper 2007.
- Ma, H., Jiao, K., Wang, C., Zhang, J., Zong, Y., Guo, Z., Zhang, J. (2021). Investigation of Formation and Shedding Behavior of Slag Crust in a Large Blast Furnace with Copper Stave: Flow Properties and Crystallization Characteristics. Journal of Sustainable Metallurgy 7, 506-518. <https://doi.org/10.1007/s40831-021-00355-1>
- Marsden, J. O. (2008). Energy efficiency and copper hydrometallurgy. In C. A. Young, P. R. Taylor, C. G. Anderson, & Y. Choi (Eds.), Proceedings of Hydrometallurgy 2008, 29-40. Littleton, Colorado, USA: Society for Mining, Metallurgy, and Exploration. <http://metallurgium.com/pdf/JOM%20Energy%20Hydromet%202008%20rev5.pdf>
- Marsden, J.O., Brewer, R.E. (2003). Hydrometallurgical processing of copper concentrates by Phelps Dodge at the Bagdad Mine in Arizona. In Proceedings of ALTA 2003. Copper 8, 180-196.
- Marsden, J.O., Wilmot, J.C., Mathern, D.R. (2007). Medium-temperature pressure leaching of copper concentrates - Part III: Commercial demonstration at Bagdad, Arizona. Minerals & Metallurgical Processing 24, 218-225. <https://doi.org/10.1007/BF03403370>
- Mayhew, K., McCoy, T., Mean, R., Woeller, J. (2013). Teck's CESL copper process: A commercial ready concentrate leach alternative. <https://www.teck.com/media/CESL-Publication-Copper-teck-cesl-process.pdf>
- METS Ignited (2019). Sector Demographics Report. METS Ignited. <https://metsignited.org/publications/>
- Metso (2019). Detailed OPEX comparison of modern copper smelting technologies using HSC-SIM. <https://www.metso.com/insights/blog/mining-and-metals/detailed-opex-comparison-of-modern-copper-smelting-technologies-using-hsc-sim/>
- Mining.com (2020). Mine closure impact on global copper supply – report. Mining.com. <https://www.mining.com/mine-closures-pose-risk-to-global-copper-supply-report/>
- Mousavi, S. M., Yaghmaei, S., Vossoughi, M., Jafari, A. (2007). Efficiency of copper bioleaching of two mesophilic and thermophilic bacteria isolated from chalcopyrite concentrate of Kerman-Yazd regions in Iran. Scientia Iranica, 14, 180-184.
- Nel, G.J., Van der Berg, D.A. (2009). Novel design aspects of the Tati Activox® project ammonia recovery circuit. In Proceedings of the Fifth Base Metals Conference 2009, 201-214. Kasane, Botswana: The Southern African Institute of Mining and Metallurgy. https://www.saimm.co.za/Conferences/BM2009/201-214_Nel.pdf
- Nieponice, G., Costa, A., Chia, X. (2018). Copper exploration's more challenging than ever - but savvy strategies can help. Mining Journal. <https://www.mining-journal.com/research/news/1341083/copper-exploration%E2%80%99s-more-challenging-than-ever-%E2%80%93-but-savvy-strategies-can-help>
- Norgate, T., Jahanshahi, S. (2010). Low grade ores - Smelt, Leach or concentrate? Minerals Engineering, 23, 65-73. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2009.10.002>
- Onisei, S., Badilita, V., Stoiciu, F., Velea, T., Predica, V., Lupu, C., Butu, M., Moldovan, P. (2012). Mechanochemical activation of copper concentrate and the effect on oxidation of metal sulphides. Revista de Chimie, 63 (6), 591-597. <http://bch.ro/pdfRC/ONISEI%20S.pdf%206%2012.pdf>

- Palmer, C.M., Johnson, G.D. (2005). The Activox® process: Growing significance in the nickel industry. *Journal of the Minerals, Metals & Materials Society* 57, 40-47. <https://doi.org/10.1007/s11837-005-0251-6>
- Parra, R., Salas, J.C. (2018). Draft of Smelting and Hydrometallurgy Treatment for Copper Sulphide Ores and Concentrates: Technologies, Challenges, and Trends. International Copper Study Group. https://icsg.org/wp-content/uploads/2021/07/Brochure-Purchase-Order-Copper-Smelting-Technology-and-Sulphide-Treatment-March-2019_.pdf
- Peacey, J., Xian-jian, G., Robles, E. (2004). Copper hydrometallurgy - current status, preliminary economics, future direction and positioning versus smelting. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China* 14, 560-568. https://www.researchgate.net/publication/279896188_Copper_hydrometallurgy_-_Current_status_preliminary_economics_future_direction_and_positioning_vs_smelting
- Rhodes, M., Deeplaul, V., Van Staden, P.J. (1998). Bacterial oxidation of Mt Lyell concentrates. In *Proceedings of ALTA 1998 Copper 4*, 521-546.
- Roberts, M.S., Stevens, D.L. (2015). Caribou Dome Copper Project Clearwater Mountains South-Central Alaska, USA. Saravia, E. (2019). Estudio de competitividad de la industria de fundiciones de cobre. Universidad de Concepción. <http://repositorio.udec.cl/jspui/handle/11594/321>
- Schlesinger, M., Sole, K., Davenport, W., Alvear-Flores, G. (2021). *Extractive Metallurgy of Copper*, Sixth Edition. Elsevier. <https://doi.org/10.1016/C2019-0-03265-7>
- Stieper, G. (2018). First chalcopyrite copper concentrate leaching using Albion Process™ Technology. Presentation at 10th International Seminar on Process Hydrometallurgy Hydroprocess 2018, Santiago, Chile. https://www.google.cl/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=&cad=rja&uact=8&ved=2ahUKewj7pc_uoef_AhU-HbkGHcF7AxQQFnoECBEQAQ&url=https%3A%2F%2Fwww.glencoretechnology.com%2Frest%2Fapi%2Fv1%2Fdocuments%2F8af4f5d6618c5357a84ae0b588979445%2FHydroprocess%2BGlencore%2BTechnology%2B2018%2B-%2BPreso.pdf%3Fdownload%3Dtrue&usq=AovVaw2Le6Zzclo31XqJ5xnFgW3W&opi=89978449
- S&P (varios años). *World Exploration Trends*. S&P Global Market Intelligence. <https://www.spglobal.com/marketintelligence/es/metals-mining>
- UdeC (2020). Green Copper: Tecnología para el procesamiento de concentrados de cobre cero emisiones usando hidrógeno verde. <https://fi.udec.cl/wp-content/uploads/2020/10/Proyecto-GREEN.pdf>
- UNCTAD (2023) "Technology and Innovation Report 2023 - Opening Green Windows, Technological opportunities for a low -carbon world", UNCTAD/TIR/2022. https://unctad.org/system/files/official-document/tir2022_en.pdf
- Urzúa, O. (por publicarse) "Cadenas de Valor de la Minería Chilena Procesos de Innovación y Fortalecimiento Productivo - Capacidades y condiciones habilitantes para la creación y retención de valor en el sector minero-metalúrgico chileno impulsando un desarrollo sostenible en el S.XXI.
- USGS (2015). Assessment of undiscovered copper resources of the world. U.S. Geological Survey, Virginia. <https://doi.org/10.3133/sir20185160>
- Van Staden, P. J. (2008). Heap leach research at Mintek. In *Proceedings of ALTA 2008 Copper 12*, 191-203. https://www.researchgate.net/publication/317957130_Heap_Leach_Research_at_Mintek
- Videla, A. (2019). Apuntes curso IMM1003 - Introducción a la minería. Departamento de Ingeniería de Minería UC, Escuela de Ingeniería, Pontificia Universidad Católica de Chile.
- Voisin, L. (2018). Apuntes curso MI3130 - Minería 2018. Departamento de Ingeniería de Minas, FCFM, Universidad de Chile.
- Voisin, L. (2019). Apuntes curso MI4100 - Fundamentos de metalurgia extractiva (Pirometalurgia). Departamento de Ingeniería de Minas, FCFM, Universidad de Chile.
- Wang, Q., Guo, X., Tian, Q., Jiang, T., Chen, M., Zhao, B. (2017). Development and application of SKSSIM simulation software for the oxygen Bottom Blown copper Smelting process. *Metals* 7, 431. <https://doi.org/10.3390/met7100431>
- Watling, H.R. (2013). Chalcopyrite hydrometallurgy at atmospheric pressure: 1. Review of acidic sulfate, sulfate-chloride and sulfate-nitrate process options. *Hydrometallurgy*, 140, 163-180. <https://doi.org/10.1016/j.hydromet.2013.09.013>
- Watling, H.R. (2014). Chalcopyrite hydrometallurgy at atmospheric pressure: 2. Review of acidic chloride process options. *Hydrometallurgy*, 146, 96-110. <https://doi.org/10.1016/j.hydromet.2014.03.013>
- Whitehead, J.A., Zhang, J., Pereira, N., McCluskey, A., Lawrance, G.A. (2007). Application of 1-alkyl-3-methyl-imidazolium ionic liquids in the oxidative leaching of sulphidic copper, gold and silver ores. *Hydrometallurgy* 88, 109-120. <https://doi.org/10.1016/j.hydromet.2007.03.009>

