



Universidad de Concepción

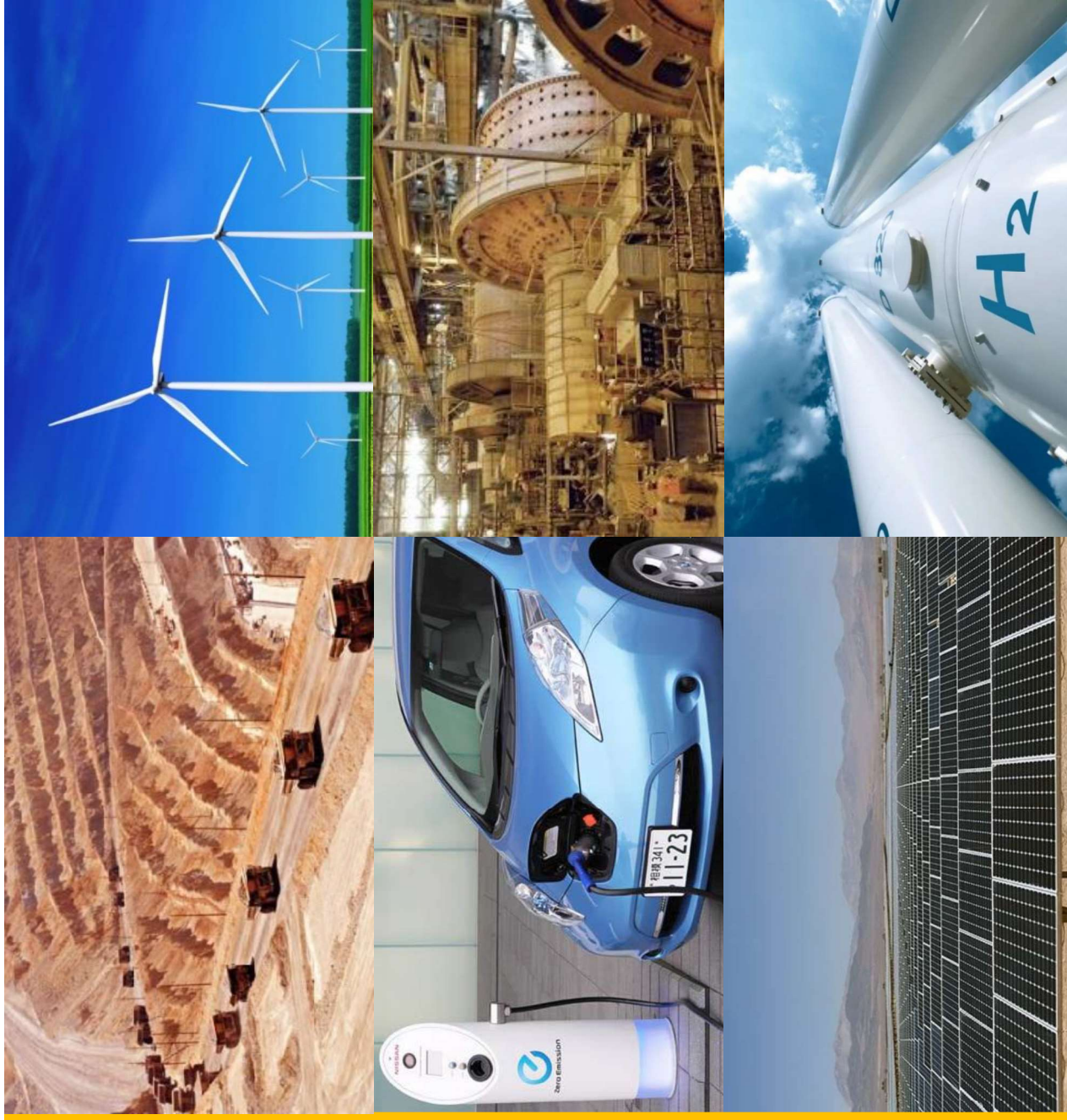
Presentación a la Comisión de Medio Ambiente de la Cámara de Diputados

**Procesamiento de concentrados de cobre
sin emisiones y sin residuos: un nuevo
paradigma basado en el hidrógeno verde**

Dra. Marcela Angulo González
Universidad de Concepción

Junio 2024

Todos los derechos reservados — Universidad de Concepción

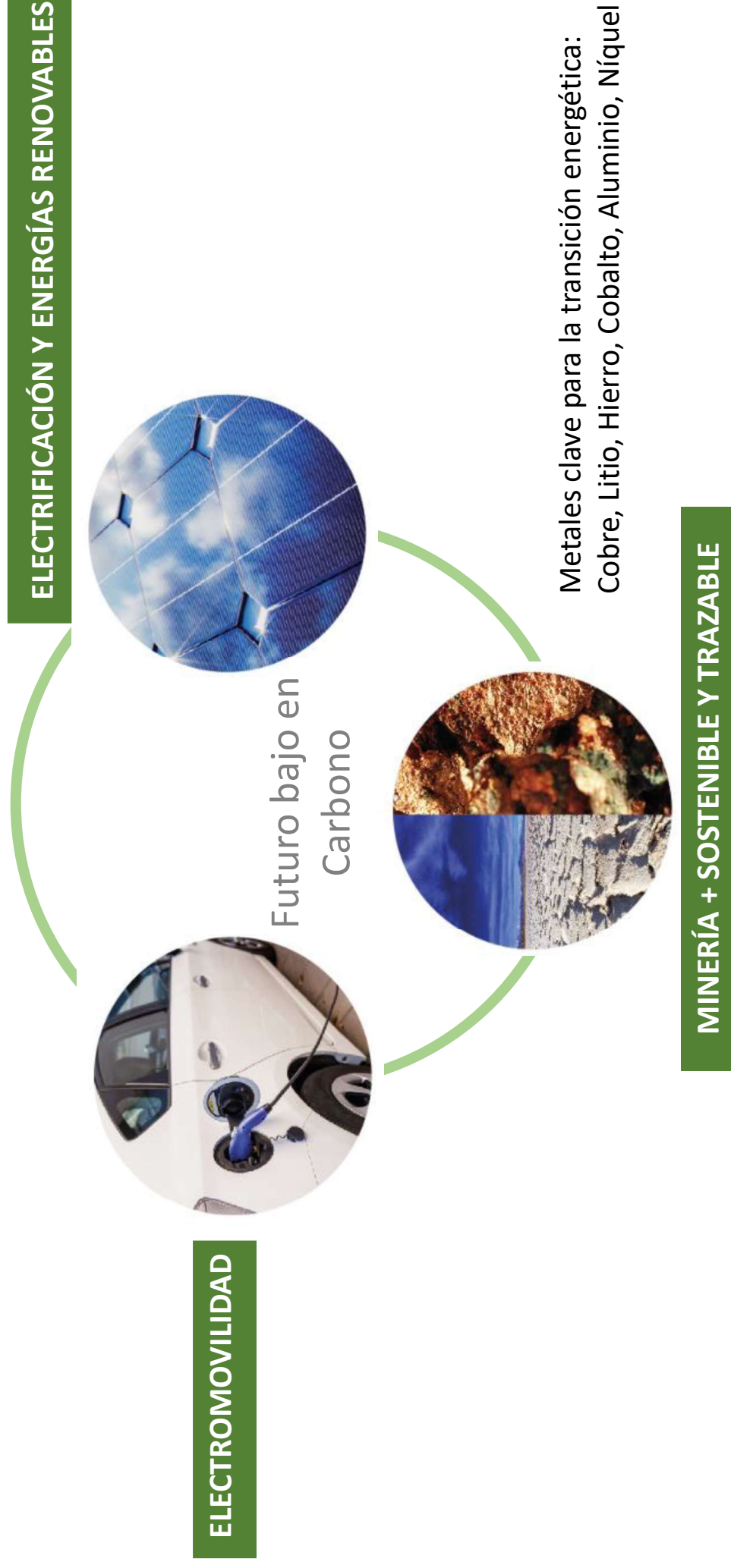




Universidad de Concepción

CAMBIO CLIMÁTICO Y TRANSICIÓN ENERGÉTICA

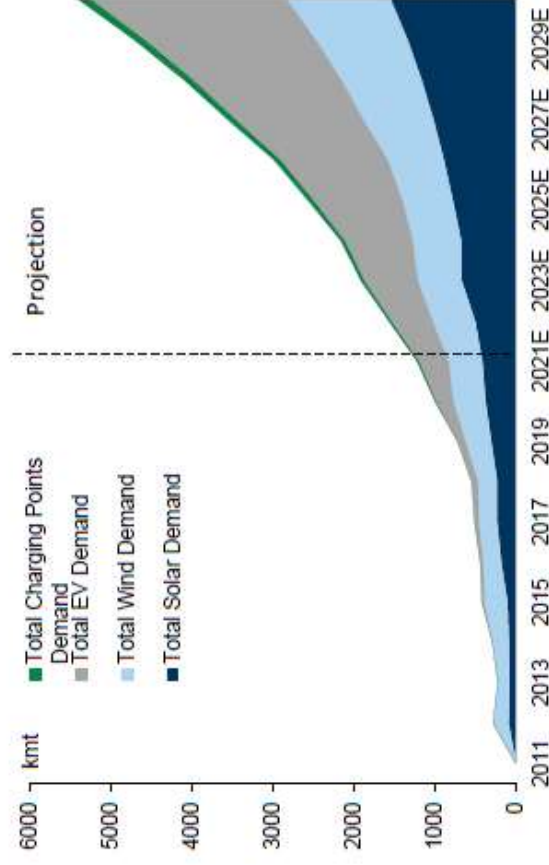
EL ROL DE LA MINERÍA





DEMANDA DE “COBRE VERDE” - UNA OPORTUNIDAD PARA CHILE

Copper demand, per year, from green sectors



Source: Goldman Sachs Global Investment Research

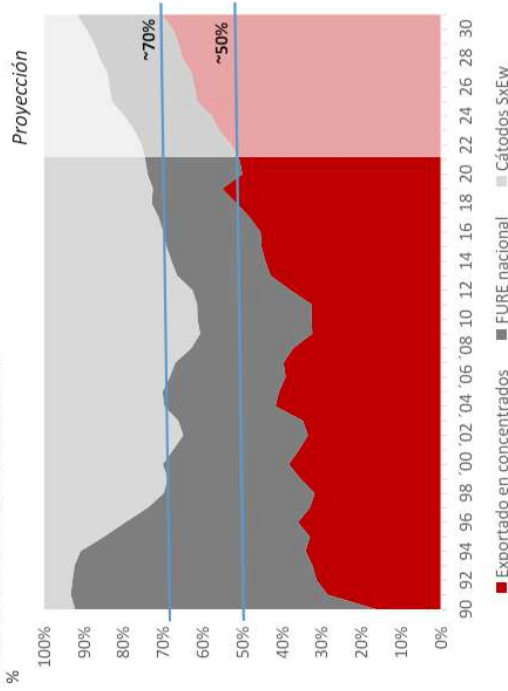
Total copper demand by sector and scenario 2020-2040
IEA, May 2021

- Escenarios de **demanda de “cobre verde”** o de baja emisión (para las industrias de energías renovables, electrificación y electromovilidad), según niveles de adopción de las tecnologías, en el rango:
 - **5,4 - 8,7 Mt de Cu al 2030**, (Goldman Sachs, Abril 2021)
 - **8 a 10 Mt de Cu al 2030**, y **9 a 15 Mt de Cu al 2040** (IEA, Mayo 2021).
- El “cobre verde” pasaría de ser una proporción del mercado total de cobre, del 3% actual a un **16% en 2030** (Goldman Sachs, 2021) y a un **45% en 2040** (IEA, 2021).
- Chile tiene ventajas comparativas asociadas a energías renovables e hidrógeno verde que le permitirían **liderar la transformación de la industria**.



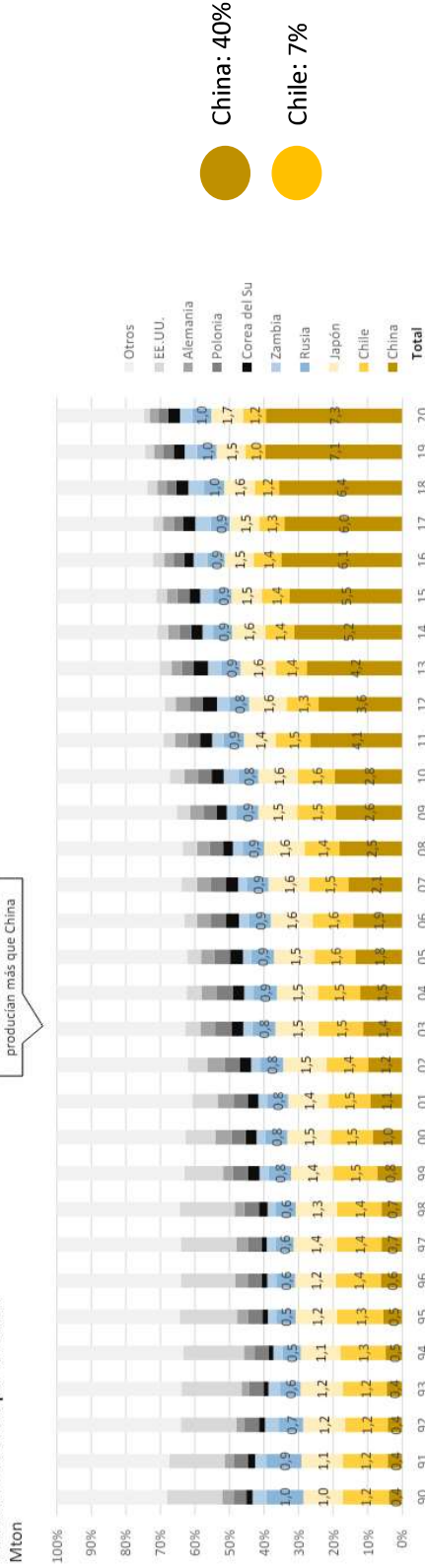
CADENA DE VALOR DEL COBRE Y SITUACIÓN ACTUAL

Producción de cobre en Chile por producto



- En Chile solo cerca de 1/3 de los concentrados se procesan localmente en fundiciones y refinерías.
- Chile mantiene cerca del 7% del mercado (redujo del 13% al 7%).
- China ha aumentado su capacidad, llegando a tener el 40% del mercado de fundición (en una década pasó del 20% al 40%).
- Si no hay nueva capacidad de fundición, se proyecta que al 2030 **el 70% del cobre producido será exportado como concentrado**.

Producción de cobre por fundición



Fuente: Reporte Fundición y Refinación. Cochilco, 2021.



CADENA DE VALOR DEL COBRE Y SITUACIÓN ACTUAL

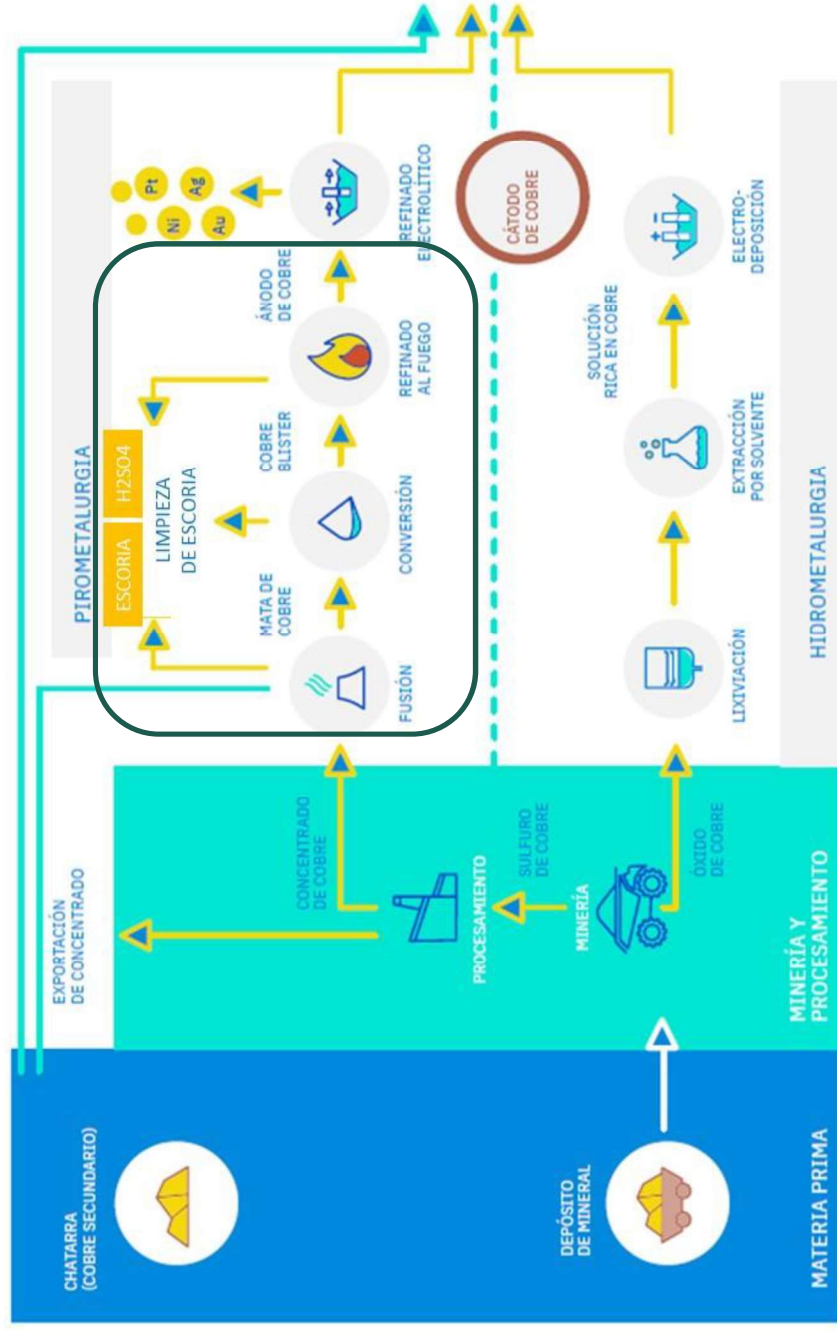


- Chile tiene plantas antiguas de baja eficiencia y desempeño ambiental, las que enfrentan **crecientes exigencias ambientales** (norma de emisión Fundiciones).
- Por su parte, las mineras que exportan los concentrados de cobre para fundir en el extranjero enfrentan:
 - **penalidades debido a impurezas** como el arsénico u otros contaminantes,
 - **crecientes exigencias ambientales** del transporte marítimo.
 - Presión de los mercados y la sociedad por la **huella de carbono** del proceso y transporte.
- Fundiciones y refinерías extranjeras **recuperan gran cantidad de metales de valor**, lo que las hace más competitivas (*mejor cash margin*).
- Sobre capacidad instalada en Asia ha hecho caer los cargos por tratamiento, concentrando en ese continente la producción de cobre refinado, con **importantes implicancias geopolíticas**.



PIROMETALURGIA DE COBRE CONVENCIONAL

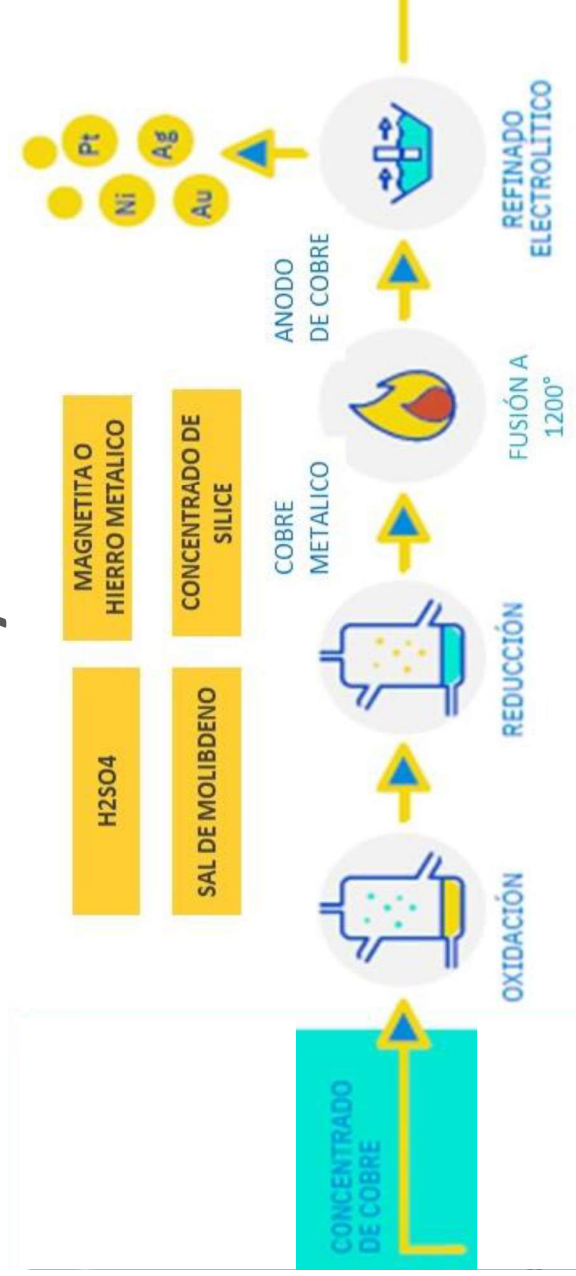
- El proceso convencional de fusión/conversión ha tenido importantes avances en la **captura de SO₂**, pero aun quedan emisiones fugitivas.
- Los temas de contenido de **arsénico** siguen siendo una preocupación.
- Las tecnologías más modernas aun **generan 0.8 a 1.2 toneladas de escoria** por tonelada de cobre blister generado, debiendo generarse procesos de re-procesamiento para recuperar minerales y asegurar su disposición final (en Chile sólo se disponen en escoriales).



Fuente: adaptado de Estructura de la industria del cobre en Europa. European Copper Institute, 2016.

NUEVO PARADIGMA EN PROCESAMIENTO DE CONCENTRADOS DE COBRE

sin emisiones y sin escorias



Desarrollo tecnológico liderado por la Universidad de Concepción por más de 10 años.

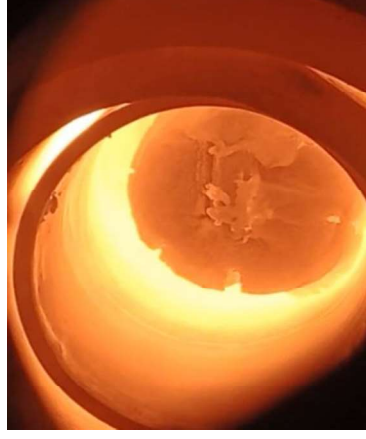
Patente concedida en Chile, México, China, Japón, Corea, Indonesia y Perú a la fecha.
En trámite en Europa, USA, Canada, RDC.



AVANCES A NIVEL SEMI-PILOTO (TRL 5)

Tostación oxidante.

- Pruebas extendidas para determinar la influencia de la temperatura y el tiempo de residencia en la captura de azufre.
- Comportamiento de elementos menores como As y Mo.
- Operación continua de 36 y 48 horas con diferentes tipos de concentrado.



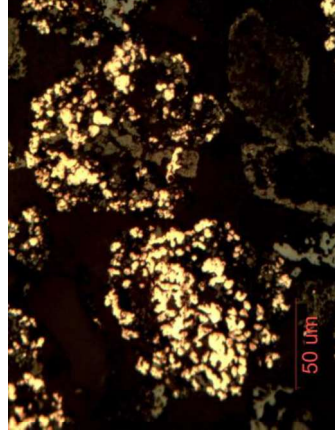
Reducción con hidrógeno.

- Pruebas para determinar las mejores condiciones operativas con operación continua de un reactor de lecho fluidizado para reducción.
- Evaluación del impacto de la temperatura operativa en la volatilización del As restante en la calcinación oxidada.



Circuito de separación.

- Validación de la recuperación de metales preciosos en Cu fundido.
- Pruebas iniciales de separación magnética.





Universidad de Concepción

EQUIPO DE PROYECTO

Investigadores principales del equipo de Metalurgia Química + Especialistas de Mercado y Gestión Tecnológica



Igor Wilkomirsky F.

Ingeniero Civil Químico
M.Sc. Ing. Metalúrgica, Colorado
School of Mines, USA
Ph.D. Ing. Metalúrgica, U. de
British Columbia, Canadá



Roberto Parra

Ingeniero Civil Metalúrgico UdeC
Dr. en Ingeniería y Ciencia de
Materiales, Institut Polytechnic
de Grenoble, Francia



Eduardo Balladares V.

Ingeniero Civil
Metalúrgico UdeC
Doctor en Ingeniería
Metalúrgica, Universidad
de Concepción



Fernando Parada L.

Ingeniero Civil Metalúrgico
Universidad de Concepción



Marcela Angulo G.

Ingeniera Civil, Dra. en
Ciencias Ambientales
Directora UdeC - Santiago

Equipo de trabajo Laboratorio-Planta Piloto



Hugo Rojas

Ingeniero Metalúrgico
Jefe Planta Piloto



Gonzalo Reyes

Doctor en Ing. Metalúrgica
Supervisor de procesos



Camila Mora

Doctora en Ing. Química
Supervisora de procesos



Maximiliano Roa

Doctor © en Ing. Metalúrgica
Supervisor de procesos

- Adicionalmente un equipo de 14 ingenieros/as, estudiantes de magister y memoristas de ingeniería metalúrgica



NUEVO PARADIGMA EN PROCESAMIENTO DE CONCENTRADOS DE COBRE

- 1 El nuevo proceso es una **tecnología disruptiva de oxidación-reducción** que opera en fase sólido/gas a 800-850°C en reactores cerrados, evitando el manejo de fases fundidas, **sin emisiones fugitivas de SO₂**.
- 2 Logra un **aprovechamiento completo del concentrado**, recupera el molibdeno y genera otros productos comerciales como magnetita/hierro metálico/ferroaleaciones y concentrado de sílice/productos cementicios, **sin generación de escorias**. También se contienen en el ánodo los metales de alto valor (oro, plata, otros) que se recuperan en la refinación.
- 3 Consume un **50% menos de energía** que un proceso convencional, **elimina los combustibles fósiles** y usa **hidrógeno verde** en la etapa de reducción, logrando **huella de carbono virtualmente cero** y un crédito por generación de excedente de energía limpia (1,3xconsumo estimativamente). Ofrece trazabilidad de la huella de carbono hasta el cátodo
- 4 Puede operar en escala más pequeña, **no tiene las economías de escala de la tecnología tradicional**, lo que permite procesar concentrados “localmente”, cerca de la mina/planta, con lo que:
 - genera sinergias con la planta concentradora, pudiendo mejorar la recuperación de cobre y molibdeno, reducir el consumo de agua y energía.
 - genera ácido sulfúrico para procesar minerales secundarios o de baja ley en el mismo yacimiento
 - ofrece una oportunidad de procesamiento también para la pequeña y mediana minería
- 5 Aplica un enfoque perfecto de economía circular en minería, pudiendo generar **polos de procesamiento polimetálicos, con alto valor agregado y altos estándares de sostenibilidad**.



ESTIMACIÓN DE REDUCCIÓN DE EMISIONES DE CO2



Comparación con una fundición con tecnología moderna en Chile, alimentada con electricidad con contrato 100% renovable.

- La tecnología cero emisiones y cero escorias evitaría alrededor de 0,45 tCO₂eq/ton Cu producida.
- Para una planta de 1.000 kton/año, se evitarían **3,3 millones de toneladas de CO₂** en la vida útil de 25 años.



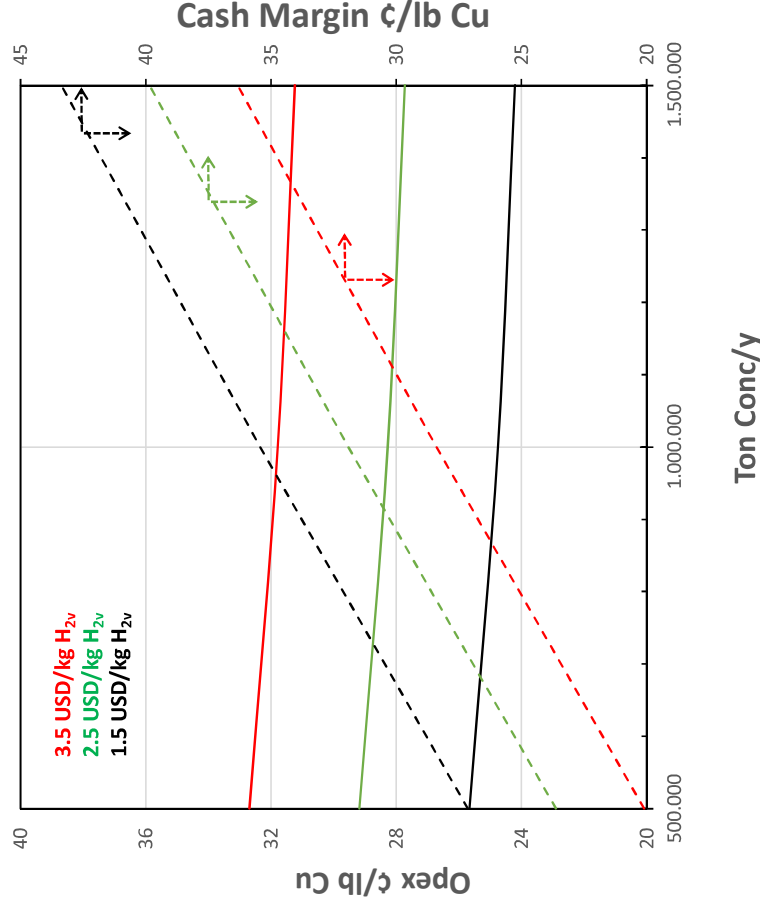
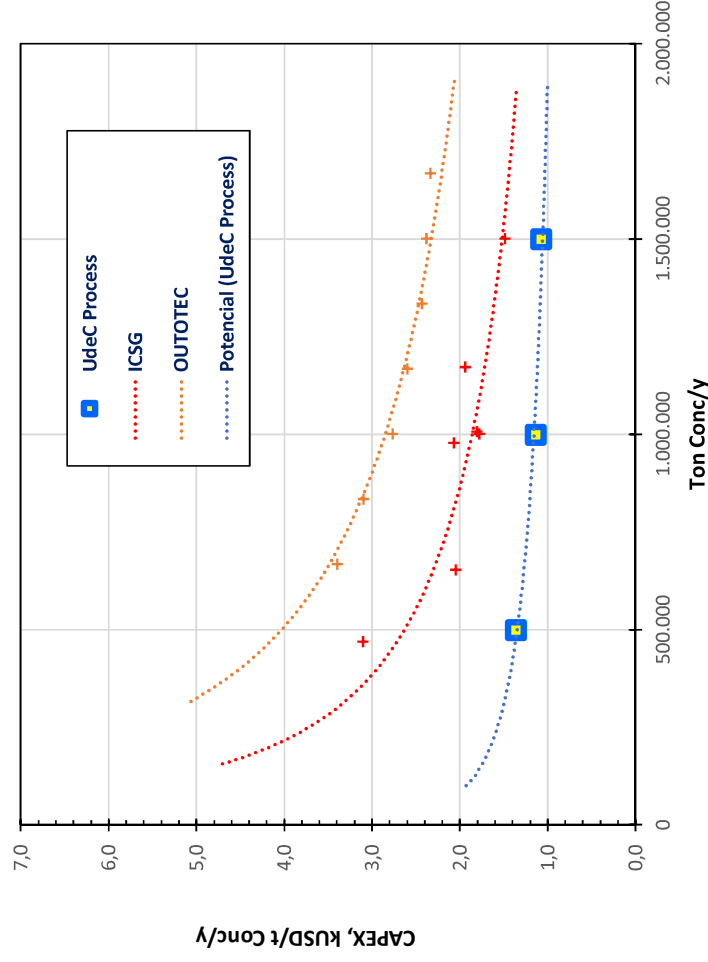
Comparación con transporte terrestre de concentrados y fundición en China, alimentada por la matriz energética actual.

- La tecnología de cero emisiones y cero escorias evitaría alrededor de 1,2 tCO₂eq/ton Cu producida.
- Para una planta de 1.000 kton/año, se evitarían **8,9 millones de toneladas de CO₂** en la vida útil de 25 años.



PROYECCIONES DE CAPEX Y OPEX

Estimación preliminar de CapEx, OpEx y Cash Margin*



*Evaluación para proceso con producción de magnetita (premium Calidad y “verde”)
No incluye los beneficios por la reducción de la huella de carbono o la eliminación de escorias y su manejo/disposición final.



CASH MARGIN FUNDICIONES VS TECNOLOGÍA UDEC

Cash margin (c/lb Cu)	Year	2020	2021	2022	2023	W. avg
Country						
China		33,0	43,2	44,6	37,4	39,8
Indonesia		27,1	39,5	59,5	30,0	38,9
Mexico		28,9	43,0	48,1	34,8	38,8
Finland		19,1	36,5	56,1	36,7	36,6
South Africa					33,6	33,6
Spain		25,9	27,7	34,0	31,4	29,6
Japan		18,7	34,1	33,1	22,3	26,9
Peru		17,8	19,9	41,4	23,8	25,9
Republic Of Korea		22,1	24,1	24,6	18,2	22,2
Serbia		10,5	25,3	-0,8	31,4	20,5
Bulgaria		19,2	17,3	16,0	23,8	19,0
Germany		15,2	26,0	9,8	22,7	18,9
India		2,8	32,1	23,2	11,4	18,7
Sweden		29,9	18,7	13,8	11,9	18,4
Zambia		4,8	17,1	18,1	18,1	14,8
Chile		3,7	10,6	29,7	12,5	13,8
Australia		6,2	14,0	12,6	12,8	11,4
USA		4,9	7,8	15,8	10,4	10,0
Poland		13,9	14,5	0,4	10,3	9,7
Philippines		4,1	15,3	3,0	-0,4	5,2
Canada		7,3	3,4	-4,8	11,8	5,2
Brazil		16,8	-3,3	-56,5	6,9	3,1
Namibia		37,6	-26,8	-26,7	-10,1	-3,6
W. avg		21,8	31,3	33,9	26,7	28,5

Para una planta de 1 millón ton Cu Con/año

- Cash margin: 27 - 33 cUSD/lbCu (para precio del H2v de 3,5 y 2,5 USD/kg, respectivamente)

Para una planta de 1,5 millón ton Cu Con/año

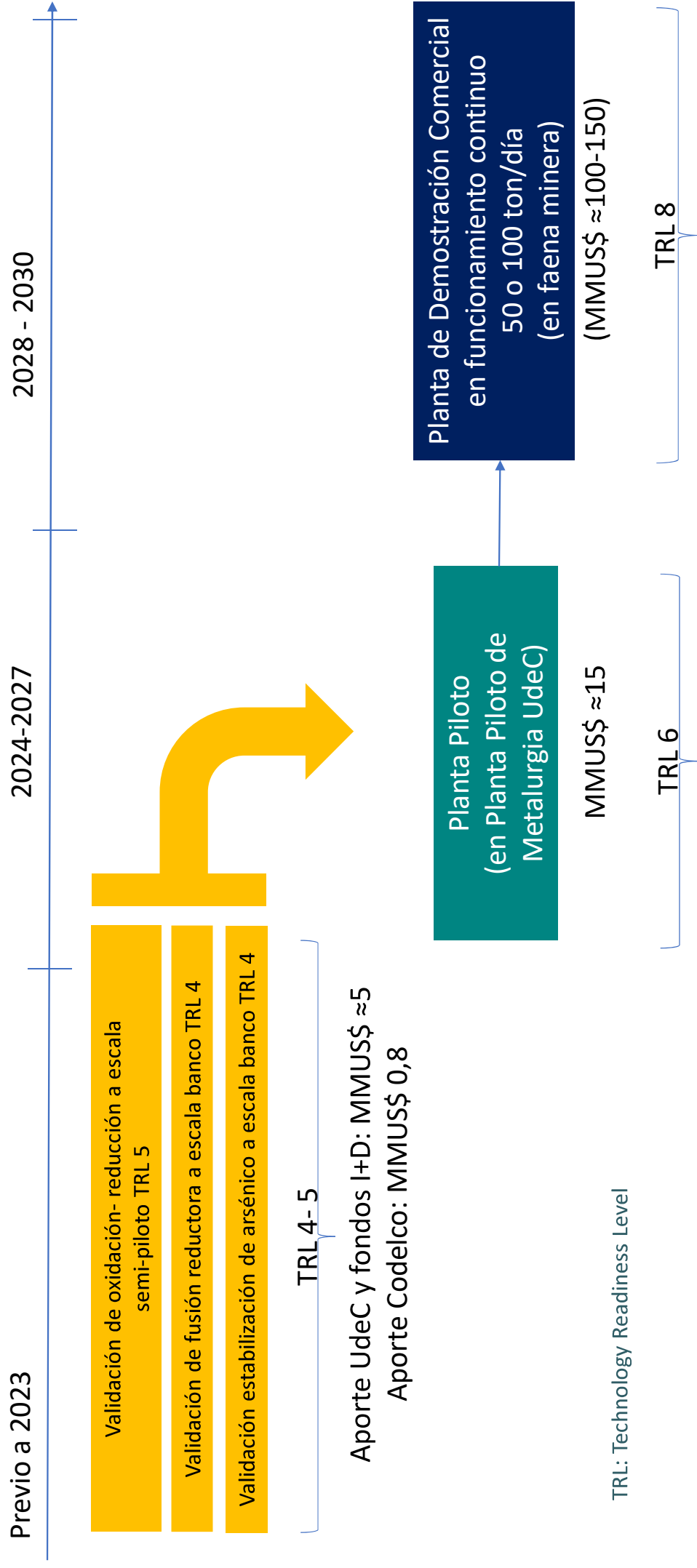
- Cash margin: 32 - 40 cUSD/lbCu (para precio del H2v de 3,5 y 2,5 USD/kg, respectivamente)

*Se deben agregar los beneficios por la reducción de la huella de carbono y por la eliminación de escorias y su manejo/disposición final.



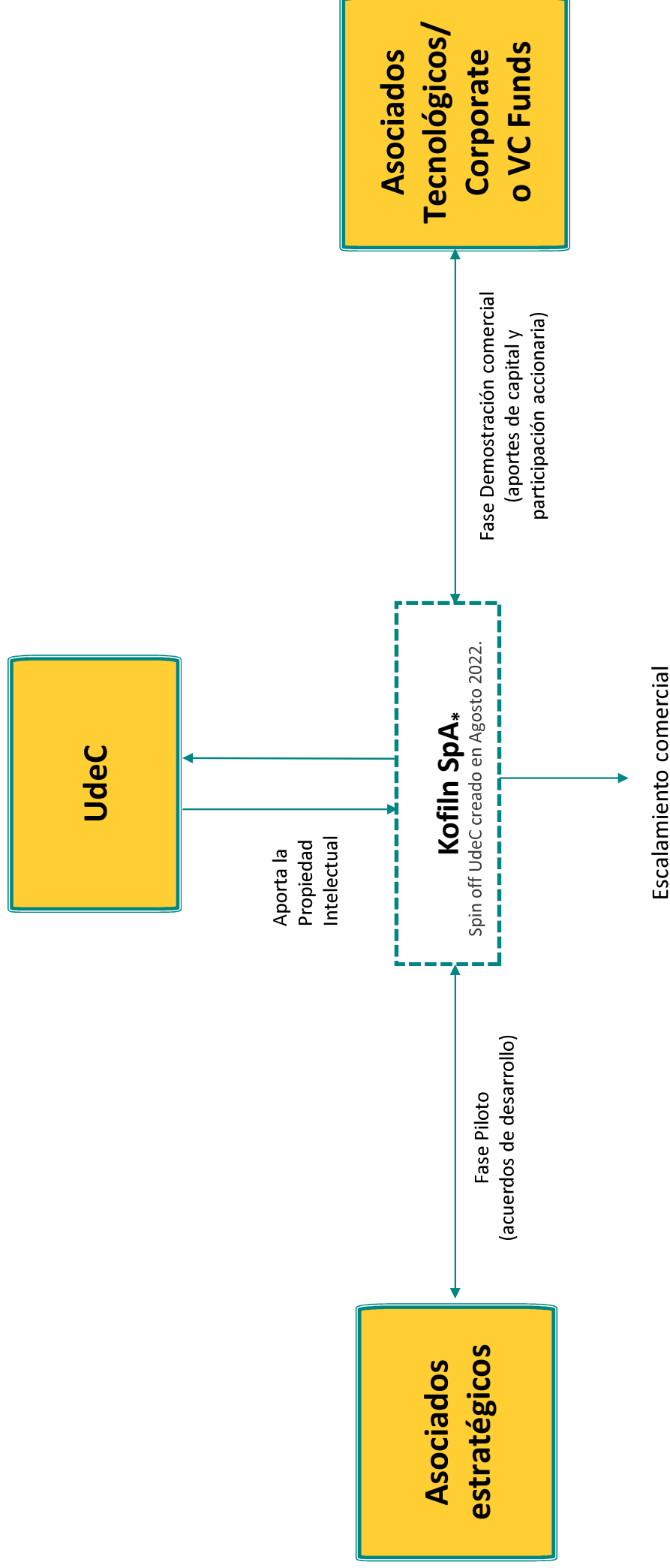
Universidad de Concepción

ESTRATEGIA DE DESARROLLO TECNOLÓGICO





MODELO DE ESCALAMIENTO



PROYECTO PRESENTADO A CORFO: FASE PILOTO

“Desarrollo de un nuevo proceso para concentrados de cobre sin emisiones y sin escorias”

Inicio

Sobre Corfo

Programas y convocatorias

Sala de prensa

Regiones

Inicio

Sobre Corfo

Programas y convocatorias

Sala de prensa

Regiones

Inicio

Sobre Corfo

Programas y convocatorias

Sala de prensa

Regiones

Inicio

Sobre Corfo

Programas y convocatorias

Sala de prensa

Regiones

DESARROLLO DE NUEVAS SOLUCIONES TECNOLÓGICAS PARA LA REDUCCIÓN DE EMISIONES EN EL PROCESAMIENTO DE CONCENTRADOS DE COBRE.

Postulaciones Cerrada

Apertura: 30/01/2024 15:00 hrs.

Cierre: 13/05/2024 12:00 hrs.

Disponible en los siguientes territorios **Todo Chile**

¿Qué es?

La presente convocatoria busca desarrollar nuevos conceptos tecnológicos que permitan procesar concentrados de cobre con una baja huella de carbono, al mismo tiempo que se minimizan las emisiones de SO₂, se promueven enfoques de economía circular para minimizar residuos y, se hace un manejo adecuado y seguro de los residuos de arsénico.

ASOCIADOS

Asociados principales



Otros colaboradores



Socios tecnológicos



DURACIÓN: 48 MESES

PRESUPUESTO

ENTIDADES	PECUNIARIO US\$	VALORIZADO US\$	TOTAL US\$
CORFO	10.000.000	-	10.000.000
ENTIDAD RECEPTORA	-	1.077.768	1.077.768
ASOCIADOS	1.800.000	401.559	2.201.559
Total	11.800.000	1.479.327	13.279.327

Todos los derechos reservados – Universidad de Concepción - 2024



ESTRATEGIA DE SUECIA PARA EL ACERO CERO EMISIÓN: UNA INSPIRACIÓN

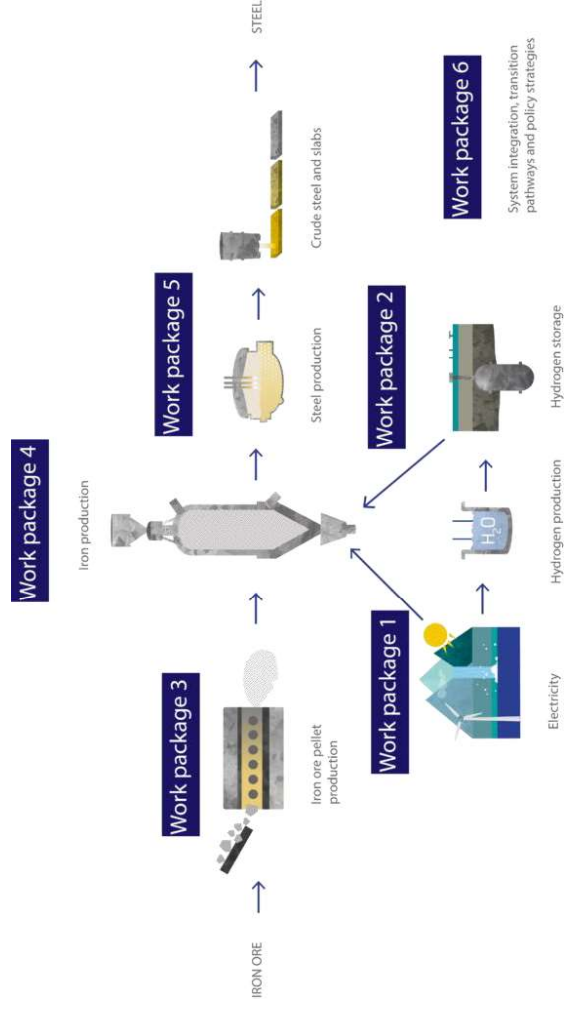


Hydrogen Breakthrough Ironmaking Technology

- Alianza de LKAB (productor de hierro-empresa pública) + Vattenfall (utility-empresa pública) + SSAB (productor de acero) en Suecia.



- Agencia Sueca de Energía entregó subsidio de € 51,3 millones, el más grande en la historia del país. Cartera de 6 proyectos de I+D y 2 plantas piloto, para usar H2 verde en el proceso.



- El Fondo de Innovación de la UE entregó en abril 2022 un aporte de € 143 millones para una planta demostrativa comercial.
- Proyección en implementación:
 - 10 GW de electrólisis renovable (equivaldría a 1/4 de la meta de la UE al 2030)
 - US\$ 46 billones en inversión en 20 años



CONCLUSIÓN



- La tecnología UdeC es una solución disruptiva para el procesamiento de concentrados de cobre sin emisiones y sin escorias – **pionera en el uso de hidrógeno verde a nivel mundial**, que ofrecería un producto premium para las industrias de energías renovables y autos eléctricos.
- Permitiría **fortalecer la capacidad de producción de cobre refinado en Chile** de forma competitiva.
- Permitiría generar polos de procesamiento polimetálicos de mediana escala, generando **mayor valor agregado en el cobre y recuperando múltiples metales escasos y de alto valor**, con el consecuente aumento de empleos de calidad.
- **Beneficiaría a la pequeña y mediana minería.**
- Un caso que podría ser ejemplo del **ecosistema de innovación en minería en Chile**, conectando academia con empresas mineras y proveedores, en línea con la aspiración de la hoja de ruta al 2035.

Dr Igor Wilkomirsky Fuica

Candidato a Premio Nacional de
Ciencias Aplicadas y Tecnológicas
2024

Un hombre adelantado a sus tiempos



Talentoso, creativo, disciplinado y, sobre todo, visionario, son algunas de las cualidades que identifican al académico y doctor Igor Wilkomirsky Fuica de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de Concepción, quien nació un 13 de octubre de 1937, en Angol, Región de la Araucanía, Chile.

En los últimos cinco años, sus estudios han estado focalizados en el uso de hidrógeno verde en el procesamiento de minerales de cobre, acorde a la definición de desarrollo estratégico que Chile ha definido en este tema y liderando la temática a nivel mundial.

El Doctor Wilkomirsky es un ejemplo de la dualidad de científico-ingeniero, partiendo desde la concepción de ideas, diseñando pruebas de validación a pequeña escala, llegando hasta el escalamiento industrial.

Noticias sobre Igor

Descargar reseña

ORCID

SITIO OFICIAL

<https://fiudec.lpages.co/igor-wilkomirsky/>

CONTACTOS

Dr. Igor Wilkomirsky F.
Director Científico de Proyecto
iwilkommi@udec.cl

Dr. Roberto Parra F.
Director Técnico de Proyecto
rparra@udec.cl

Dra. Marcela Angulo G.
Directora de Transferencia Tecnológica del Proyecto
marcelaangulo@udec.cl

