



Corporación Nacional del Cobre de Chile

Desafíos 2025-2026

Procesos Metalúrgicos con Circularidad

Documento resumen con los principales desafíos tecnológicos en Metalurgia con Circularidad de Codelco, para el proceso de postulación a líneas de investigación del concurso Piensa Minería



Tabla de contenido

AGRADECIMIENTOS	3
INTRODUCCIÓN	4
FOCOS ÁREA “PROCESOS METALÚRGICOS CON CIRCULARIDAD”	5
HIDROMETALURGIA	5
CONCENTRADORA	7
FUNDICIÓN Y REFINERÍA (FURE)	8
RELAVES	9
CIRCULARIDAD	11



Agradecimientos

La Gerencia Corporativa de Innovación y Tecnología, a través de la Gerencia Corporativa de Innovación en Procesos Metalúrgicos, agradece el valioso apoyo de las gerencias divisionales, sus directivos y profesionales técnicos en la elaboración de este documento, el cual recoge los principales desafíos que enfrenta CODELCO en materia de metalurgia y circularidad, y que resulta necesario abordar para continuar generando valor para Chile y el mundo.



Introducción

Piensa Minería es un concurso público que articula la vinculación de la comunidad de Investigación, Desarrollo e Innovación (I+D+i) para abordar desafíos tecnológicos y operacionales de CODELCO. Convoa a universidades, académicos/as y estudiantes de posgrado a postular para obtener apoyo económico que impulse sus líneas de investigación y proyectos de tesis.

La transformación de recursos mineros en metales requiere de una cadena de procesos productivos que, en su conjunto, trabajen armónicamente para la generación de valor considerando aspectos de eficiencia productiva, circularidad y sustentabilidad. Esta mirada ecosistémica nos permite producir responsablemente los metales que la sociedad en su conjunto demanda.

El presente documento expone de manera concisa los focos y desafíos específicos bajo los cuales CODELCO realiza la convocatoria 2025. El contenido se centra, en esta ocasión, en el área de *Procesos Metalúrgicos con Circularidad*, presentando los focos definidos y, para cada uno de ellos, los desafíos seleccionados que deberán vincularse con los temas abordados por la academia a través de tesis y proyectos de investigación aplicada.

El proceso de generación de los desafíos que a continuación se presenta, es fruto de un trabajo multidisciplinario de distintos profesionales y expertos que actualmente se desempeñan en diversas áreas de la cadena de generación de valor de los procesos metalúrgicos de CODELCO, teniendo los principios de circularidad y sustentabilidad como elementos transversales en el análisis.

Basado en los procesos productivos de CODELCO y para mayor facilidad en el entendimiento de estos desafíos por parte del ecosistema de I+D+i, se ha optado por presentarlos según temáticas asociadas a la explotación de recursos sulfurados por vías hidrometalúrgicas de plantas concentradoras-fundición-refinería.

Las siguientes áreas se presentan a continuación:

- Hidrometalurgia (Lixiviación – Extracción por solvente y Electro obtención)
- Concentradora (Molienda – Flotación)
- Fundición-Refinería (FURE)
- Relaves
- Circularidad



Focos área “Procesos Metalúrgicos con Circularidad”

A continuación, se presentan los desafíos específicos por foco:

Hidrometalurgia

La hidrometalurgia está llamada a ser un actor relevante en la industria del cobre. Esta hipótesis se sustenta en la disminución gradual de las leyes de mineral, la presencia de especies cada vez más complejas e impurezas y la creciente presión por un uso más eficiente de agua y energía. Los procesos hidrometalúrgicos se presentan como una alternativa y/o complemento de la producción, aprovechando la infraestructura existente y capacidad disponible en las plantas de SX-EW por la disminución de recursos oxidados en CODELCO.

CODELCO ha centrado sus esfuerzos en desarrollar la tecnología de lixiviación de sulfuros como por ejemplo lixiviación clorurada con temperatura como alternativa para aumentar la producción de cobre catódico. Esta nueva tecnología, hoy en etapa de demostración industrial, enfrenta importantes desafíos técnicos para asegurar un desarrollo e implementación exitosos. Entre los desafíos críticos destacan la variabilidad mineralógica, el comportamiento de impurezas en soluciones de lixiviación y la necesidad de contar con sistemas de control y monitoreo.

La magnitud de estos desafíos demanda un trabajo colaborativo entre las comunidades de I+D+i y los actores tecnológicos. Será esencial avanzar en el diseño de nuevos modelos fundamentales y fenomenológicos, así como en el desarrollo de métodos y tecnologías que permitan asegurar altas recuperaciones de cobre y la valorización de otros elementos de interés. De manera complementaria, se requiere integrar criterios de sustentabilidad que equilibren el desempeño técnico con la eficiencia en el uso de recursos y la reducción del impacto ambiental.

A continuación se presentan los principales desafíos para este foco:

1. Predecir rutas de procesamiento, recuperaciones metalúrgicas y manejo de impurezas desde los principios fundamentales combinando información geometalúrgica, modelos fenomenológicos y conocimientos físico-químico.

Uno de los principales desafíos de la hidrometalurgia es la dificultad de anticipar el comportamiento de los minerales bajo distintas rutas y condiciones de procesamiento. Dada la heterogeneidad geológica y la presencia de impurezas que afectan la recuperación y la calidad de los productos, la lixiviación de mineral entregará distintos comportamientos dependiendo del medio lixivante.

Se requiere avanzar en la integración de la información geometalúrgica, fundamental, mineralógica, y de procesos en modelos fenomenológicos que permitan predecir con mayor precisión el comportamiento de los procesos y las recuperaciones asociadas, de manera de poder definir las



rutas de procesamiento más adecuadas, reduciendo riesgos, optimizando los procesos y la toma de decisiones.

2. Conceptualización y desarrollo de procesos hidrometalúrgicos que permitan aumentar la recuperación de cobre y elementos críticos en lixiviación de óxidos negros, sulfuros secundarios/primarios y finos de chancado.

Los minerales disponibles en la actualidad presentan mayores complejidades metalúrgicas, como los óxidos negros, los sulfuros secundarios y primarios, , que dificultan alcanzar recuperaciones satisfactorias con procesos convencionales. Esta situación limita la rentabilidad y compromete el aprovechamiento de recursos estratégicos. El desafío consiste en diseñar y probar nuevas procesos de lixiviación o adaptaciones de los existentes, capaces de incrementar de manera significativa la recuperación de cobre y otros elementos críticos de valor, asegurando al mismo tiempo viabilidad técnica y económica de manera sustentable.

3. Control de impurezas en procesos de lixiviación de sulfuros (pilas dinámicas y botaderos).

La lixiviación clorurada ha mostrado gran potencial para mejorar la disolución del cobre en minerales difíciles, sin embargo, su implementación está condicionada por la complejidad en el comportamiento de impurezas. La acumulación y transporte de estas especies en pilas dinámicas y botaderos puede comprometer la operación, la eficiencia y el cumplimiento ambiental. Por ello, es necesario el desarrollo de modelos predictivos que permitan simular balances de masa, especiación y propiedades del proceso hidrometalúrgico, para anticipar riesgos y establecer estrategias de control que aseguren un desempeño estable y confiable.

4. Desarrollo de herramientas de monitoreo en tiempo real de variables críticas en LIX/SX/EW (pH, EH, temperatura, oxígeno, humedad) para decisiones operacionales y trazabilidad.

En los procesos de lixiviación, extracción por solventes y electro-obtención, la falta de mediciones confiables y en tiempo real de variables críticas (como pH, potencial de óxido-reducción, temperatura, oxígeno o humedad) limita el control de procesos y la trazabilidad operacional. Actualmente, muchas de estas mediciones se realizan de manera indirecta o con rezago, dificultando ajustes oportunos y reduciendo la eficiencia global. El desafío apunta a desarrollar herramientas de monitoreo en línea, robustas y aplicables en condiciones industriales, que permitan un control más preciso, la toma de decisiones en tiempo real y la mejora continua del desempeño hidrometalúrgico.



Concentradora

La beneficiación y concentración de minerales de cobre constituye la principal línea de producción en la cartera de CODELCO. Las plantas concentradoras permiten separar y concentrar los minerales de interés a partir de grandes volúmenes de material, elevando la ley de cobre desde valores del 0,5–1% hasta rangos de 25–30%. El concentrado obtenido es posteriormente comercializado y/o procesado en fundiciones para la producción de ánodos de cobre.

Estas plantas enfrentan desafíos crecientes asociados a la variabilidad mineralógica, la necesidad de maximizar las recuperaciones de Cu y Mo bajo condiciones operativas cada vez más exigentes, la significativa presencia de elementos contaminantes (como el arsénico) y de arcillas, así como de impurezas como zinc y cadmio que bajan la calidad del concentrado. A ello se suman factores externos, como la calidad del agua de proceso y la creciente necesidad de contar con sistemas avanzados de control.

Superar estas complejidades requiere de investigación aplicada que integre los fundamentos de procesos metalúrgicos, el modelamiento predictivo y el diseño de nuevas estrategias operacionales, con el propósito de sostener e incrementar la productividad de manera sustentable.

A continuación se presentan los principales desafíos para este foco:

1. Conceptualización de una concentradora multi-mineral y multi-producto para recursos polimetalicos.

Las operaciones actuales están mayoritariamente diseñadas para minerales y productos específicos, lo que limita su capacidad de adaptación frente a la variabilidad de alimentación y la presencia de recursos polimetálicos. Esto genera pérdidas de valor al no aprovechar elementos estratégicos que acompañan al cobre. El desafío consiste en conceptualizar una concentradora capaz de procesar distintos minerales y generar múltiples productos, abordando de forma integral la complejidad de futuros yacimientos y aumentando la resiliencia de la operación.

2. Análisis del impacto de diferentes calidades de aguas en el proceso de flotación (pros/cons)

El uso de fuentes hídricas alternativas y la recirculación intensiva de agua de proceso generan variaciones en la composición físico-química del agua que inciden directamente en la flotación. Estos cambios afectan la recuperación, la selectividad y la estabilidad del circuito.

El desafío radica en analizar sistemáticamente los efectos de distintas calidades de agua sobre la flotación y la fenomenología que se presenta, identificando tanto sus beneficios como sus limitaciones, para definir ventanas operacionales o tratamientos específicos de las aguas económicamente rentables que permitan asegurar eficiencia metalúrgica con un uso sustentable del recurso hídrico. Desde la perspectiva de la innovación, el reto radica en identificar/desarrollar



tecnologías que permitan la toma de decisiones oportuna, mejorando la eficiencia de estos procesos.

3. Desarrollo de estrategias para el aumento de recuperación de Cu/Mo.

La recuperación de cobre y molibdeno se ve impactada por factores como la variabilidad del mineral, el tamaño de las partículas de mineral que contienen ambos elementos y las condiciones de operación. Mejorar estos indicadores implica diseñar nuevas estrategias de control, ajuste de variables críticas y optimización de circuitos, basadas en modelos predictivos y comprensión fenomenológica. El desafío consiste en generar conocimiento y propuestas de proceso que permitan incrementar de manera medible la recuperación de Cu y Mo, asegurando su viabilidad en condiciones industriales reales.

Entre los problemas identificados de manera transversal están: pérdidas de Cu en fracciones granulométricas a los extremos de la curva de distribución de tamaño y recuperación de minerales con superficies alteradas. Se debe tomar esto como punto de partida y con enfoque global: desde lo teórico a las tecnologías necesarias para su ejecución/control.

Fundición y Refinería (FURE)

La fundición y la refinería son etapas esenciales en la transformación del concentrado de cobre en cátodos de alta pureza. Estos procesos deben operar en condiciones extremas de temperatura y con materias primas cada vez más variables, lo que genera desafíos asociados a la flexibilidad y/o robustez operacional, el control de impurezas y la sostenibilidad ambiental. La presión por mejorar la eficiencia, reducir riesgos de seguridad y asegurar la calidad del producto final hace necesario avanzar en investigación aplicada que aporte nuevas metodologías de control, monitoreo y gestión de procesos críticos.

1. Aumentar la robustez operacional de hornos/convertidores frente a variabilidad de concentrados (mezcla de concentrado), optimizando combustión y extendiendo la vida útil de los equipos.

La creciente diversidad de concentrados procesados en fundición introduce una variabilidad en la composición y comportamiento térmico que afecta la estabilidad operacional. Esto impacta la combustión del concentrado, genera riesgos de daño en refractarios y acorta la vida útil de hornos y convertidores. El desafío consiste en aumentar la robustez operacional, desarrollando enfoques que permitan optimizar la combustión, gestionar mejor la variabilidad de la alimentación de los procesos y extender la durabilidad de los materiales refractarios, asegurando continuidad y eficiencia en la operación.



2. Caracterizar y gestionar la capacidad de escoria para retener impurezas críticas en ventanas de operación industrial.

Las escorias generadas en los procesos pirometalúrgicos permiten capturar elementos asociados a los concentrados de cobre que no son eliminados por vía gaseosa. Su capacidad de captura y retención de elementos tales como hierro, sílice y otros elementos menores depende de las condiciones termodinámicas y de operación, lo que puede limitar la efectividad del control ambiental y metalúrgico. El desafío radica en caracterizar y gestionar la capacidad de la escoria bajo ventanas de operación industrial, para asegurar que actúe como un sumidero eficiente de impurezas críticas y reduzca el impacto en el producto final y en los residuos generados.

3. Predecir y controlar nivel de baño, espuma y eventos de sobrepaso con mediciones no invasivas y analítica integrada al control, reduciendo pérdidas y riesgos.

Los convertidores son equipos de alta criticidad que pueden experimentar eventos de sobrepaso, acumulación de espuma y variaciones de nivel de baño difíciles de controlar en tiempo real. Estos eventos generan pérdidas de material, riesgos de seguridad y paradas no programadas. El desafío se centra en desarrollar sistemas de medición no invasiva y analítica predictiva, capaces de anticipar y controlar estas variables, reduciendo riesgos y mejorando la estabilidad de la operación.

4. Elevar la productividad en refinería mediante gestión activa de impurezas en electrolitos (monitorización/purificación en línea) con metas de calidad y optimización de capacidad.

La etapa de refinería se ve afectada por la acumulación de impurezas en los electrolitos, lo que impacta tanto la calidad del cátodo como la productividad del proceso. El control actual suele ser reactivo y con retraso en la detección de desviaciones. El desafío apunta a elevar la productividad de la refinería mediante el desarrollo de sistemas de monitoreo y purificación en línea de electrolitos, que permitan gestionar activamente las impurezas, mantener la calidad requerida y maximizar la capacidad de las celdas.

Relaves

La minería de cobre, por sus grandes volúmenes de explotación y producción, genera una cantidad importante de relaves, los que actualmente son depositados en sitios acondicionados para ello. La explotación de yacimientos en Codelco por más de 100 años ha generado importantes volúmenes, y se seguirán generando por los próximos años de acuerdo a los planes futuros de producción. Es por ello que se está en una etapa de búsqueda y movilización de las áreas relacionadas a la operación



de los relaves, junto a innovación, a encontrar nuevas formas de abordar los futuros relaves con miras a:

- gestionar la estabilidad física y química en todo su ciclo de vida,
- disminuir los volúmenes a través de la recuperación de agua y otros,
- identificar valor tanto económico como potenciales usos con foco en circularidad ,
- y disminuir su generación.

Si bien los relaves se consideran como los principales pasivos ambientales, también representan una oportunidad estratégica para mejorar la eficiencia hídrica, mitigar impactos y avanzar hacia modelos de economía circular.

La gestión de relaves enfrenta actualmente desafíos técnicos de alta complejidad, por lo que se requieren soluciones innovadoras que transformen el manejo de relaves en una fuente de eficiencia operativa y sostenibilidad, contribuyendo a la competitividad y legitimidad de la industria minera en el largo plazo.

A continuación se presentan los principales desafíos para este foco:

1. Liberar el agua atrapada en relaves depositados sin comprometer la estabilidad geotécnica del depósito, considerando reología de pulpas, gradiente hidráulico e inventarios hídricos.

Una gran proporción del agua utilizada en los procesos de concentración queda atrapada en los depósitos de relaves, lo que restringe su recuperación y con ello aumenta los make up de fuentes hídricas externas para la operación. Sin embargo, liberar esta agua sin comprometer la estabilidad geotécnica es un reto complejo debido a la reología de las pulpas, los gradientes hidráulicos y la heterogeneidad del material. El desafío es desarrollar soluciones que permitan recuperar agua de depósitos de relaves de manera segura y eficiente, mejorando la gestión hídrica sin generar nuevos riesgos.

2. Optimizar el equilibrio entre tamaño de partícula, reología y depositación para reducir el consumo y la recirculación de agua en transporte y disposición de relaves.

La granulometría del relave influye directamente en la reología de la pulpa, el transporte hidráulico y la liberación del agua contenida . El desafío consiste en optimizar el equilibrio entre tamaño de partícula, reología y condiciones de depositación, con el fin de reducir consumo hídrico, mejorar la eficiencia de transporte y contribuir a la estabilidad de los depósitos a largo plazo.

3. Habilitar técnicas innovativas de caracterización integral de relaves para habilitar rutas de valorización bajo principios de economía circular (metálicos y no metálicos).



Los relaves contienen minerales metálicos y no metálicos con potencial de valorización, pero su aprovechamiento depende de contar con información precisa sobre su composición y ocurrencia (ubicación), con miras a la obtención de un proceso para recuperarlos. Actualmente, las metodologías de caracterización de relaves suelen ser limitadas o insuficientes para habilitar rutas de valorización, dado que el escenario nos presenta elementos de valor en concentraciones muy bajas.

El desafío apunta a desarrollar/identificar/explorar técnicas avanzadas e innovadoras de caracterización integral, que permitan identificar oportunidades de recuperación y nuevos usos bajo principios de economía circular, transformando a los relaves en un recurso potencial.

4. Controlar infiltraciones y flujos no deseados en depósitos de relaves¹ mediante medidas pasivas compatibles con operación y cierre, asegurando cumplimiento ambiental.

Las infiltraciones no controladas desde depósitos de relaves pueden generar contaminación de acuíferos, pérdida de agua y riesgos de incumplimiento ambiental. Las actuales medidas de control mediante barreras hidráulicas corresponden a soluciones activas que requieren grandes inversiones y elevados costos de operación, los cuales deben ser sostenibles en el tiempo, especialmente en contextos de operación continua y cierre. El desafío es desarrollar y validar medidas pasivas para el control de infiltraciones y flujos indeseados, compatibles con la operación y el cierre seguro de los depósitos, aportando al cumplimiento ambiental y la reducción de impactos sobre el entorno.

Circularidad

La circularidad en procesos metalúrgicos tiene como propósito transformar residuos y corrientes secundarias en nuevas fuentes de valor, al mismo tiempo que mitiga los riesgos ambientales asociados, con el objetivo final de fortalecer la sostenibilidad de las operaciones.

En el ámbito minero, este enfoque implica abordar problemáticas críticas tales como:

- La gestión del arsénico y otros elementos contaminantes.
- La recuperación de metales estratégicos presentes en bajas concentraciones.
- La valorización de residuos históricamente depositados en faenas mineras.

¹ Si bien el foco principal está en relaves, también se considerarán ideas que aporten a la solución de desafíos relacionados con infiltraciones y flujos no deseados en operaciones mineras.



Superar estos desafíos resulta esencial para avanzar hacia un modelo productivo más eficiente y responsable, que maximice el aprovechamiento de los recursos disponibles y minimice la generación de pasivos ambientales.

A continuación se presentan los principales desafíos para este foco:

1. Estabilizar arsénico en corrientes gaseosas y líquidas logrando residuos no peligrosos y costos de estabilización sostenibles a escala industrial.

El arsénico es una de las impurezas más relevantes en los recursos mineros que CODELCO maneja. Esta impureza al estar asociada a los minerales de cobre, se hace presente a lo largo de toda la cadena de procesamiento, desde la mina a la refinería. Lo anterior impone grandes desafíos a los procesos productivos de manera de poder asegurar la separación y estabilización del arsénico en compuestos estables.

2. Recuperar metales críticos/estratégicos (p.ej., renio, Ag, Zn, Ge) desde polvos y corrientes de proceso con balances de masa/pureza que viabilicen el negocio.

Diversos polvos y corrientes secundarias contienen metales críticos y estratégicos como renio, plata, zinc o germanio, que hoy en muchos casos se pierden o no se aprovechan. La dificultad está en que se presentan en bajas concentraciones y en matrices complejas, lo que exige procesos selectivos y balances de masa rigurosos. El desafío es desarrollar soluciones para caracterizar y recuperar estos metales de manera eficiente y económicamente viable, contribuyendo a diversificar la cartera de productos y a reforzar la seguridad de suministro de elementos clave para la transición energética y tecnológica.

3. Revalorizar residuos mineros industriales y relaves depositados bajo modelos de economía circular con rutas técnico-económicas claras.

Los residuos industriales y relaves depositados representan uno de los mayores pasivos ambientales de la minería, pero también una potencial fuente de materiales útiles si se abordan con un enfoque de economía circular. Hoy existen importantes barreras técnicas, económicas y regulatorias para su aprovechamiento. El desafío consiste en definir y validar rutas técnico-económicas claras que permitan la revalorización de estos residuos, transformándolos en insumos o productos con valor agregado y reduciendo al mismo tiempo los impactos ambientales y sociales asociados a su disposición.