

# AVANCES EN LA TECNOLOGÍA DE PRETRATAMIENTO DE MINERALES SULFURADOS MEDIANTE EL USO DEL PRETRATAMIENTO QUÍMICO CON $\text{NaCl-H}_2\text{SO}_4$

Preparado por: Jorge Ipinza<sup>1</sup>, Dr. Sc., Ingeniero Civil Metalúrgico

(1) Gerente de Desarrollo y Nuevas Tecnologías, Foster Ingenieros Consultores S.A.

**Enero 30 del 2023**

# RESUMEN

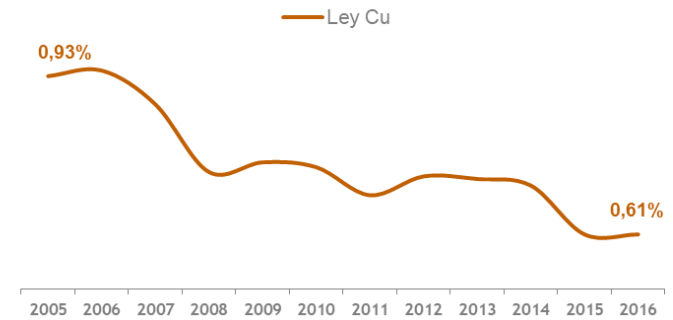
- La nueva tecnología de pretratamiento químico con  $\text{NaCl-H}_2\text{SO}_4$  abre nuevas oportunidades para ENAMI en su rol de poder comprador de los pequeños mineros en Chile.
- La madurez de la nueva tecnología de lixiviación de minerales permite ampliar la lixiviación de óxidos de cobre a minerales de tipo secundario (calcosina y covelina) y más aún a sulfuros primarios (calcopirita, bornita y enargita), favoreciendo la valorización económica de los recursos que pueda proveer la pequeña minería del cobre, constituyéndose en un fomento de la actividad.
- El costo de inversión es menor para las plantas que disponen de operaciones hidrometalúrgicas, la que se estima en un 20% del CAPEX que dio origen a la operación y un aumento de OPEX que debe ser evaluado por la ingeniería.
- Esta tecnología aplicada en Chile está permitiendo rápidamente recuperar la capacidad ociosa de plantas de SX-EW por el agotamiento de los óxidos de cobre.

# RESUMEN

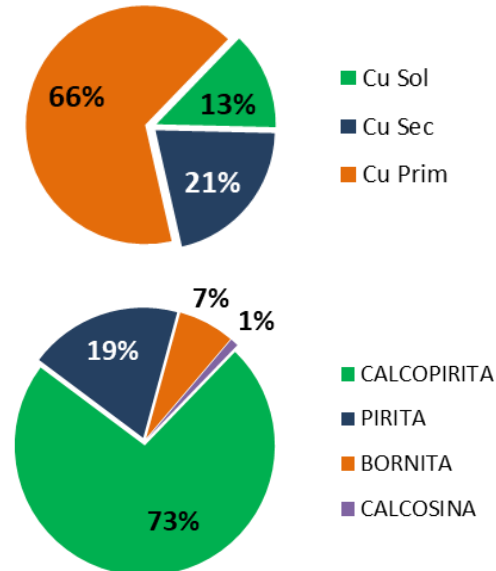
- La operación integrada de plantas concentradoras con plantas hidrometúrgicas genera una sinergia positiva que mejora significativamente el negocio minero, debido a que minerales que contienen impurezas que pueden afectar la calidad química del concentrado (As, Sb, Bi, Cd, Zn, entre otros) se pueden tratar alternativamente en la planta hidrometalúrgica. Esta es la visión de Codelco-DRT y de Pelambres, que se espera se extienda rápidamente a otros proyectos u operaciones de concentración de minerales.
- Actualmente la tecnología está siendo aplicada en otros países Sudamericanos y en Asia.

# PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

- El agotamiento de las reservas ha obligado a las mineras a recurrir a minerales mixtos y sulfuros de baja ley, que no pasaban la ley de corte a principios de la década pero que, poco a poco, se han ido volviendo rentables gracias a las nuevas tecnologías.
- Las bacterias termófilas (que operan en torno a los 70-80 °C) adaptadas a medios altos en cloruro, podrían ser una alternativa. El problema es que es muy difícil lograr esa temperatura en forma natural, en las enormes pilas de lixiviación de las faenas mineras y su cinética lenta.

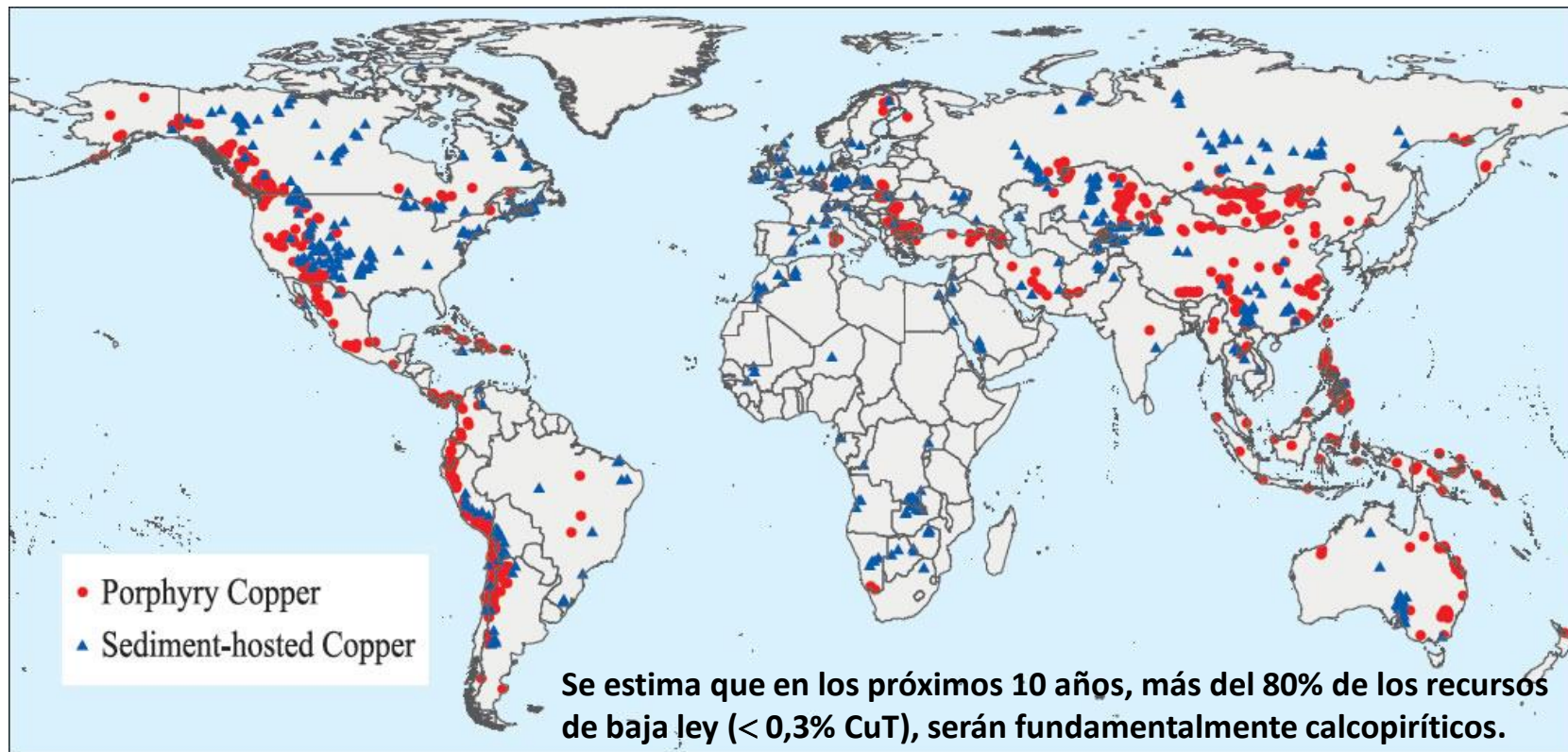


Ref. COCHILCO, Wood Mackenzie



# PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Depósitos de calcopirita a nivel mundial.



Ref. Baba et al. (2012). *A Review on Novel Techniques for Chalcopyrite Ore Processing*. International Journal of Mining Engineering and Mineral Processing, 1(1): 1-16.

# LIXIVIACIÓN DE LOS SULFUROS DE COBRE

- Actualmente, no todos los sulfuros pueden ser lixiviados. Solamente aquellos que son secundarios, son lixiviables, tanto en medio  $\text{NaCl-H}_2\text{SO}_4$ , como con bacterias del grupo de las mesófilas.
- Los sulfuros primarios, como la calcopirita, son escasamente lixiviables con bacterias mesófilas. En este momento, la tecnología indica que se extrae entre un 5% a un 15% Cu, en un año desde minerales de calcopirita.
- En estas condiciones, para un mineral de 0,15% de Cu se requiere tratar en botadero por 3 o más años, para extraer cerca del 30% del cobre contenido.

# LIXIVIACIÓN DE LOS SULFUROS DE COBRE

Disolución en medio ácido y cianuro de varios minerales de cobre.

Especie Mineral	Composición Aproximada	% Aproximado de Disolución	
		En Solución de Acido Sulfúrico	En Solución de Cianuro de Sodio
<b>OXIDOS</b>			
Atacamita	$\text{CuCl}_2(\text{OH})_3$	100	100
Azurita	$\text{Cu}_3(\text{CO}_3)_2 \cdot \text{Cu}(\text{OH})_2$	100	100
Cuprita	$\text{Cu}_2\text{O}$	70	100
Crisocola	$\text{CuSiO}_3 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$	100	45
Malaquita	$\text{CuCO}_3 \cdot \text{Cu}(\text{OH})_2$	100	100
Cobre Nativo	$\text{Cu}$	5	100
Tenorita	$\text{CuO}$	100	100
<b>SULFUROS SECUNDARIOS</b>			
Calcosina	$\text{Cu}_2\text{S}$	8	100
Covelina	$\text{CuS}$	5	100
<b>SULFUROS PRIMARIOS</b>			
Bornita	$\text{Cu}_2\text{FeS}_4$	2	100
Calcopirita	$\text{CuFeS}_2$	2	7
<b>Nota.-</b> Las muestras serán pulverizadas finamente (100% malla -150) y el tiempo de reacción es una hora o menos			
<b>Fuente:</b> THE SEQUENTIAL COPPER ANALYSIS METHOD-GEOLOGICAL, MINERALOGICAL, AND METALLURGICAL IMPLICATIONS (G.A. Parkinson, Cambior USA, Inc. Englewood, CO, R.B. Bhappu, Mountain States R & D International Inc., Vail, AZ, FOR PRESENTATION AT THE sme Annual Meeting Denver, Colorado- March 6-9, 1995)			



# PROYECTOS Y OPERACIONES DE LIXIVIACIÓN CON PRETRATAMIENTO QUÍMICO CON $\text{NaCl-H}_2\text{SO}_4$

## MADUREZ DE LA TECNOLOGÍA

2012 Abre una alternativa para la lixiviación de sulfuros de cobre secundario bajo condiciones mejoradas frente a la biolixiviación.

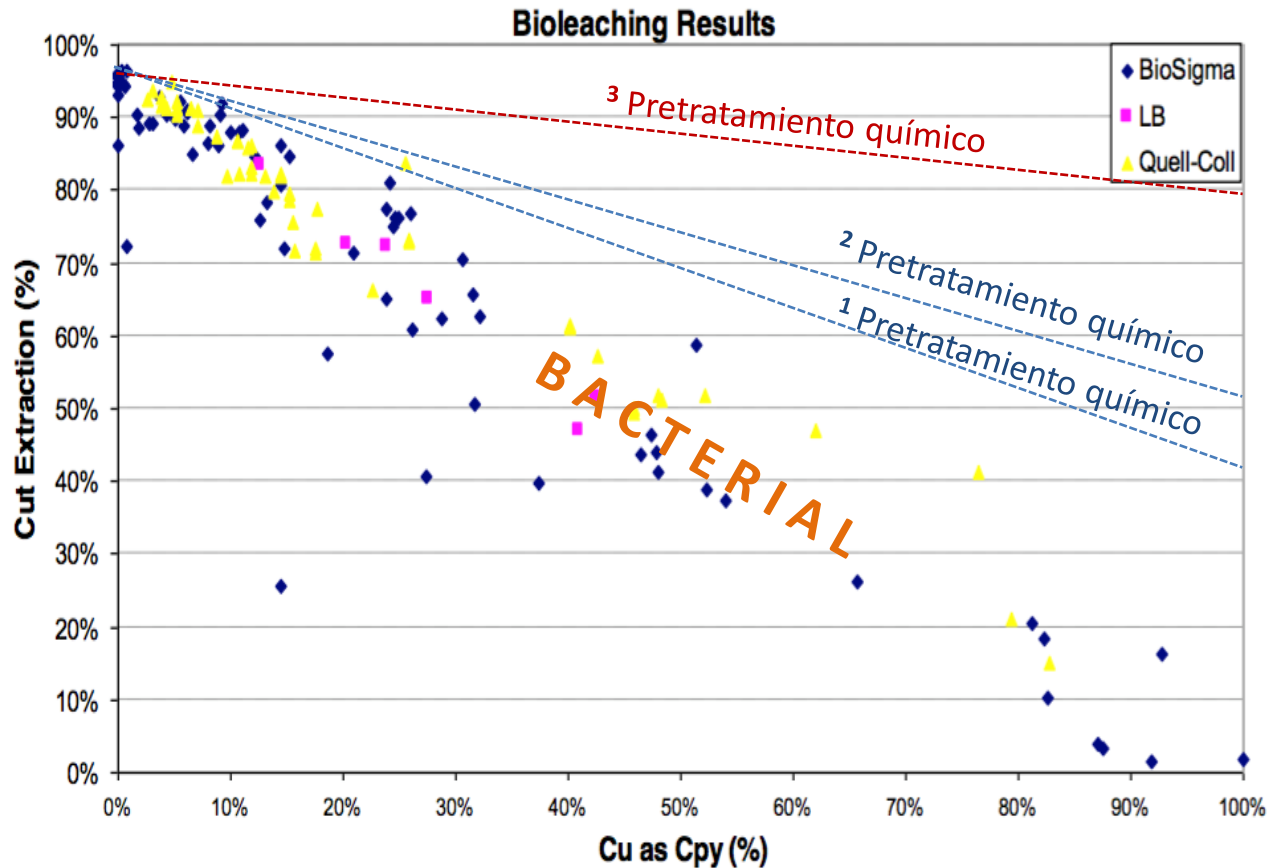
2019 La única vía para lixiviar sulfuros de cobre primarios de baja ley con CAPEX/OPEX competitivo.

2020 Abre la posibilidad de integración entre planta concentradora y planta hidrometalúrgica con un objetivo de negocio sostenible.





# BACTERIAL VS PRETRATAMIENTO QUÍMICO CON NaCl-H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>



(1) Test EMELA®  
(2) RMT®

- (1) Pretratamiento químico con refinó
- (2) Pretratamiento químico con ILP o IPLS
- (3) Pretratamiento químico con temperatura

Ref. Reghezza, Análisis de procesos IV (versión MGM), Antofagasta, Chile, 2013.

# METODOLOGÍA EXPERIMENTAL EMELA®

El **DIMM**, de la Universidad Técnica Federico Santa María (Chile) desarrolló una técnica experimental denominada **Extracción Máxima de Especies por Lixiviantes Agresivos (EMELA®)** para determinar la máxima extracción de cobre desde minerales refractarios (óxidos complejos y sulfuros) a la lixiviación ácida convencional.

1

- Preparación de muestras representativa del mineral recibido y caracterización físico-química (Figura 1).

2

- Pretratamiento del mineral mezclado con la sal (NaCl), seguido de humectación con refino y adición de ácido sulfúrico concentrado, evitando las pérdidas de gases generados (Figura 2).

3

- Reposo del mineral durante un periodo definido (7, 15 o más días) con control de humedad diario para evitar el secamiento superficial (Figura 3).

4

- Cinética de lixiviación agitada del mineral durante 7 horas, con 6 puntos de análisis, en una salmuera con  $20 \text{ gL}^{-1} \text{ Cl}^-$ , 20% de sólidos, pH=1,0 y temperatura ambiente (medida).

# METODOLOGÍA EXPERIMENTAL EMELA<sup>®</sup>



Figura 1. Preparación de muestras representativas



Figura 2. Pretratamiento del mineral



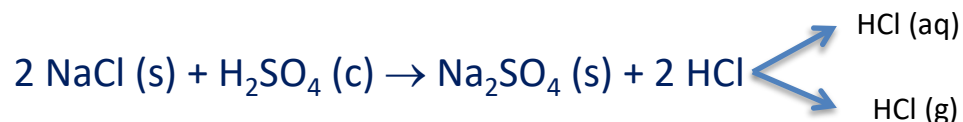
Figura 3. Reposo del mineral con control horario de humedad (pérdida de peso)



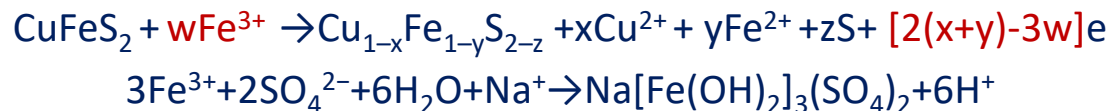
Figura 4. Lixiviación agitada del mineral en salmuera con  $20 \text{ gL}^{-1} \text{ Cl}^{-}$

# Mecanismo propuesto para transformar sulfuros de cobre en polisulfuros

- Mezcla de sólidos: mineral de calcopirita con NaCl. La adición de NaCl (kg/ton de mineral) depende de la dosis de H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>, de acuerdo con la reacción:



- El mecanismo más probable a la luz de los resultados experimentales es:



- En la salmuera durante la lixiviación del mineral pretratado podría ocurrir:

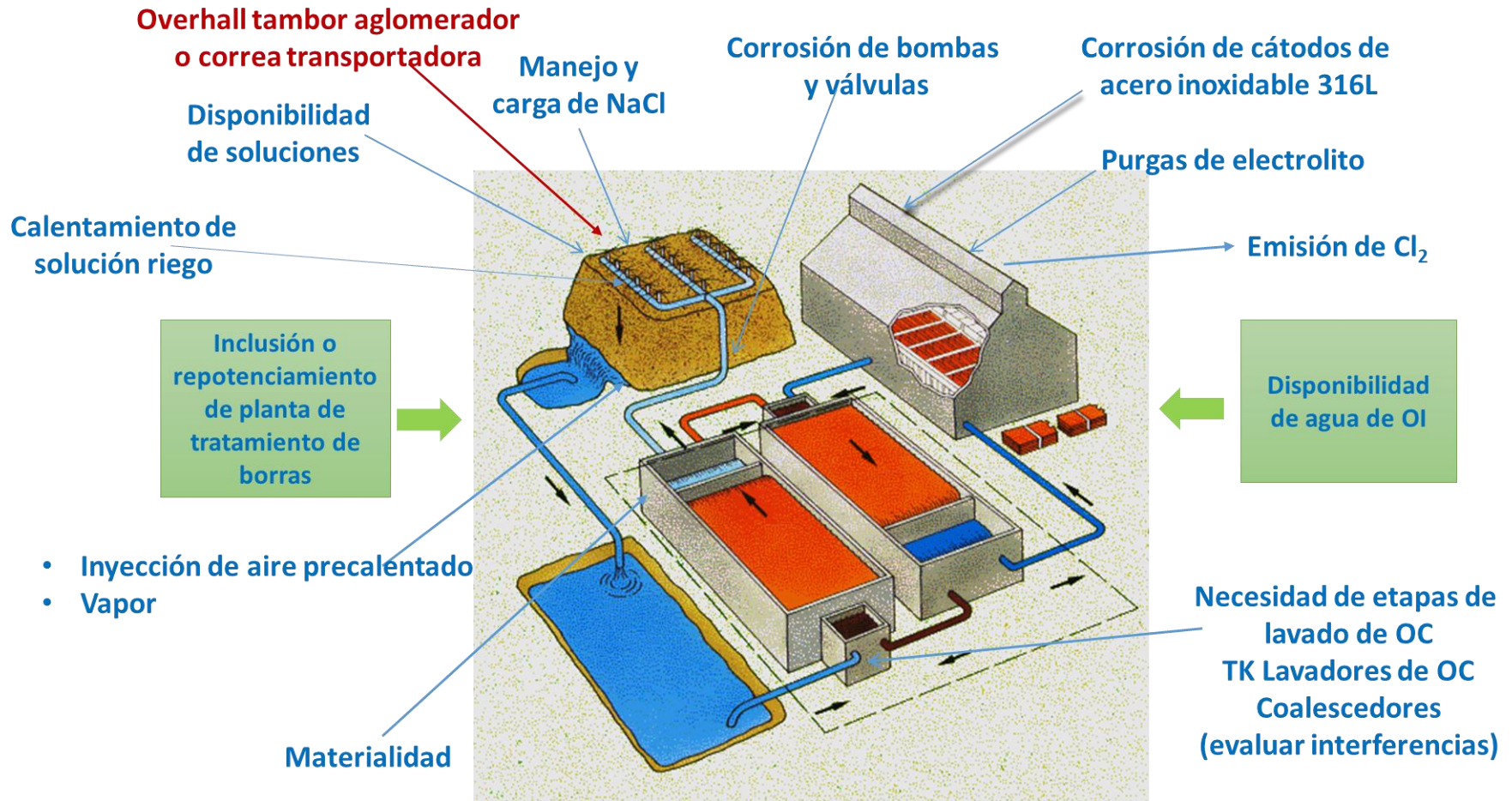


La formación del sulfato de sodio (Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>) durante el aglomerado evita la formación de azufre elemental.

# NUEVA TECNOLOGÍA DE TAMBOR AGLOMERADOR PARA EL PRETRATAMIENTO QUÍMICO OPTIMIZADO

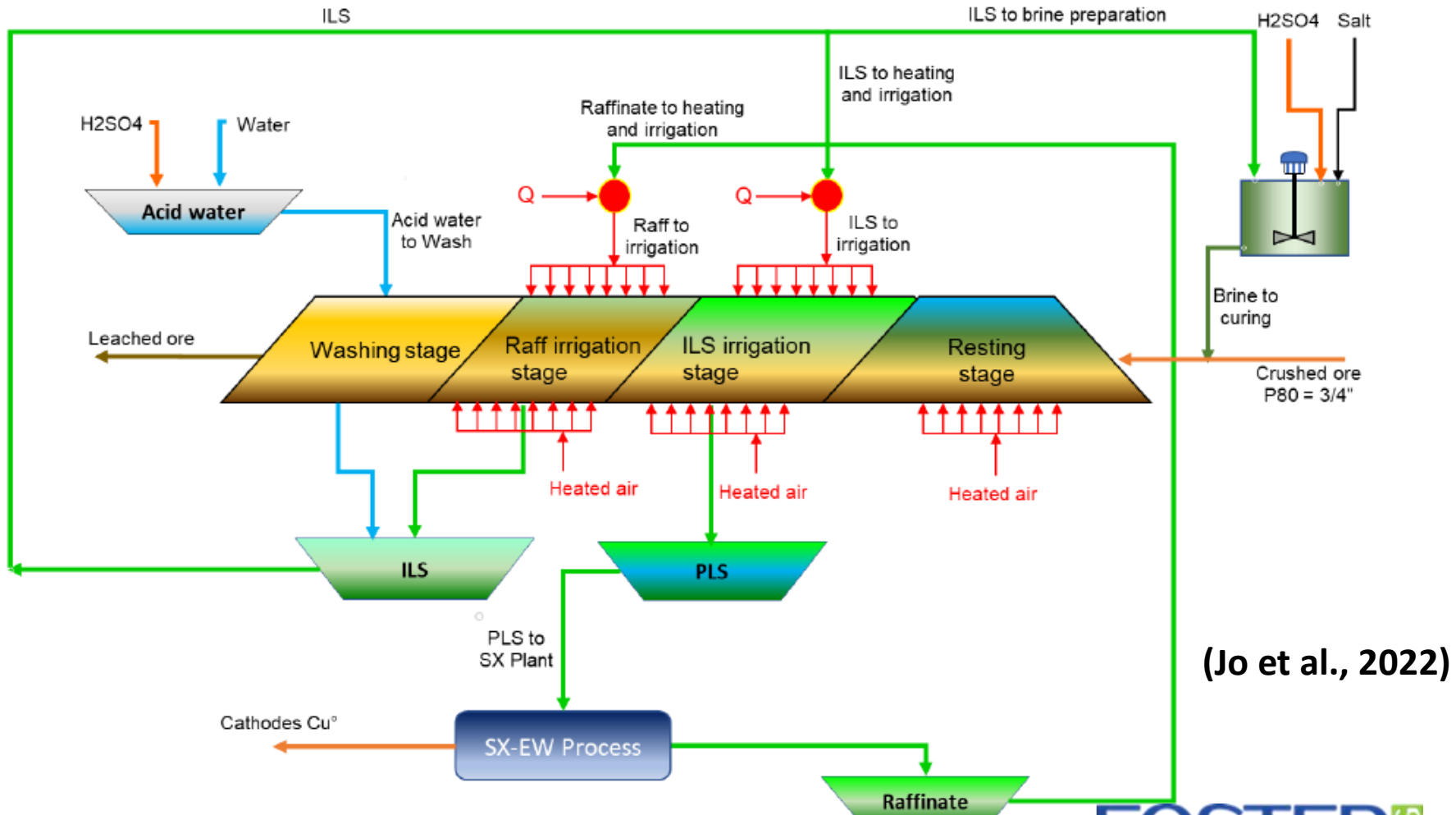


# Adaptación de la planta hidrometalúrgica



# Diagrama de procesos para la lixiviación clorurada

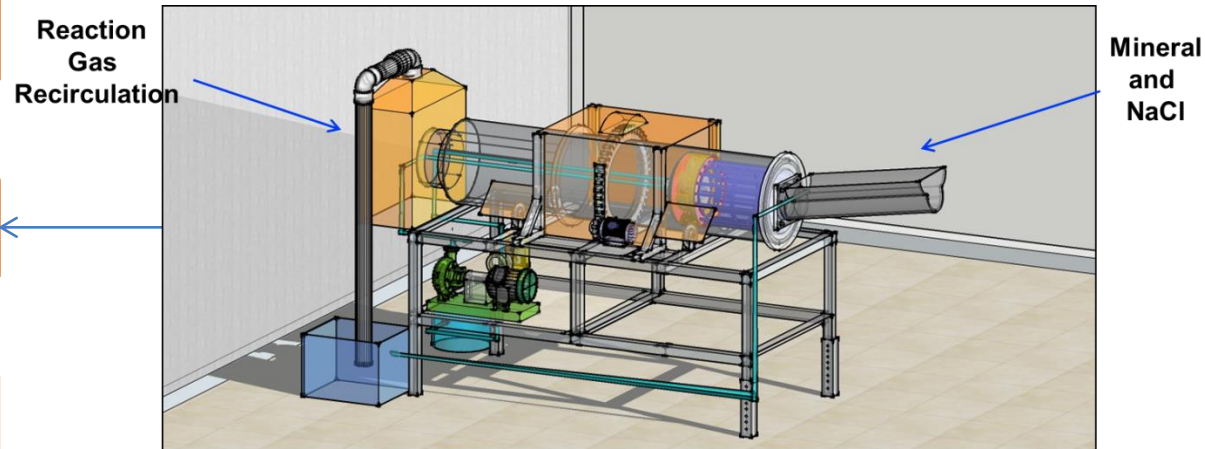
Plantas hidrometalúrgicas sin uso de tambor aglomerador solo con estanque disolvedor de NaCl en solución intermedia o refino. (Casos: Minera Codelco –DRT y Minera Zaldivar)



(Jo et al., 2022)



# EL REACTOR DE MEZCLA TRIFÁSICA (RMT®)

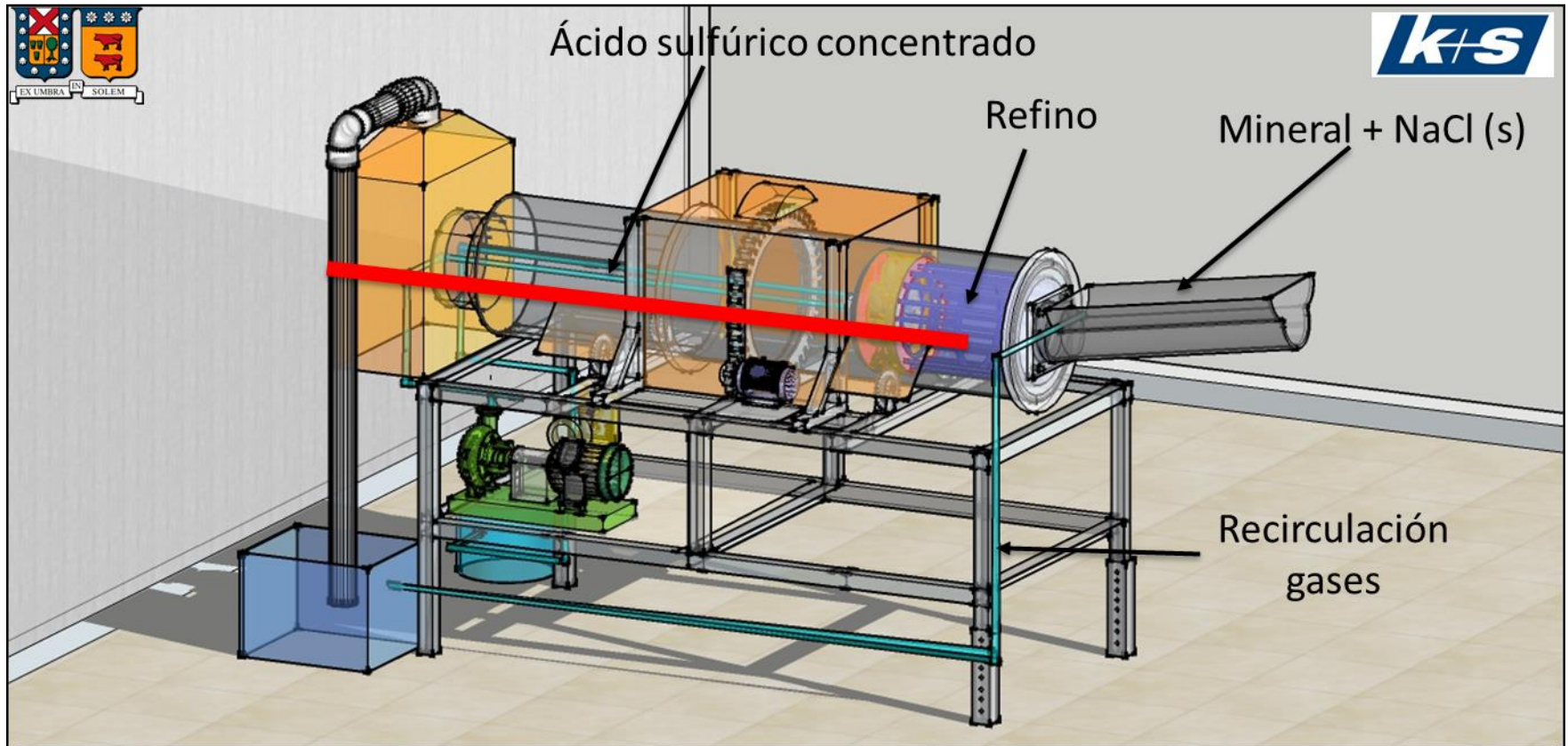


Concentrated sulfuric Acid and Water with copper contents from the process

## Características del RMT®

- Tambor con dos cámaras
- Vapores y gases son recirculados junto con aire
- Ácido sulfúrico concentrado y refino son alimentados por la boca de descarga del tambor
- Tiempo de reposo: 15 a 30 días
- Ciclo de lixiviación: 100 días (lixiviación química)
- Extracción máxima de cobre: 70% (en dos etapas)

# EL REACTOR DE MEZCLA TRIFÁSICA (RMT®)



***K+S Chile S.A. & Universidad Técnica Federico Santa María  
Solicitud de Patente de Invención N°. 01298-2015  
S/ref.: n/d  
N/ref.: 72297***

# EL REACTOR DE MEZCLA TRIFÁSICA RMT<sup>®</sup>

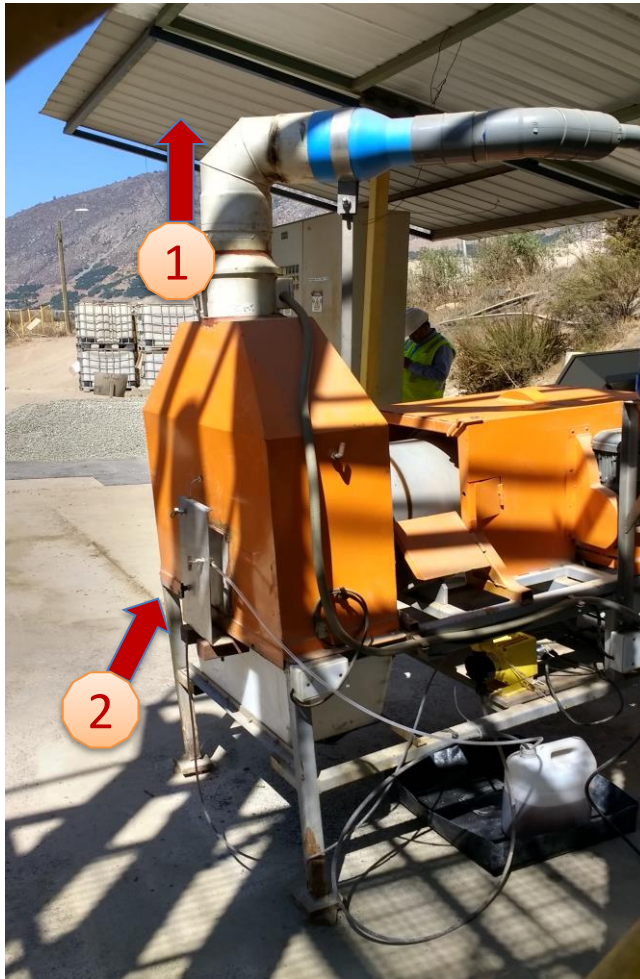


Prototipo de reactor escalado 1:10 m, para pilotaje  
en Minera Amalia Catemu (Chile).

*Universidad Técnica Federico Santa María*



# METODOLOGÍA EXPERIMENTAL RMT®



Inyección de ácido sulfúrico concentrado mediante boquillas especiales para atomizar el reactivo y favorecer el encuentro con el NaCl sólido y generar múltiples puntos de formación de HCl (en la interfase acuosa y como gas) en contacto con la roca mineralizada.

Las reacciones ocurren en las cercanías del extractor de gases, que rápidamente transporta los gases generados hacia el primer compartimento del reactor.

- (1) Extractor de gases
- (2) Inyección de  $\text{H}_2\text{SO}_4$  concentrado

# METODOLOGÍA EXPERIMENTAL RMT®

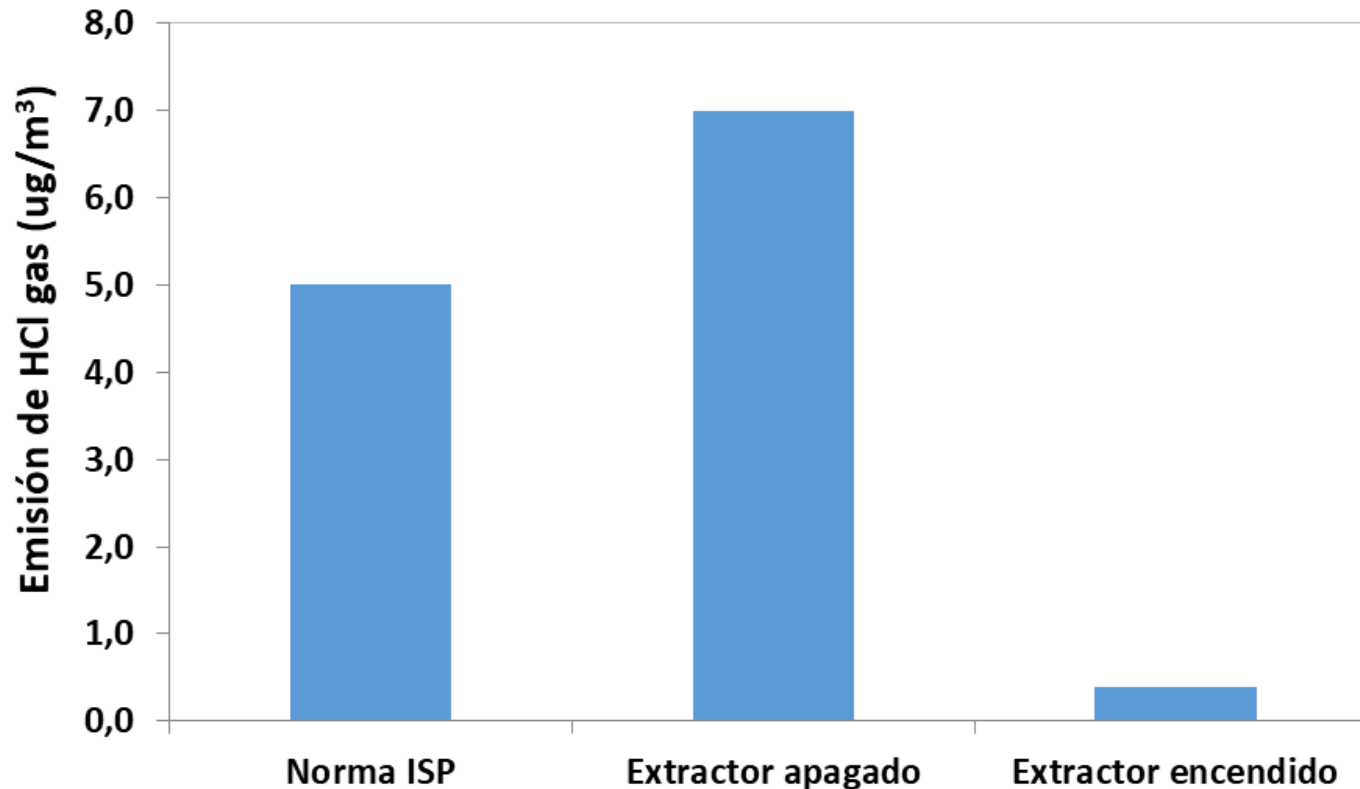


Sistema extractor de gases, que captura los gases generados en la segunda cámara y los transporta hacia la primera cámara, en la que se alimenta el mineral con el NaCl mejorando la cinética del proceso.

Los gases son impulsados con aire comprimido, lo que enriquece la mezcla con oxígeno, necesario para optimizar la reacción de formación de HCl.

# RESULTADOS RMT®

## CONTROL DE EMISION DE HCl AL AMBIENTE MEDIANTE EL USO DE RMT®



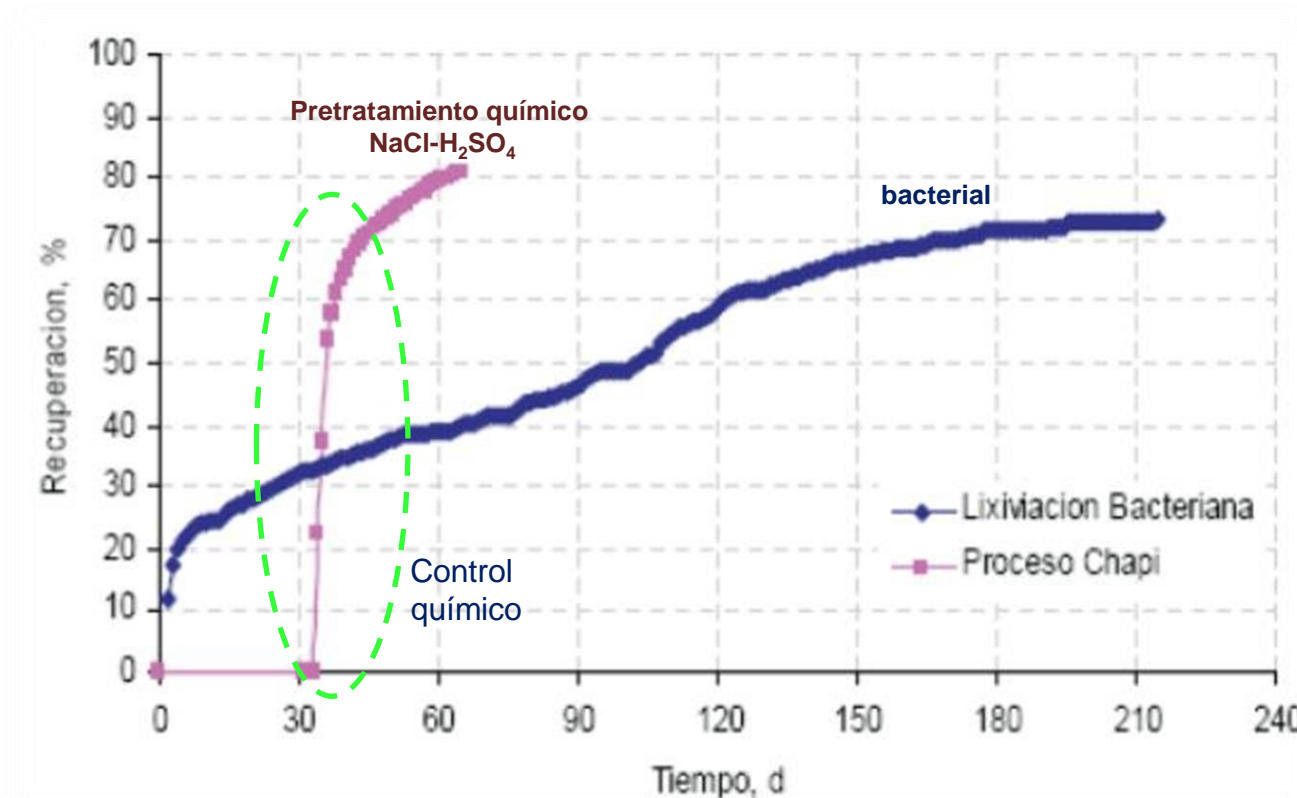
# Lixiviación con pretratamiento químico $\text{NaCl-H}_2\text{SO}_4$ (Milpo-Perú)





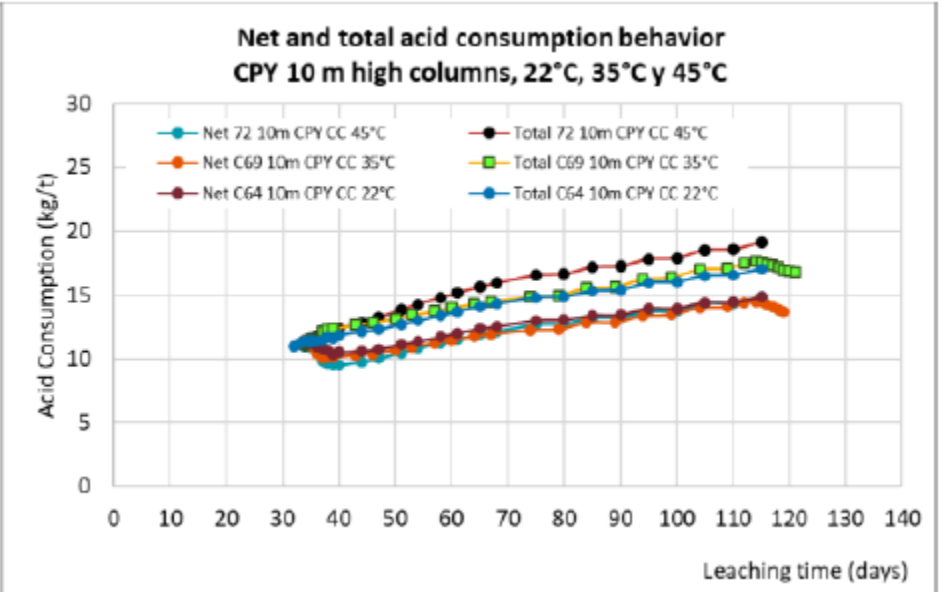
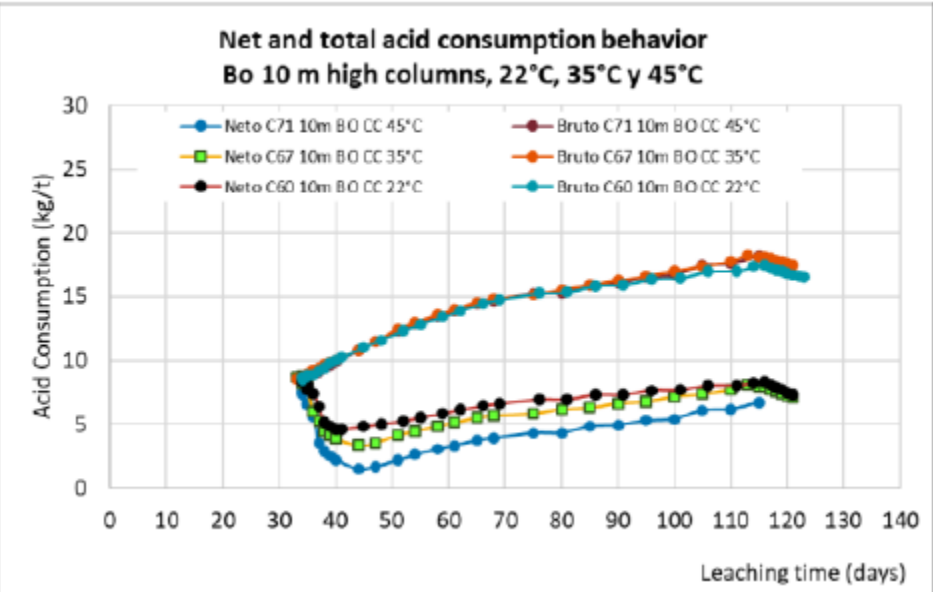
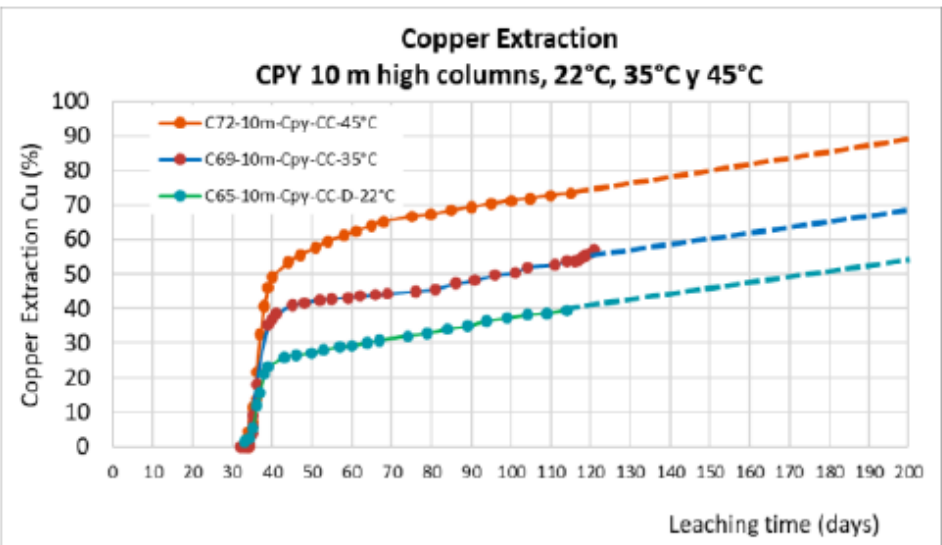
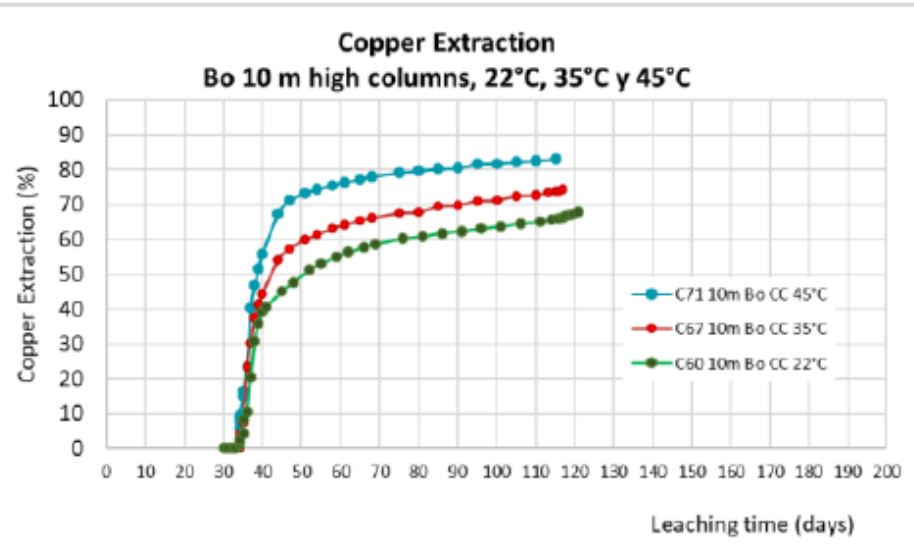
# Cinética con pretratamiento químico versus bacteriana Sulfuros de cobre secundarios (Proceso Chapi-LIX)

- Cinética de lixiviación de sulfuros de cobre ( $\text{Cu}_2\text{S}$  y  $\text{CuS}$ )



En medio cloruro ( $\text{NaCl}$  o  $\text{CaCl}_2$ )- $\text{H}_2\text{SO}_4$  se puede alcanzar un 90% de extracción de cobre en 90 días.

# Extracción de cobre y consumo de ácido sulfúrico para minerales de bornita (Bo) y Calcopirita (CPY). Ref. Jo et al, 2022.



# CONCLUSIONES

- El pretratamiento químico de minerales sulfurados de cobre con  $\text{NaCl-H}_2\text{SO}_4$ , primarios y secundarios, actualmente es una tecnología que se aplica industrialmente y no es un prototipo.
- Se ha aplicado con éxito y actualmente en operación en Spence (Calama, BHP), Cerro Colorado (Iquique, BHP), Zaldivar (Antofagasta, AMSA), Michilla (AMSA) y en la mediana minería en Amalia Catemu, Minera Tres Valles.
- En diferentes fases de la ingeniería en: Collahuasi, Pelambres, Codelco-DRT, Codelco-DGM, Biocobre, entre otras.
- Las extracciones de cobre promedio desde sulfuros secundarios es de 90% y desde primarios 70%, con reposo de 7 a 30 días dependiendo de la mineralogía.

# CONCLUSIONES

- El ciclo de lixiviación dura entre 100 y 150 días.
- Para lograr el 70% o más de extracción de cobre desde sulfuros primarios se requiere una temperatura en el lecho de mineral de 30 °C a 45 °C, dependiendo de la temperatura del ambiente (día/noche y estacionalidad).
- En la lixiviación de minerales de óxidos de cobre, se observa un aumento de la extracción de cobre cuando existe la presencia de mineralogías de óxidos complejos (copper wad y copper pitch).
- En general, para todos los óxidos de cobre, la tecnología permite una disminución del consumo neto de ácido sulfúrico que puede alcanzar hasta un 20%.

# AVANCES EN LA TECNOLOGÍA DE PRETRATAMIENTO DE MINERALES SULFURADOS MEDIANTE EL USO DEL PRETRATAMIENTO QUÍMICO CON $\text{NaCl-H}_2\text{SO}_4$

Preparado por: Jorge Ipinza<sup>1</sup>, Dr. Sc., Ingeniero Civil Metalúrgico

(1) Gerente de Desarrollo y Nuevas Tecnologías, Foster Ingenieros Consultores S.A.

**Enero 30 del 2023**