

# Impacto de las Arcillas en el Tratamiento de Minerales

CON EL AUSPICIO DE:





**UNIVERSIDAD TÉCNICA FEDERICO SANTA MARÍA**  
**DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA METALÚRGICA Y DE MATERIALES**

# **LAS ARCILLAS EN EL NEGOCIO MINERO DEL COBRE**

**Jorge Ipinza Abarca, Dr. Sc.**  
**Ingeniero Civil Metalúrgico**



# TEMARIO

- Las arcillas en el negocio minero
- Caracterización de las arcillas
- Las arcillas en las plantas concentradoras
- Las arcillas en la hidrometalurgia
- Conclusiones



# LAS ARCILLAS EN EL NEGOCIO MINERO





# CARACTERIZACIÓN DE LAS ARCILLAS



# CARACTERIZACIÓN DE LAS ARCILLAS

- En la naturaleza no es común encontrar minerales de arcilla en mezclas homogéneas de grupos individuales.
- En su lugar, comprenden conjuntos de minerales de arcilla de capa mixta con contrastes de estructuras, distancias basales, diferente desplazamiento de capa o rotación entre capas.
- Ejemplos comunes de capas de mezclas de arcilla son illita-esmectita, mica-vermiculita, mica-esmectita, clorita-vermiculita, caolinita-esmectita, entre otras (Barton et al., 2000).

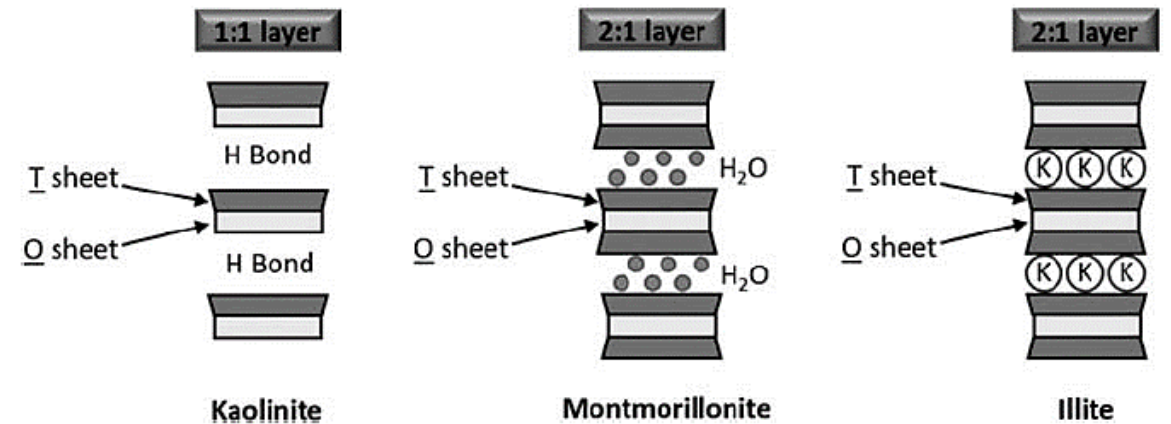


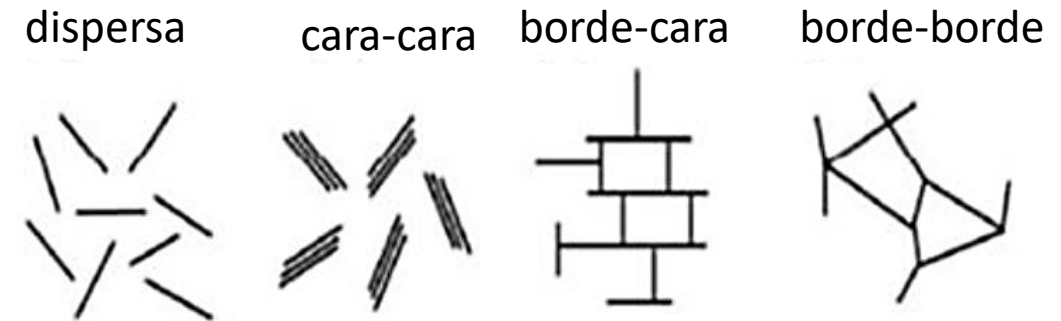
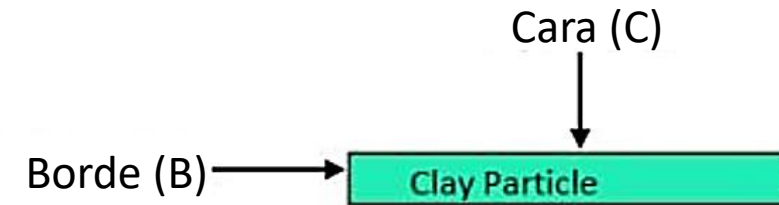
Ilustración de algunas estructuras de arcillas  
(Deer et al, 1992)



# CARACTERIZACIÓN DE LAS ARCILLAS

- Las superficies de los minerales de arcilla son anisotrópicos y con morfología de plata, esto significa que las partículas de arcilla tienen un borde y una cara con diferentes características.
- La cara de la arcilla es la de mayor superficie y menor espesor.
- La cara de los minerales de arcilla se caracteriza por una carga superficial negativa, independiente del pH, que resulta en una sustitución isomorfa de cationes en las capas de arcilla con cationes de valencia baja.
- El tetrahedro  $\text{Si}_4^+$  normalmente se sustituye con  $\text{Al}^{3+}$ .

Ilustración de partícula de arcilla con borde y cara



[Modificado de Luckham et al, 1999]





# CARACTERIZACIÓN DE LAS ARCILLAS

- De la misma forma en la capa octahédrica de la arcilla el  $\text{Al}^{3+}$  es sustituido por  $\text{Mg}^{2+}$  o  $\text{Fe}^{2+}$ .
- Los bordes de la partícula de mineral de arcilla, puede llevar una carga negativa o positiva, dependiendo de las condiciones de acidez o alcalinidad.
- Sin embargo, la carga resultante de la arcilla en la mayoría de las condiciones comunes de la flotación es negativa (Basnayaka et al, 2018).
- Las asociaciones c-c, b-b y c-b, se producen por fuerzas atractivas de Van der Waals y fuerzas electroestáticas que existen en las partículas en suspensión.
- La viscosidad de la suspensión es proporcional al número de estas uniones b-c y b-b y a la fuerza de las uniones individuales.



# LAS ARCILLAS EN LA PLANTA CONCENTRADORA



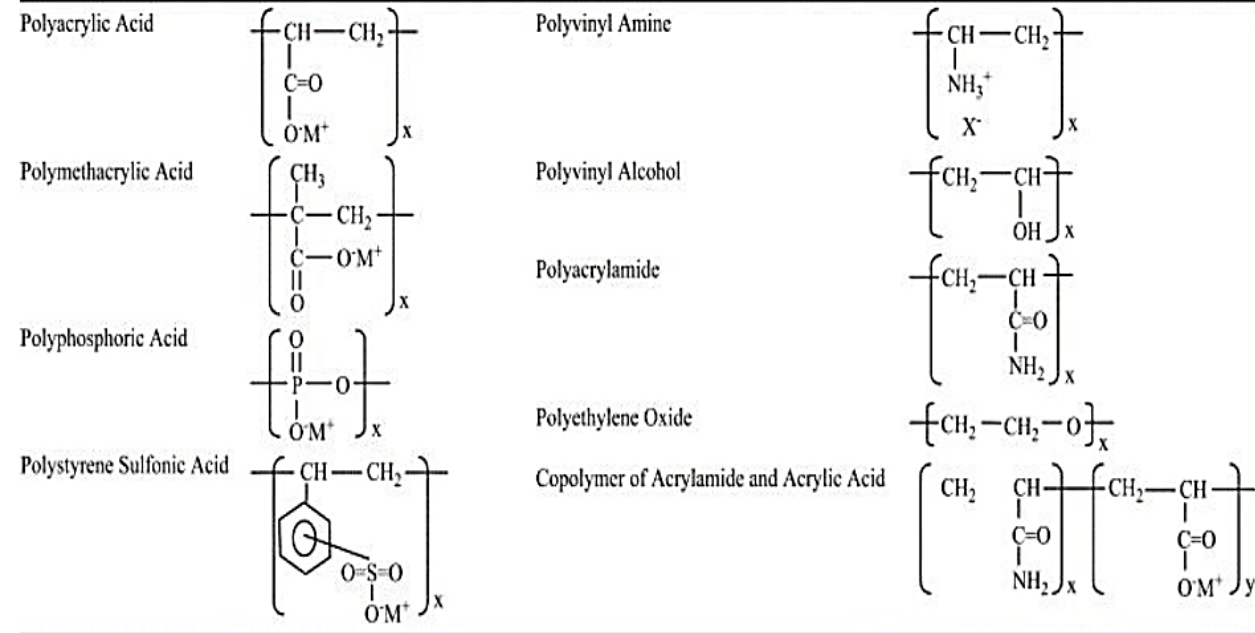
# EFECTO DE LAS ARCILLAS EN CONMINUCIÓN

- La presencia de arcilla en el mineral disminuye la eficiencia del circuito de chancado y molienda, debido a su adherencia en las placas del chancador de mandíbula y en las paredes del chancado de cono giratorio. Se ha recomendado clasificar los finos y alimentarlos directamente a los molinos de bolas (Connelly, 2011).
- La presencia de minerales de arcilla modifica la reología de la pulpa, incrementando la viscosidad aparente y el esfuerzo de fluencia. El aumento de la tensión de fluencia en la pulpa aumenta el consumo de energía y dificulta la tasa de fractura de partículas (Grafe et al, 2017).
- Debido a la mayor viscosidad causada por las arcillas, los molinos deben operar con un menor %S, que disminuye la eficiencia de molienda y la capacidad de tratamiento de mineral (Tangsathitkulchai, 2003).
- Cabe destacar que el efecto de viscosidad en la eficiencia de molienda es más significativo durante la molienda de ultrafinos (Shi and Napier-Munn, 2002).



# EFECTO DE LAS ARCILLAS EN CONMINUCIÓN

- Los altos esfuerzos de fluencia y viscosidad aparente en conminución se pueden reducir usando reactivos ayuda molienda (Wang and Forssberg, 1995; Klimpel, 1999; Somasundran et al, 1988).
- La aplicación del biopolímero PIONERA modifica efectivamente la viscosidad en la molienda, mejorando significativamente su eficiencia (Lauten et al, 2014).



(Klimpel, 1999)



# ARCILLAS Y SUS EFECTOS EN LA FLOTACIÓN

## Grupo de la caolinita

- Típicamente 1:1
- Aumento del atrapamiento de ganga
- Incremento de la viscosidad de suspensión solo a altas concentraciones (por encima del 10%)

## Grupo de la esmectita

- Normalmente 2:1
- Uno de los minerales de arcilla más problemáticos en el procesamiento de minerales
- Aumenta la viscosidad de la pulpa aún a bajas concentraciones (4%)

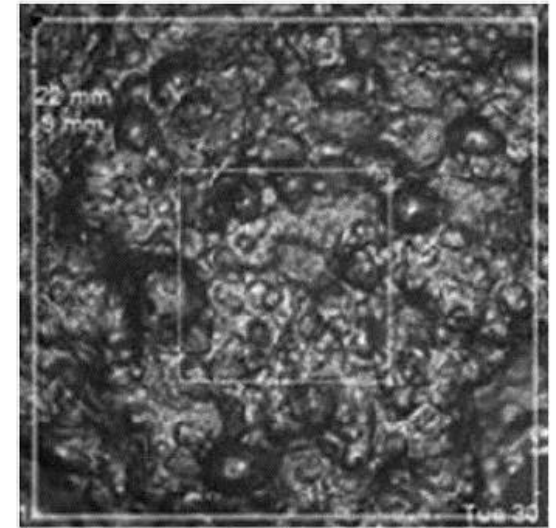
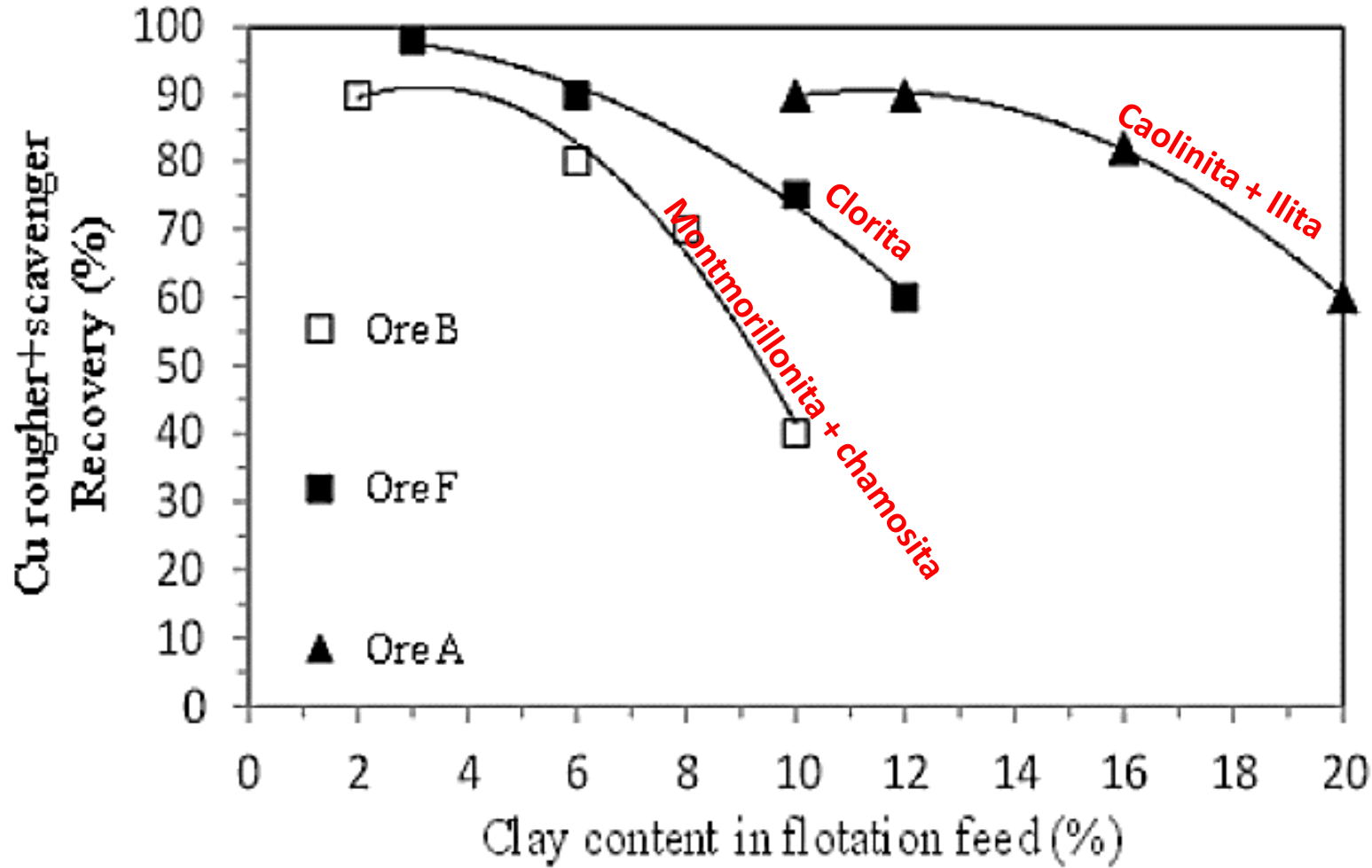
## Grupo de la illita

- Del tipo 2:1
- Tiene efectos menos negativos en el procesamiento de minerales, la viscosidad no se afecta drásticamente, solo a concentraciones cercanas a 25% comienza a ser un problema relevante.

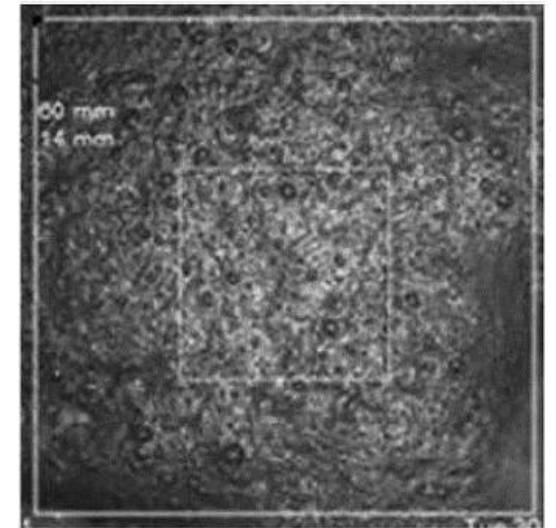


**Casa de bombas en Minera Chuquicamata afectada por un proceso de pobre floculación**

# ARCILLAS Y SUS EFECTOS EN LA FLOTACIÓN



0% Kaolinite

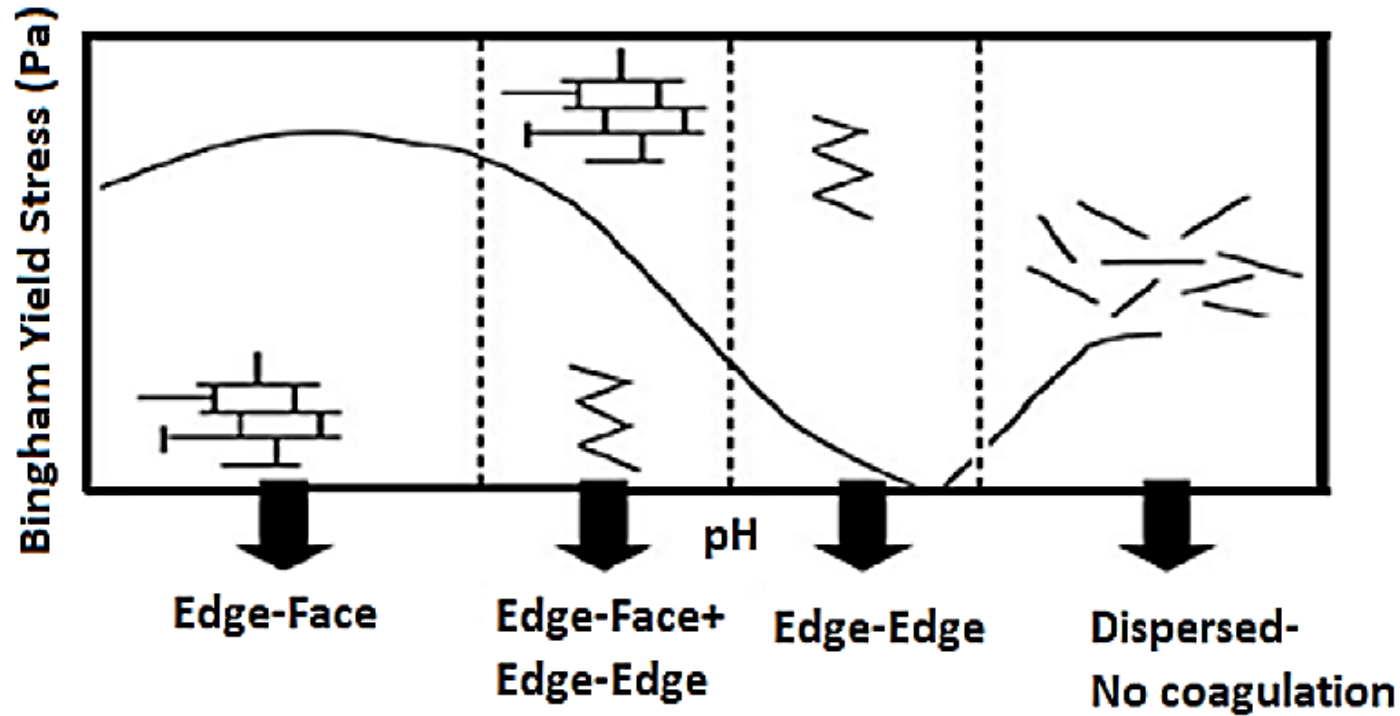


25% Kaolinite

(Bulatovic, Wyslouzil and Kant, 1999)

(Wang et al. 2015b)

# AGRUPACIONES DE ARCILLAS



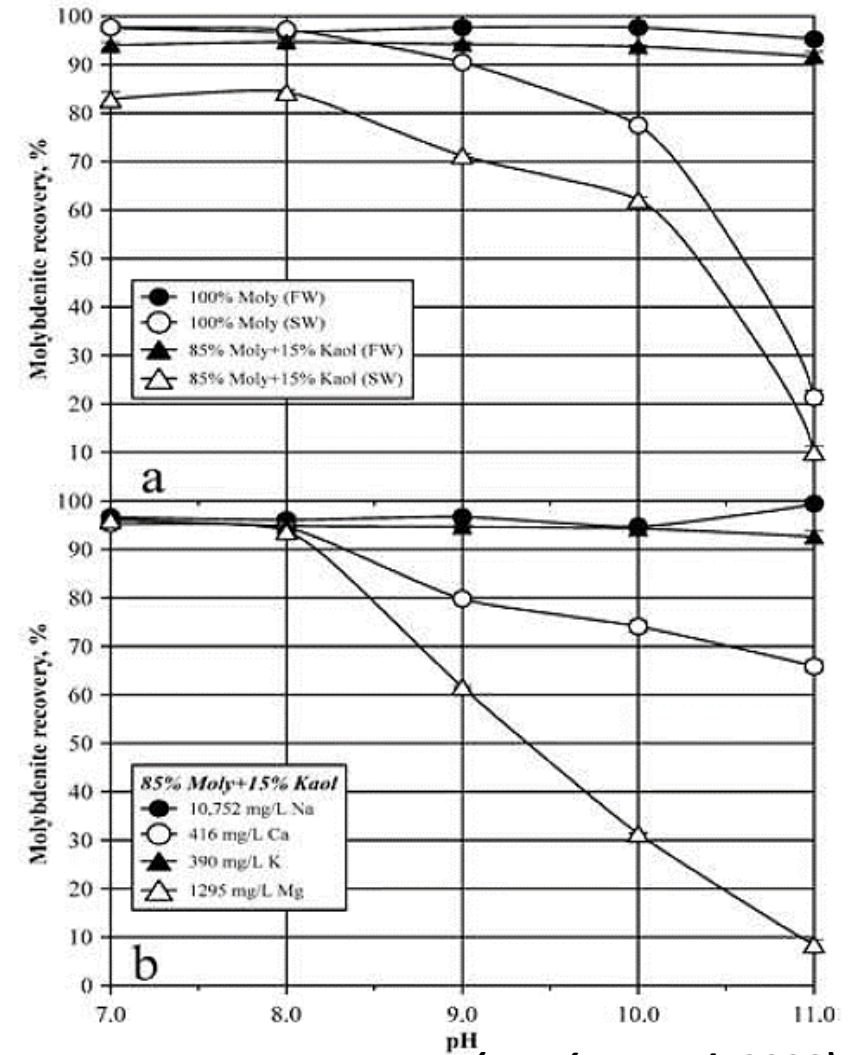
Tipo de relave	Esfuerzo de fluencia [Pa]	Viscosidad [mPa.s]	Concentración en sólidos (w/w) [%]
Normal (poca arcilla)	< 10	< 20	55 - 62
Ligeramente arcilloso (3 - 10%)	10 - 30	10 - 50	50 - 60
Nivel medio de arcilla (10 - 30%)	30 - 100	30 - 100	48 - 55
Fuertemente arcilloso (> 30%)	> 100	> 100	40 - 50

Interpretación del efecto del pH sobre el esfuerzo de fluencia de Bingham y sobre las partículas de caolinita con diferentes agrupaciones (Modificado de Ndlovu et al. 2011).



# ARCILLAS EN LA FLOTACIÓN DE MINERALES

- Efectos negativos de las arcillas: recubrimiento superficial de las partículas y formación de redes estructurales en la pulpa, incrementando su viscosidad y atrapamiento de ganga que reduce la recuperación y ley del concentrado (Cheng et al, 2018).
- La flotabilidad de la CPY usando el colector PAX fue estudiada en presencia de **caolinita** y **esmeclita** a pH 9 y 10. Mayor efecto negativo de las arcillas a pH 10, por probable acción del  $\text{Ca}^{2+}$  (cal) que promueve la coagulación entre la CPY y la arcilla (Uribe et al, 2016).
- Efectos de depresión del Mo por la **caolinita** en agua de mar es más evidente a  $\text{pH} > 9,0$ , debido a la heterocoagulación entre la Mo y caolinita, asociado a la formación de hidroxilo complejos de Mg y Ca (Ramírez et al, 2020).



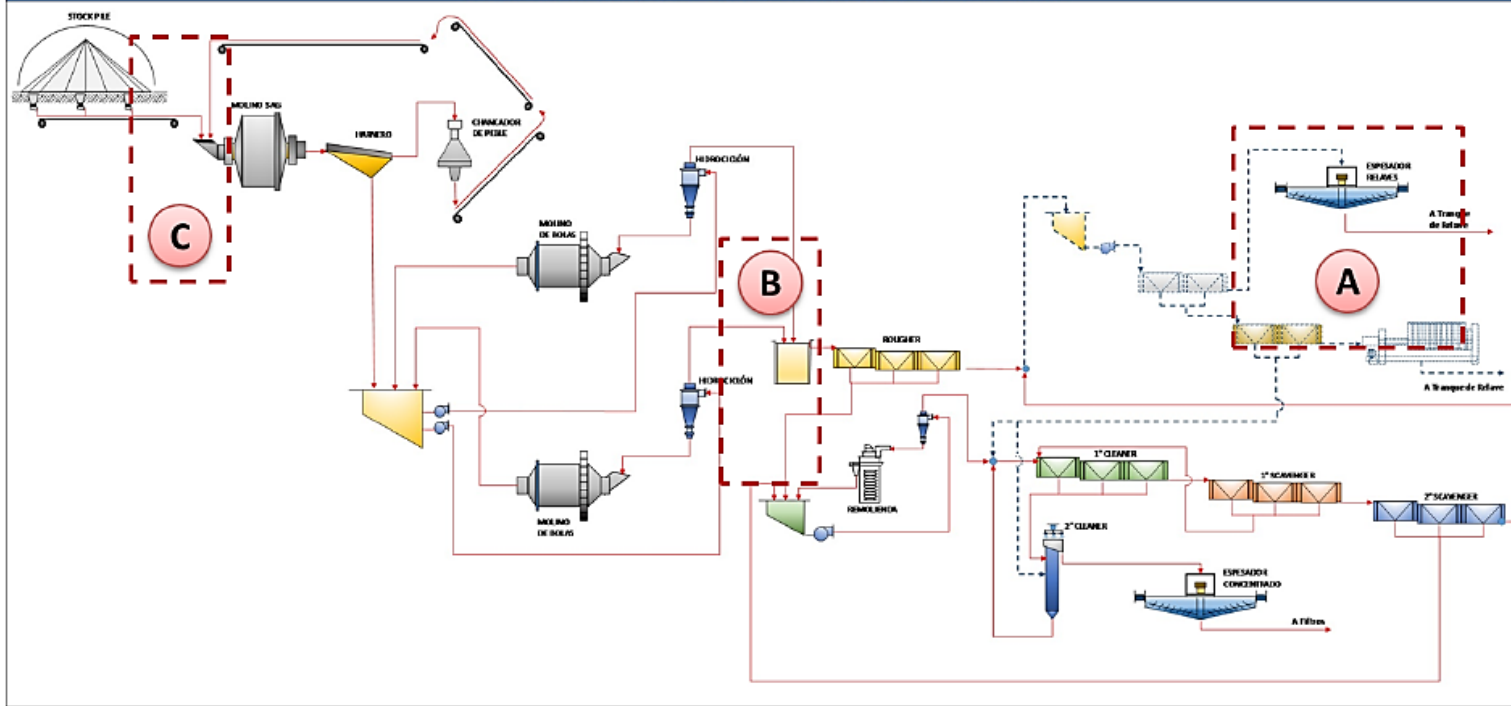
FW: agua fresca, SW: agua de mar

(Ramírez et al, 2020)



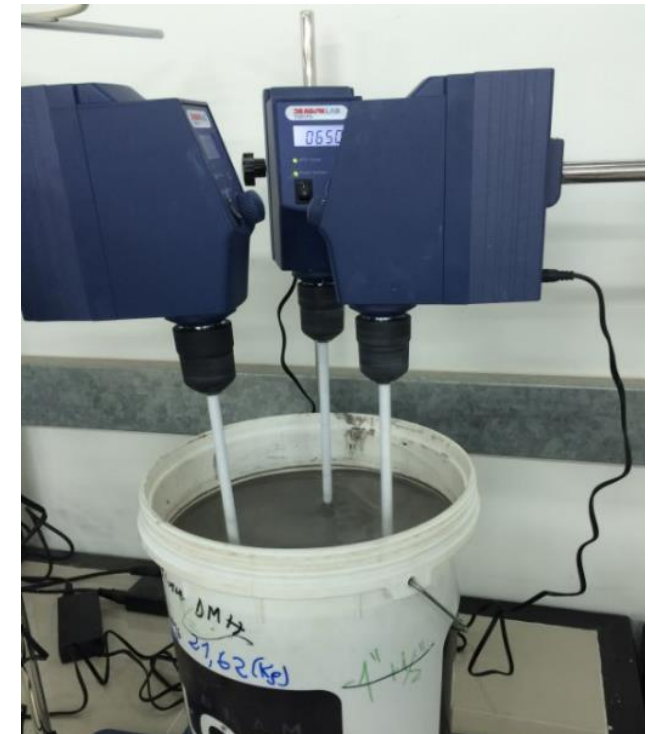
# SEPARACIÓN TEMPRANA DE ARCILLAS

CIRCUITO CONVENCIONAL DE MOLIENDA-FLOTACIÓN PARA METALES - ALTERNATIVA 3



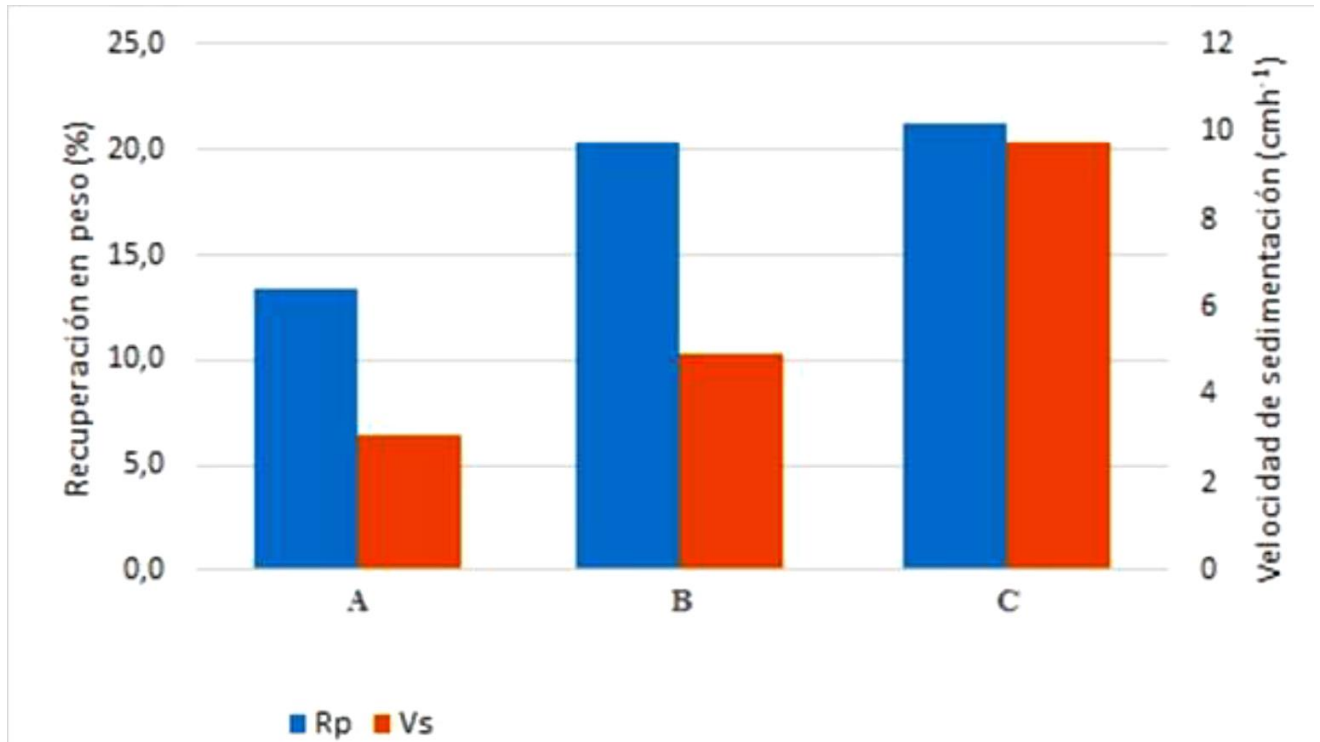
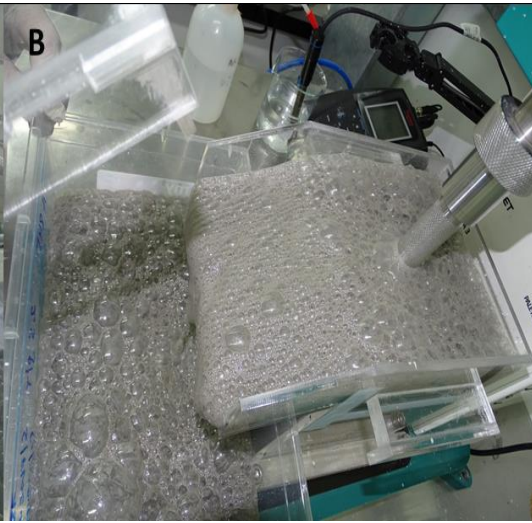
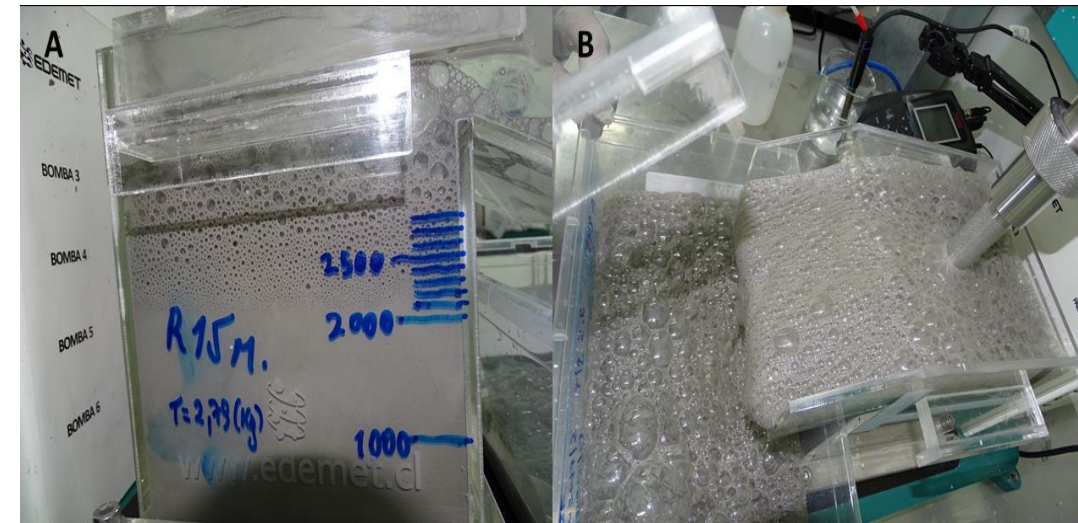
- C** Flotación selectiva de arcillas de finos antes del SAG. Aumentar la capacidad de tratamiento del SAG y mejorar las conductas de feed-back.
- B** Flotación selectiva de arcillas de finos en over del ciclón. Aumentar la capacidad de tratamiento de los molinos de bolas y mejorar las conductas de flotación.
- A** Flotación selectiva de arcillas de relave antes del espesamiento de relave para mejorar la conducta de sedimentación y aumentar la altura de agua clara.

CYTEC	ALKOMIN
<ul style="list-style-type: none"> <li>• 25 <math>gt^{-1}</math> de colector AERO 845®</li> <li>• 8 <math>gt^{-1}</math> de coagulante Magnafloc 7793 LT</li> <li>• 8 <math>gt^{-1}</math> de espumante AEROFROTH 70 MIBC</li> <li>• 30 <math>gt^{-1}</math> de floculante SF E 4833 Kemira.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 80 <math>gt^{-1}</math> de colector P342Ar</li> <li>• 50 <math>gt^{-1}</math> de floculante SF E 4833 Kemira.</li> <li>• Sin coagulante</li> <li>• Sin espumante</li> </ul>



[Cruz & Ipinza, 2016]

# FLOTACIÓN INVERSA DE ARCILLAS

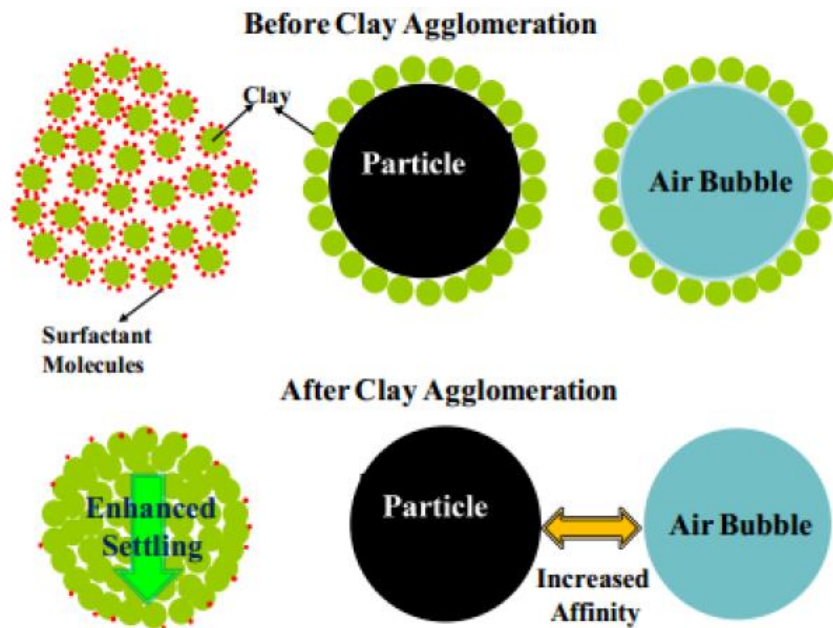


Flotación de relaves con distintas dosis de floculante Kemira a una dosis de colector de 25 g/t de AERO 845<sup>®</sup> contrastado con presencia de coagulante (A) sin floculante ni coagulante (B) sólo floculante (20 g/t) y (C) floculante (30 g/t) + coagulante (8 g/t)

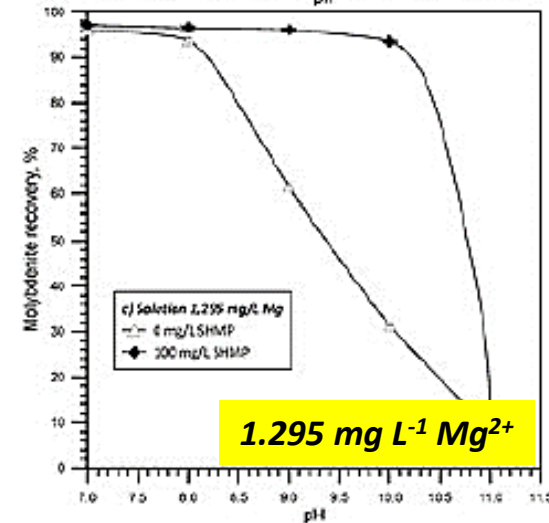
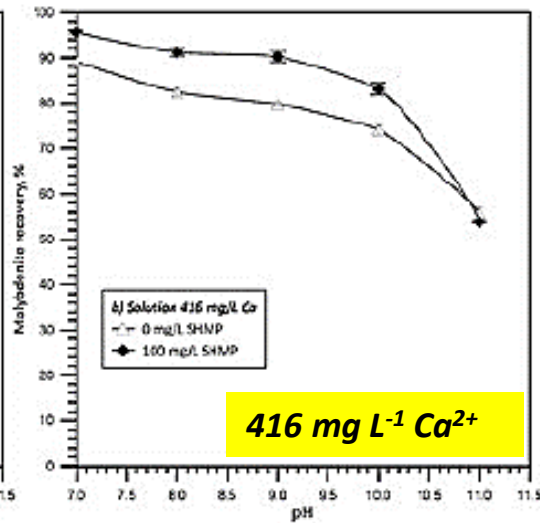
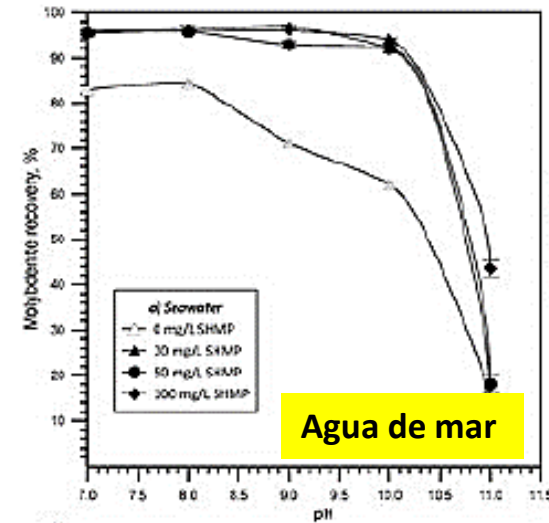
[Cruz & Ipinza, 2016]

# USO DE REACTIVOS DISPERSANTES

- Uso de MIBC y diésel como colector y hexametáfosfato de sodio (SHMP) como dispersante. El pH se ajustó con NaOH.
- La recuperación de Mo en agua de mar muestra un aumento de 15 puntos porcentuales cuando se adiciona SHMP (20 mg L<sup>-1</sup>), lo que resulta más significativo a pH > 9.



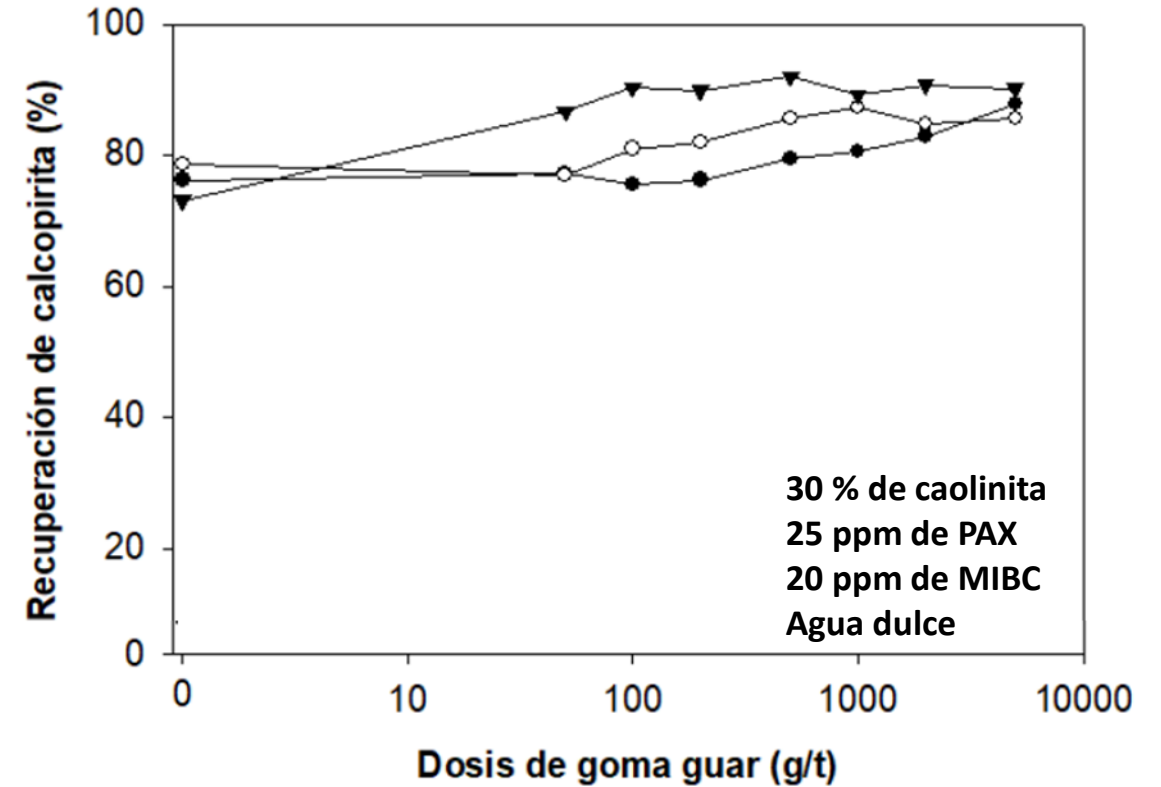
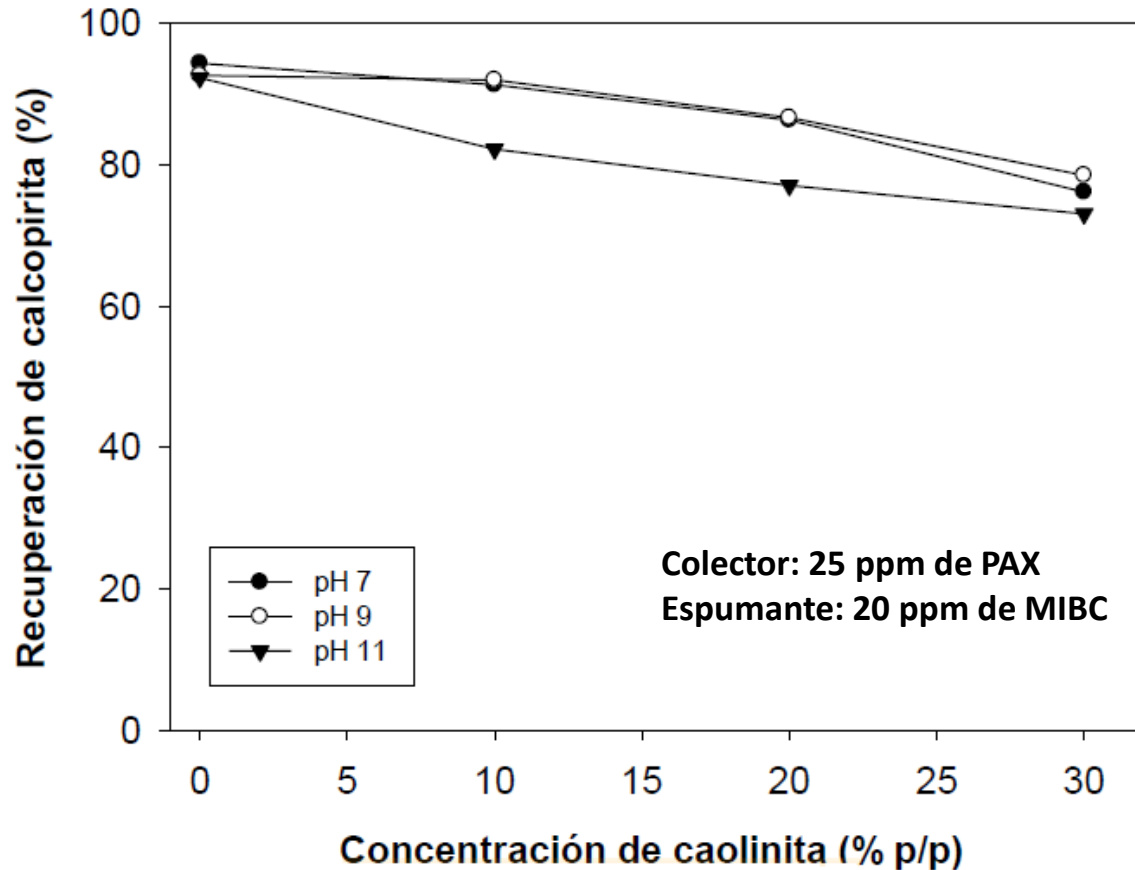
(Tao et al, 2010)



(Ramírez et al, 2020)



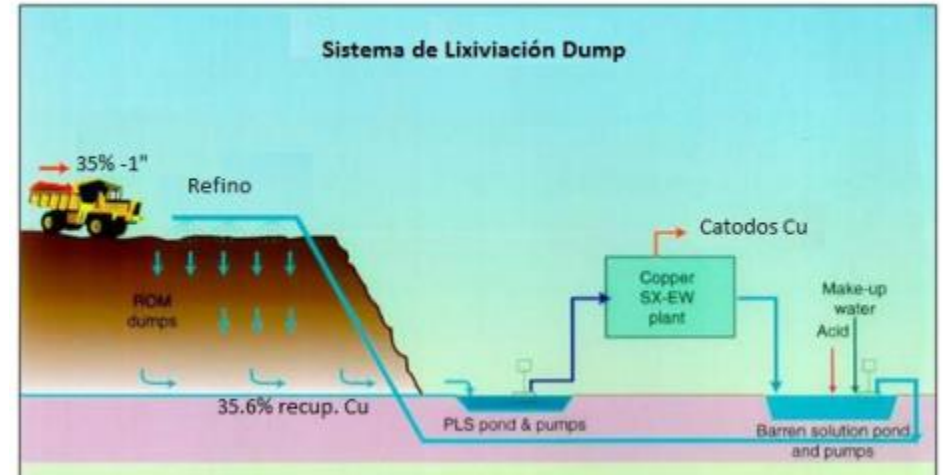
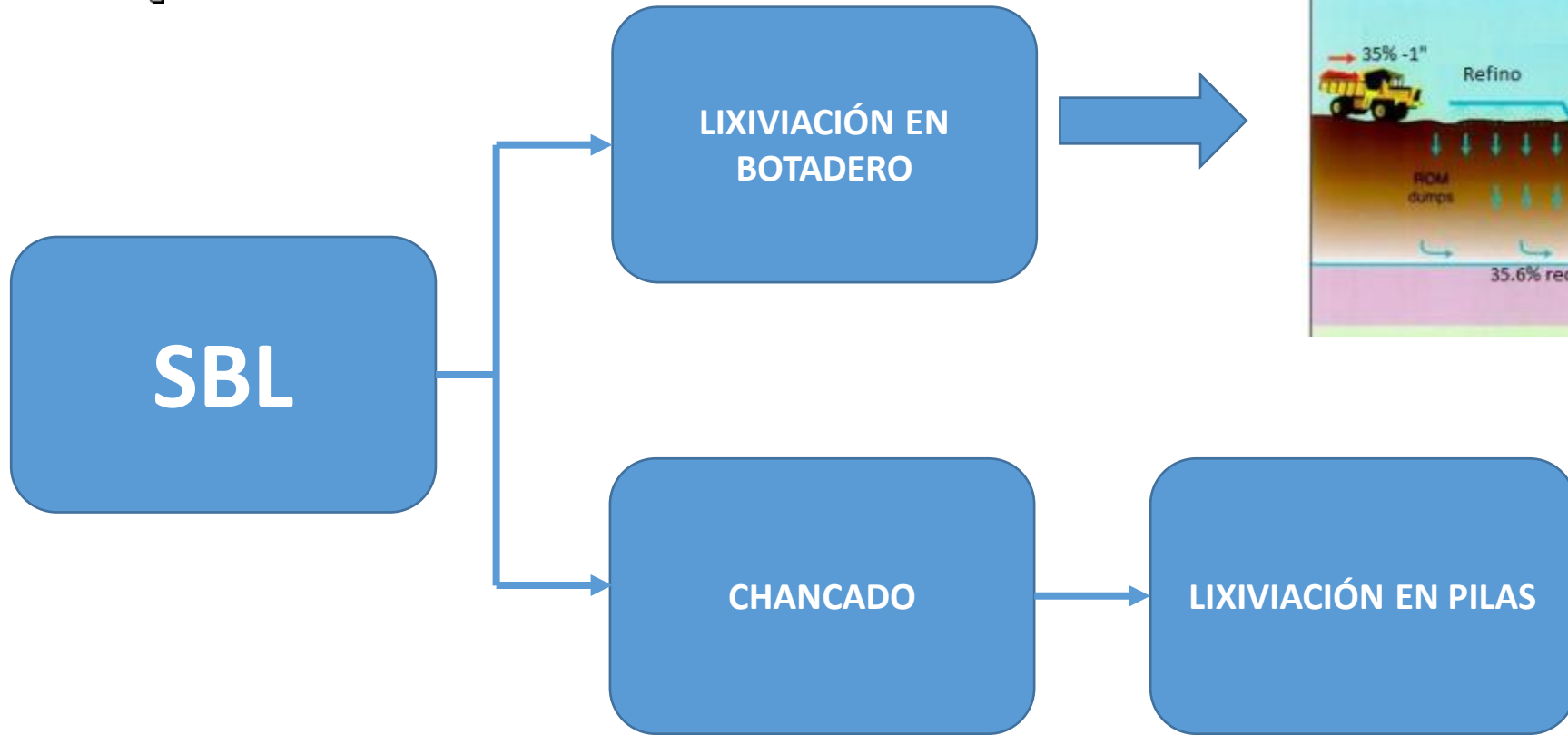
# USO DE REACTIVOS FLOCULANTES



[Jeldres, 2017]



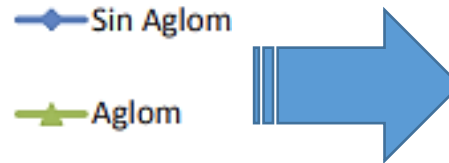
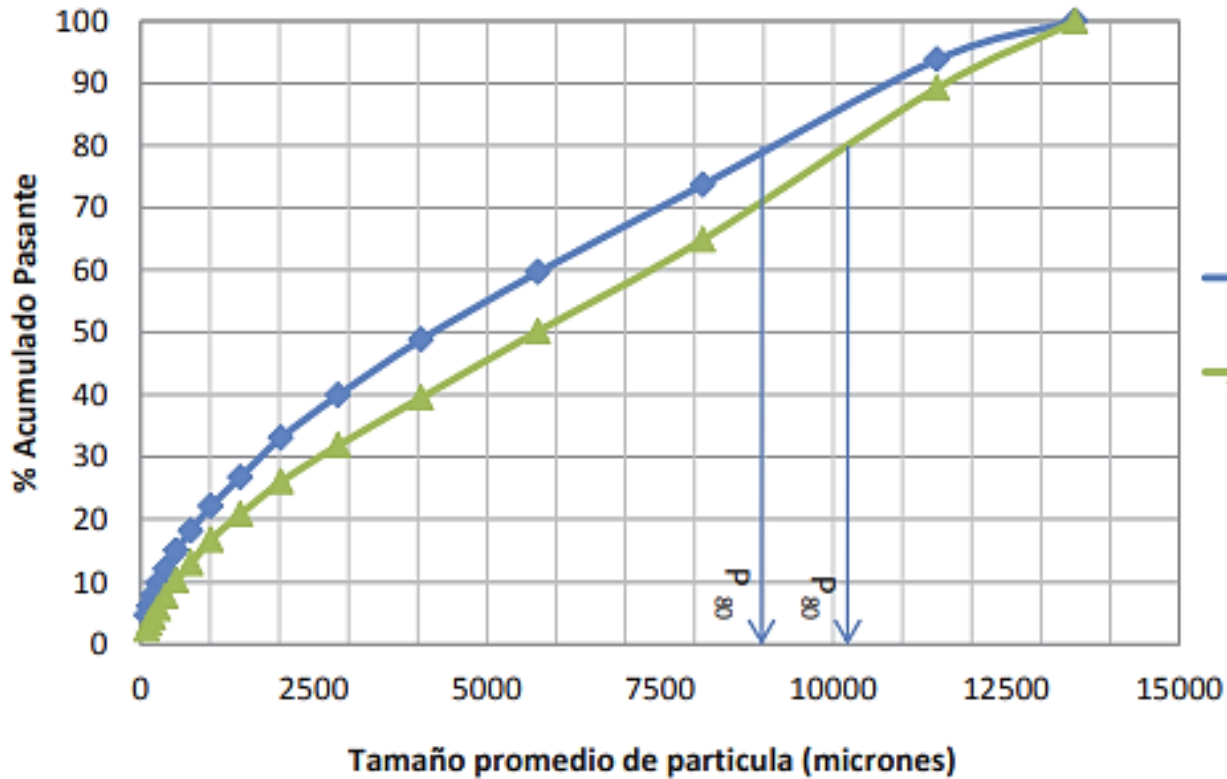
# LAS ARCILLAS EN LA HIDROMETALURGIA





# SIN Y CON AGLOMERADO

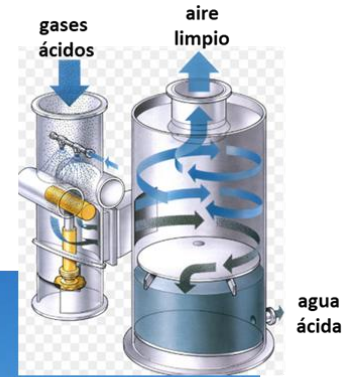
## Granulometría SBL - Comparativa



### Reactor RMT®

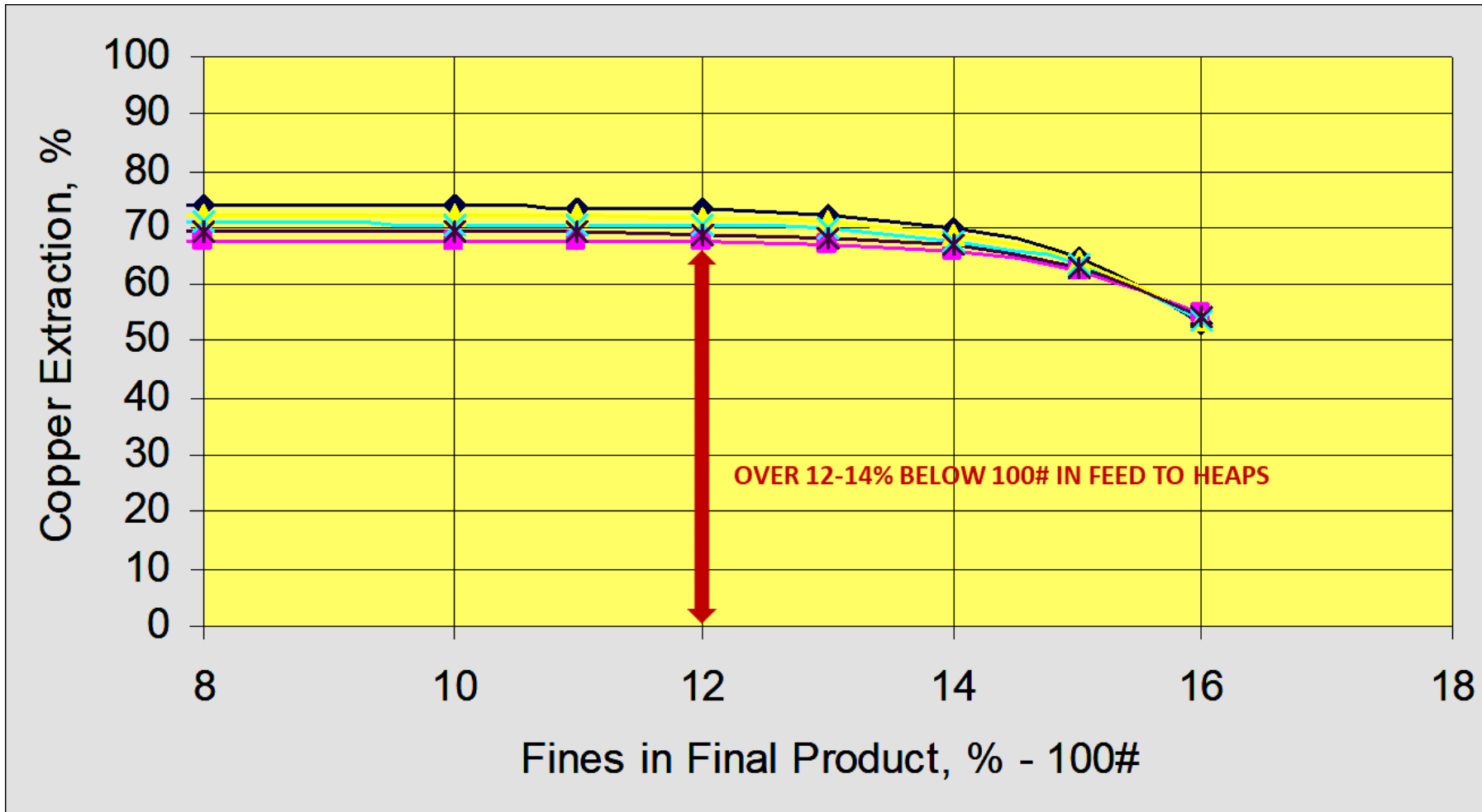


### Tambor Aglomerador + Scrubbers





# CAÍDA DE LA EXTRACCIÓN DE COBRE



## EFFECTO DEL AGLOMERADO CON FINOS EN LA LIXIVIACIÓN

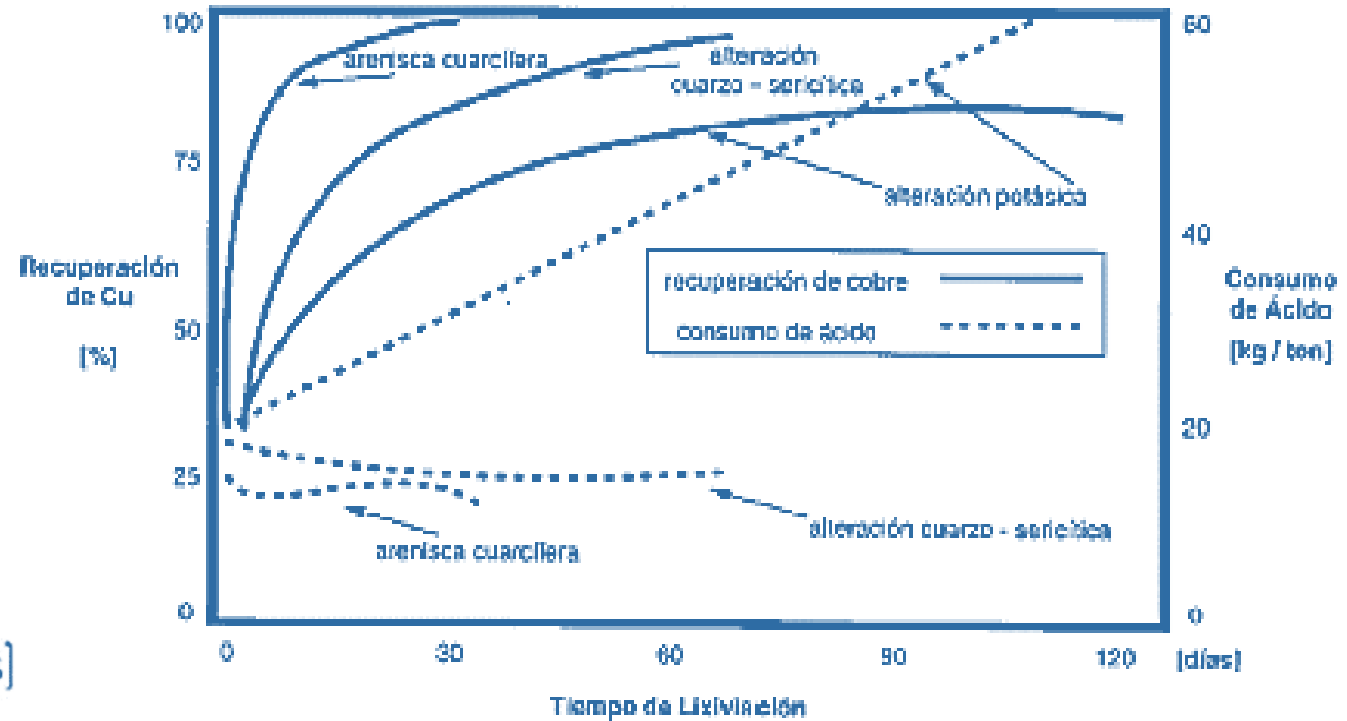
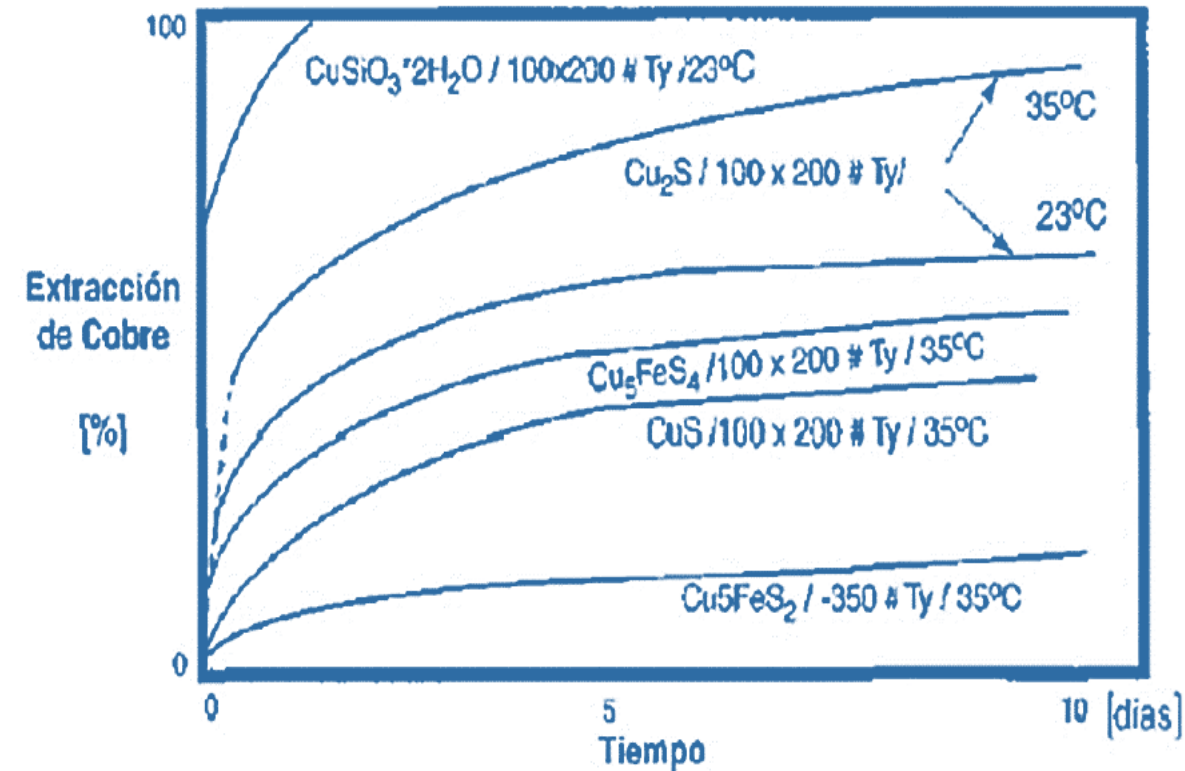
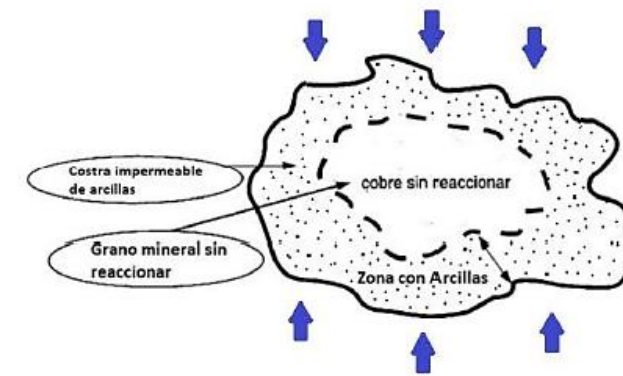
- Menor conductividad hidráulica
- Mayor asentamiento
- Menor porosidad
- Mayor tortuosidad

*Ref. C. Otárola. (1998). Fines Control in the Cerro Colorado Mine and Crushing Plant, Reporte Interno N° 1*

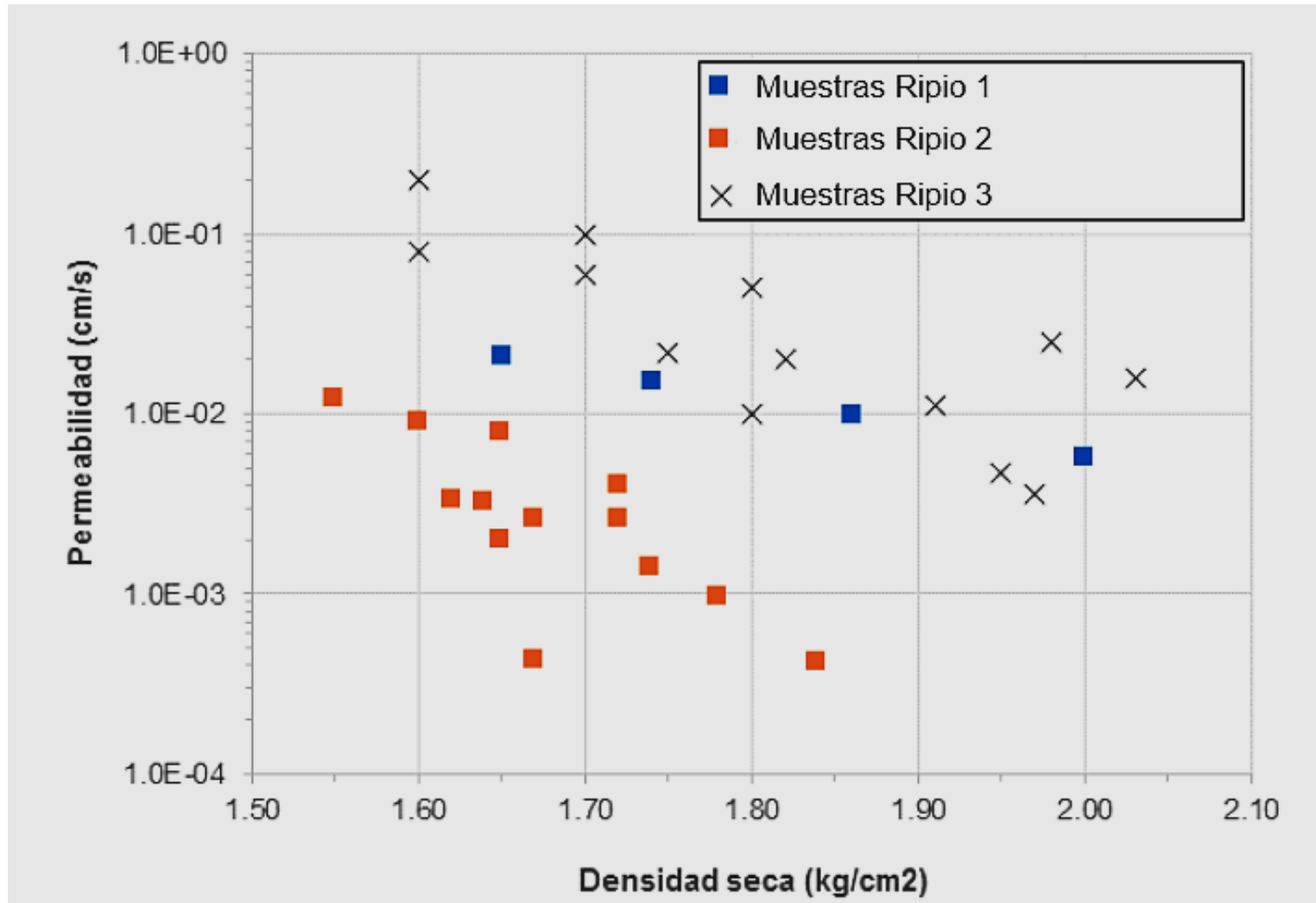




# CAÍDA DE LA EXTRACCIÓN DE COBRE



# CAÍDA DE LA EXTRACCIÓN DE COBRE

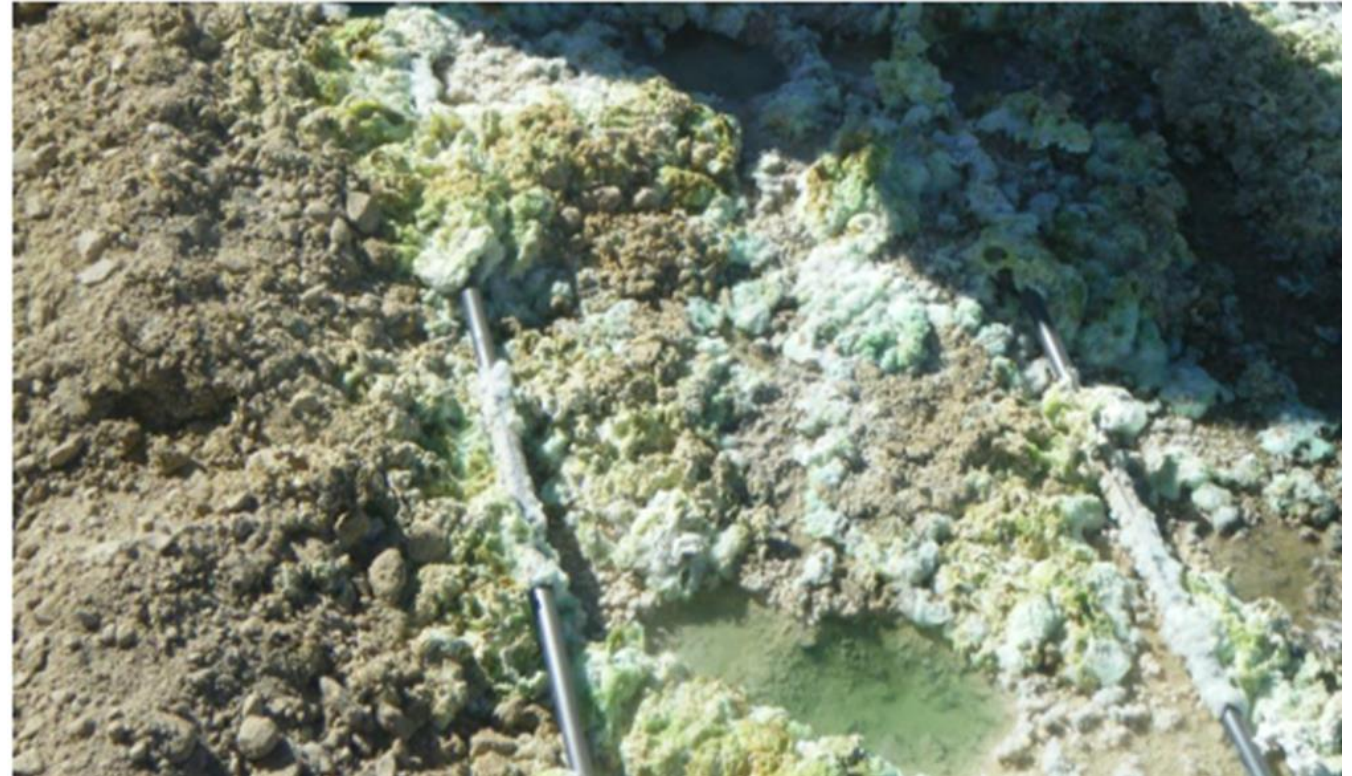


*Deslizamiento en los taludes por efecto de riego en exceso o mal drenaje del depósito.*



# CAÍDA DE LA EXTRACCIÓN DE COBRE

Solución acumulada en la superficie que podrían estar asociadas a materiales con alto contenido de finos.





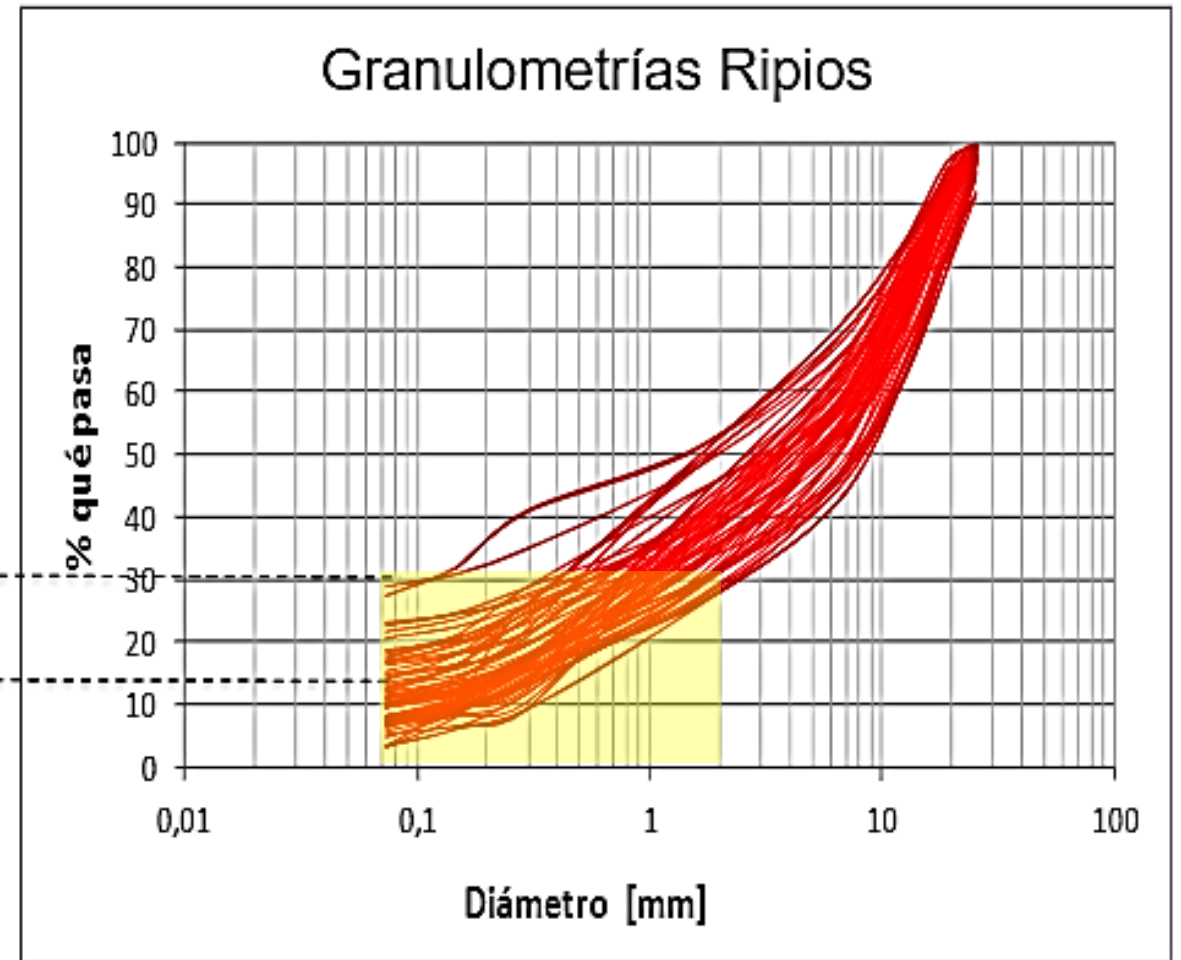
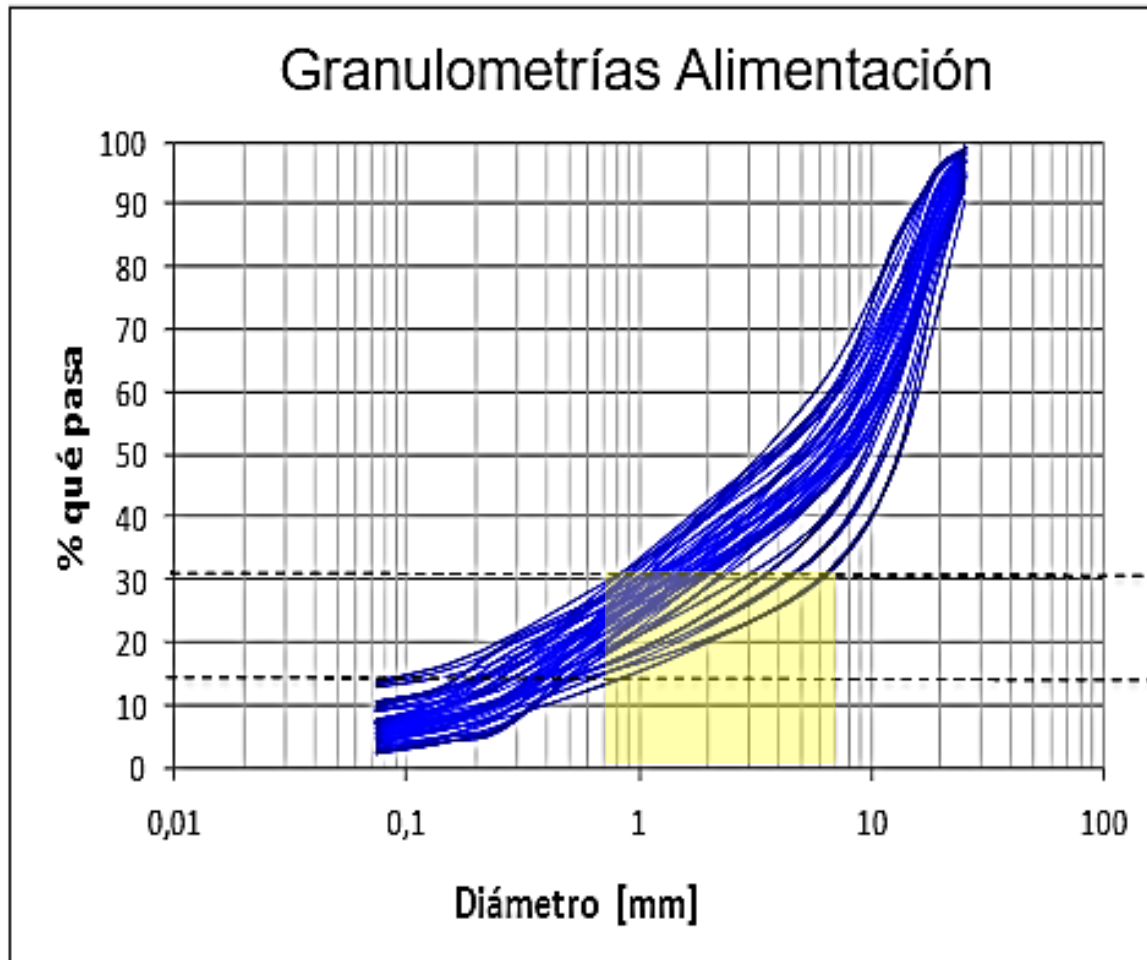
# OBSERVACIONES DE LIXIVIACIÓN DE BOTADEROS

- APOZAMIENTO EN LA SUPERFICIE DEL BOTADERO



# RETRATAMIENTO DE BOTADEROS DE RIPIOS

## CONTROL OPERACIONAL DE FINOS (% - 200 MALLAS ASTM)

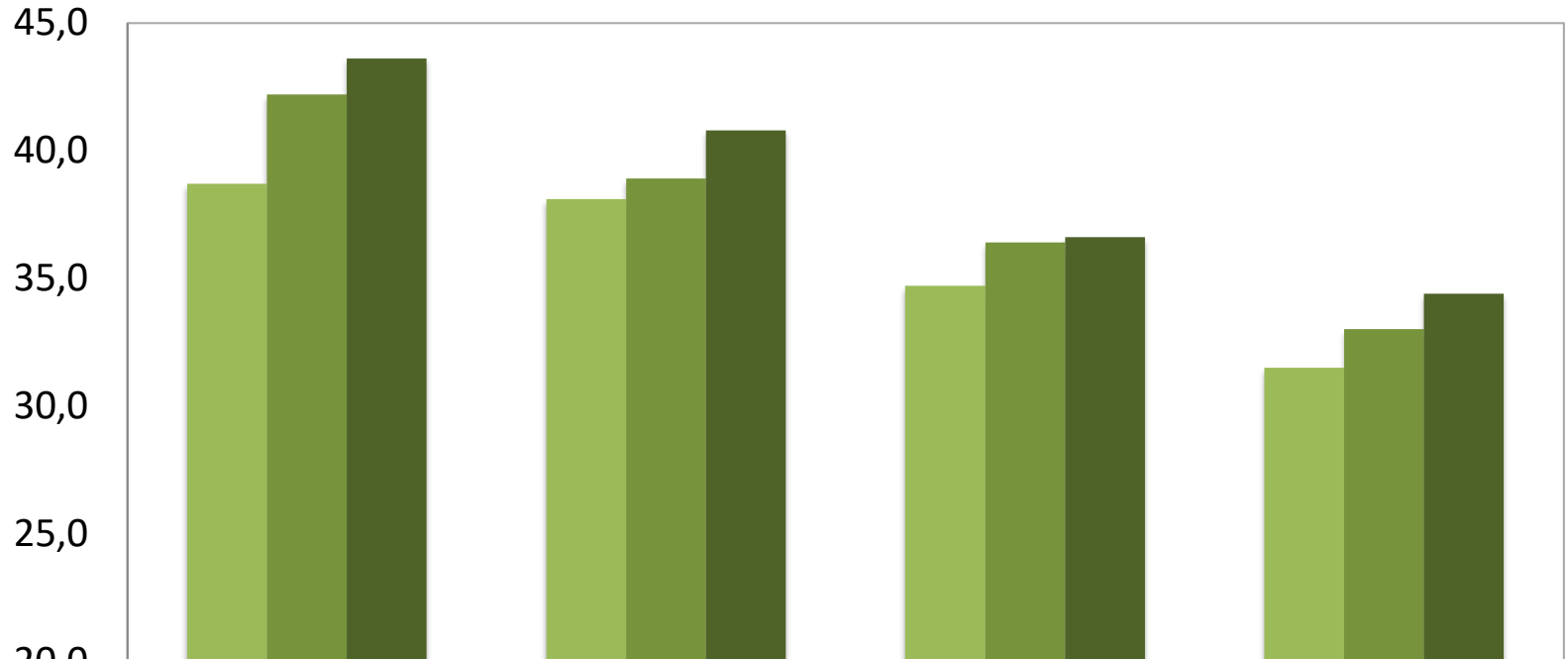


# RETRATAMIENTO DE BOTADEROS DE RIPIOS

## CONTROL OPERACIONAL DE FINOS (% - 200 MALLAS ASTM)



Ángulo de reposo [°]



Contenido de arcilla [%]

	0	5	15	20
■ Sin aditivos	38,7	38,1	34,7	31,5
■ CaCO <sub>3</sub> (RC) - 10 Kg/t	42,2	38,9	36,4	33,0
■ CaCO <sub>3</sub> (RC) - 10 Kg/t + AR-Globinder 60 - 50 ppm	43,6	40,8	36,6	34,4

[Ipinza, 2019]

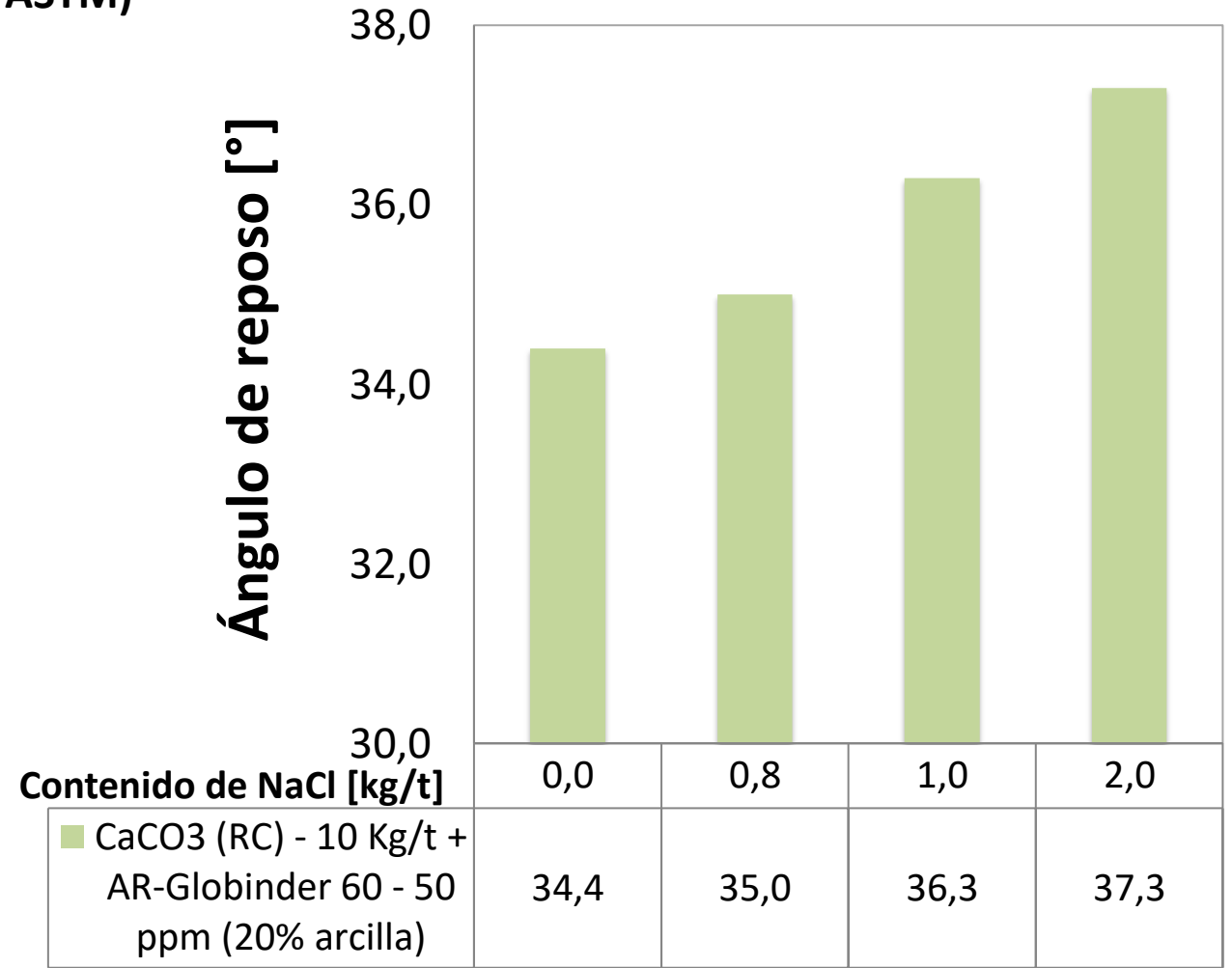


# RETRATAMIENTO DE BOTADEROS DE RIPIOS

## CONTROL OPERACIONAL DE FINOS (% - 200 MALLAS ASTM)

Aditivo	Valor	Concentración	Valor por tonelada
AR-Globinder 60	3,3 USD/Kg	50 mg/L	0,165 USD
CaCO <sub>3</sub> (RC)	28,0 USD/t	10 Kg/t	0,279 USD

[Ipinza, 2019]





# CONCLUSIONES





# CONCLUSIONES

- Las arcillas en los minerales constituyen un desafío para repensar los procesos y la adopción de nuevas tecnologías y reactivos.
- Entender cómo las complejidades geometalúrgicas pueden afectar: los diseños mineros (selectividades), los procesos (circuitos, recuperación, selectividad), los diseños hidráulicos (sedimentación, reológica), la operación (PEM retrasadas).
- Las caídas de producción (concentrados o cátodos) y los incrementos de OPEX son un incentivo para innovar en equipos y nuevos procedimientos para el óptimo procesamiento de minerales arcillosos.



Muchas Gracias

CON EL AUSPICIO DE:

