

Universidad de Concepción  
Facultad de Ingeniería  
Departamento de Ingeniería Metalúrgica



CRHIAM  
CENTRO DE RECURSOS HÍDRICOS PARA LA AGRICULTURA Y LA MINERÍA



*“Efecto de partículas finas y minerales de arcilla en el proceso de flotación y su relación con reología de suspensiones”*

*Dr. Leopoldo Gutiérrez Briones  
Profesor Asociado  
Departamento de Ingeniería Metalúrgica  
Universidad de Concepción (UdeC)  
Investigador Principal Centro CRHIAM-UdeC*

CLARIANT 

“FLOTACIÓN DE MINERALES DE COBRE ”

31 de julio de 2020

IMetChile agradece a sus auspiciadores





# Agradecimiento estudiantes



## Post-grado

## Pre-grado

### *Doctorado en Ingeniería Metalúrgica*

- Dra. Lina Uribe V. (Prof. U. Talca)
- Dr. Andrés Ramírez M. (Prof. UdeC)
- Dr. Rodrigo Yepsen F.
- Dr. (c) Darwin Estrada S.
- Dr. (c) Luver Echeverry V.

### *Magister en Ingeniería Metalúrgica*

- Mg. Alejandro Alvarez Ch.
- Mg. (c) Gonzalo Dinamarca R.
- Mg. (c) Jhon Chique A.
- Mg. (c) Galo Brito C.
- Mg. (c) Luciana Macera C.

### *Ingeniería Civil Metalúrgica*

- Cristian Melipichun A.
- Gerardo Tobar L.
- Juan Carlos Mena S.
- Felipe Herrera L.
- Danielle Mesías T.
- Erick Rebolledo L.
- Bastián Salazar E.
- Hernán Farías W.
- Diego Matamala R.
- Erick Zapata P.
- Selfa Pfeifer A.
- Juan Rodríguez C.
- Ailynne Rojas S.
- Felipe Román R.
- Hugo Jeldres V.
- Michelle Rodríguez R.
- Daniel Ortiz M.
- Danilo Soto C.
- Cristian Hernández G.
- Florencia Martínez N.
- Carla Ibarra M.
- Pablo Miranda V.
- Francisco Alarcón G.
- Martín Santos M.
- Nelson Venegas G.
- Milton Garcés B.
- Yobiksa Barra G.
- Alejandro Álvarez Ch.
- Eduardo Luengo G.
- José Riquelme G.
- Eric Solís F.
- Pablo Contreras C.
- Octavio Bofí P.
- Darko Arias S.
- Andrés Correa C.
- Gerardo Saavedra V.
- Adriela Osses T.
- Daniela Zapata A.
- Paola Merino V.
- Joaquín Roa C.
- Fernanda Vera A.
- Paulina Gutiérrez R.
- Esteban Tereucán I.
- Más alumnos antes 2013-2015.....



# Contenidos

1. Introducción
2. Definiciones generales: partícula fina-mineralogía
3. Mecanismos de acción de filosilicatos-minerales de arcilla en flotación: fisicoquímicos, físicos (reología!)
4. Atenuación efecto depresor de minerales de arcilla
5. Conclusiones



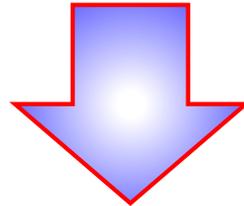
# 1. Introducción



## Introducción: contexto

---

- *Leyes bajas, minerales complejos, difíciles de procesar*
- *Altas concentraciones de minerales generadores de finos: filosilicatos-minerales de arcilla*
- *Alta variabilidad*
- *Restricciones en cantidad y tipo de agua*
- *Geometalurgia (corto plazo) en desarrollo*



**Partículas finas**  
**filosilicatos-**  
**minerales de arcilla**



## **2. Definiciones generales: partícula fina-mineralogía**



# Partícula fina: definiciones

---

## Definición general metalurgia (física):

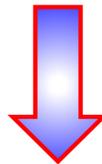
*Partícula tiene un tamaño menor a cierto límite superior (ej. < 5/10/20 micrómetros).*



**General**

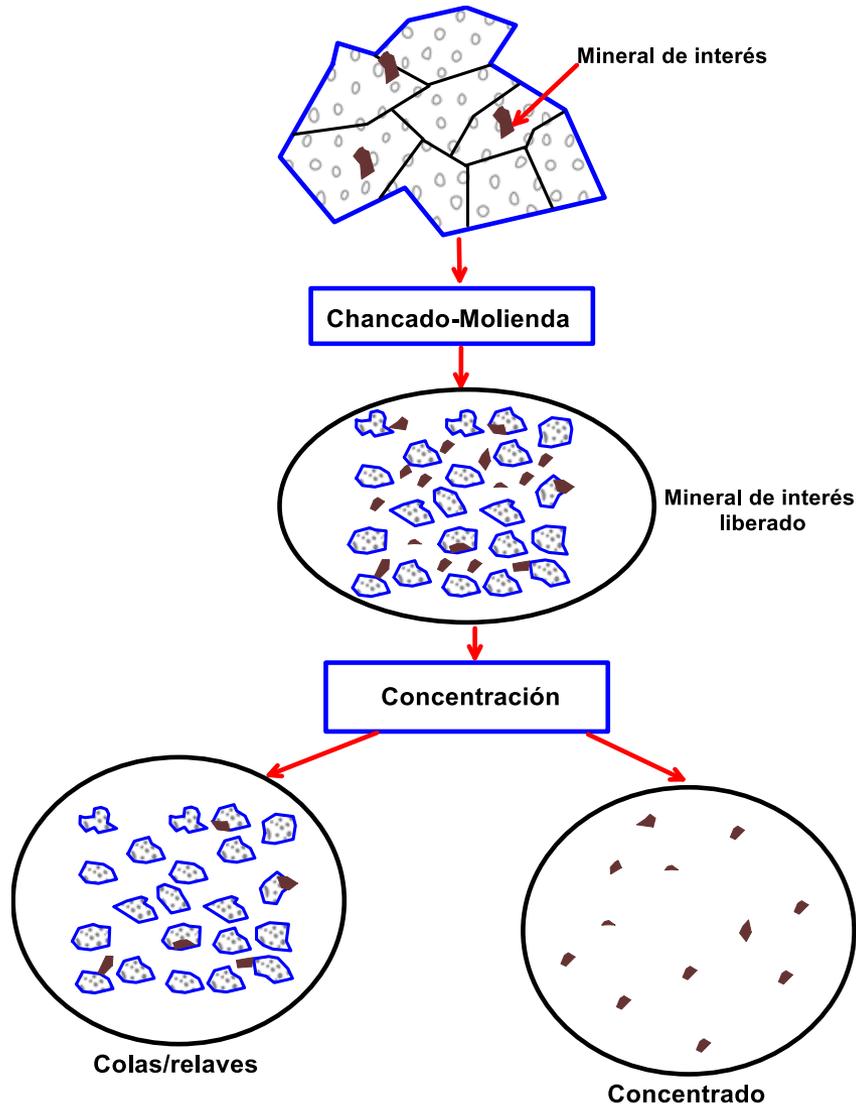
## Definición general fisicoquímica:

*Partícula fina puede ser aquella para la cual el efecto de las fuerzas de superficie es considerable respecto del efecto de las fuerzas gravitacionales. Fisicoquímica de superficies!*



**Mineralogía**

# Partícula fina: generación



- La **separación selectiva** eficiente de los minerales de interés y ganga liberación.
- La **liberación** se logra a través chancado y molienda, con etapas intermedias de clasificación en hidrociclones (**Generación de partículas finas; el rol de la clasificación es relevante**).
- Las etapas de concentración (ej. flotación) están orientadas a **separar selectivamente los minerales valiosos** que fueron liberados como partículas individuales de la ganga.

**Mineral más blando no necesariamente es el mejor para tph!**



## Partícula fina: características

---

- *Alta área superficial específica*
- *Alta interacción con fluido* → *cambios reológicos de pulpa!*
- *Adsorción no específica de reactivos*
- *Recirculación en agua clara por mala floculación*
- *Sobre molienda* → *círculo vicioso!*
- *En general asociados a minerales alterados* → *sulfuros alterados* → *cobre oxidado!*
- *Otras en flotación...*

## Partícula fina: diferencias entre partículas finas

10  $\mu\text{m}$

**Cuarzo**

**Caolinita**

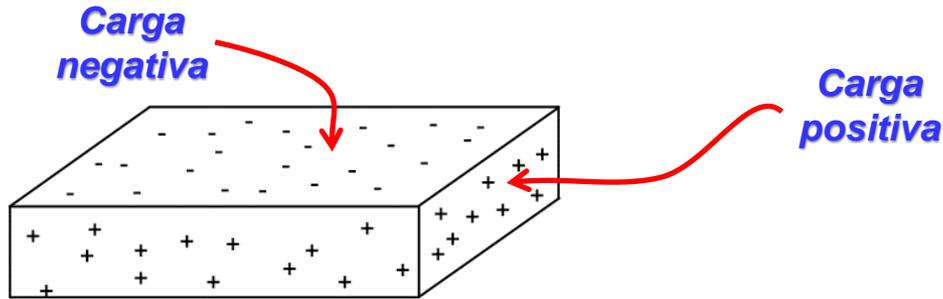
**¿Ambas partículas generan el mismo efecto depresor en flotación?**

➔ **R: No**

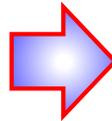
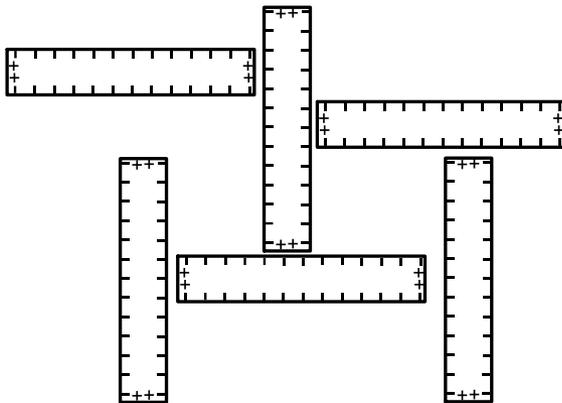
*Minerales de arcilla:*

- Anisotropía superficial
- *Delaminación*
- *Hinchabilidad*
- *Cristalinidad*
- *Hidrofobicidad/hidrofilicidad*

# Partícula fina: anisotropía superficial



## Generación de estructura



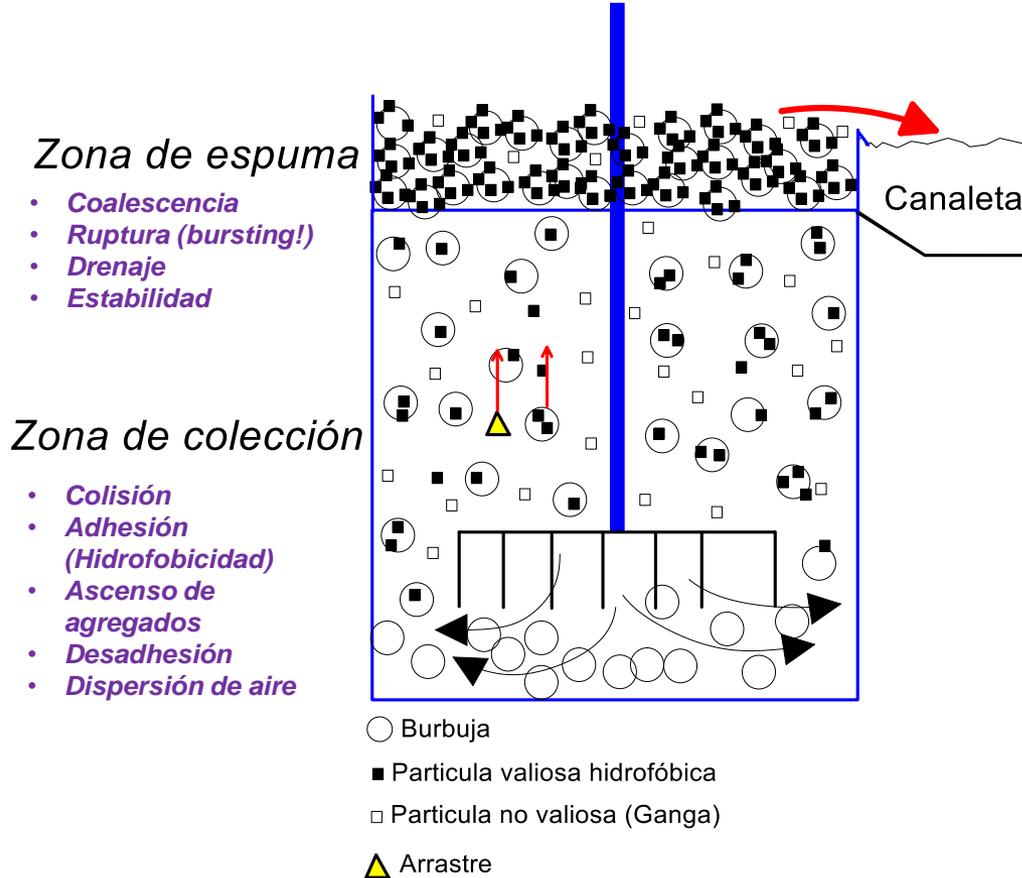
*Cambios reológicos importantes*

- *Alta viscosidad*
- *Alto yield stress*



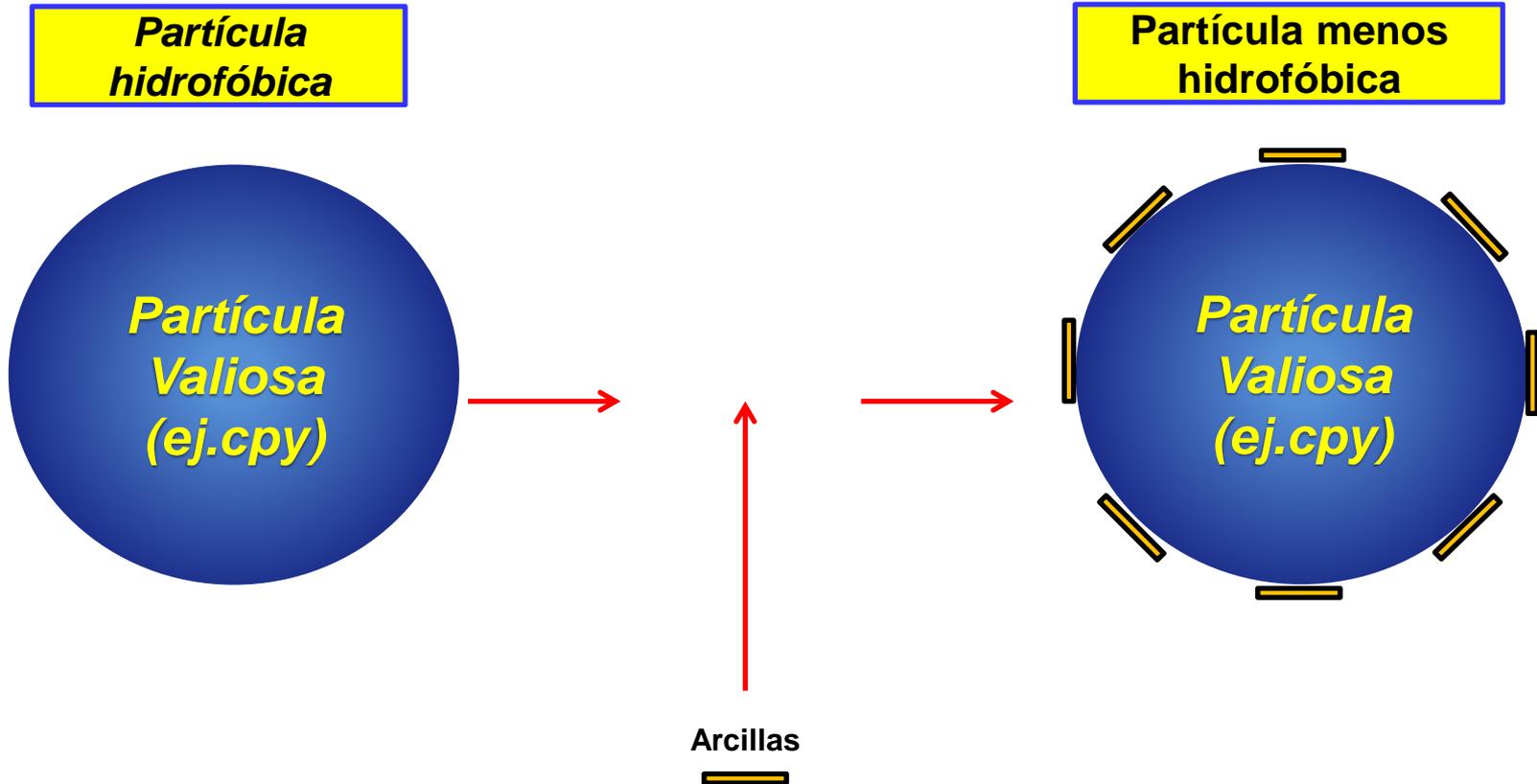
# **3. Mecanismos de acción de filosilicatos-minerales de arcilla en flotación**

# Proceso de flotación: fenomenología



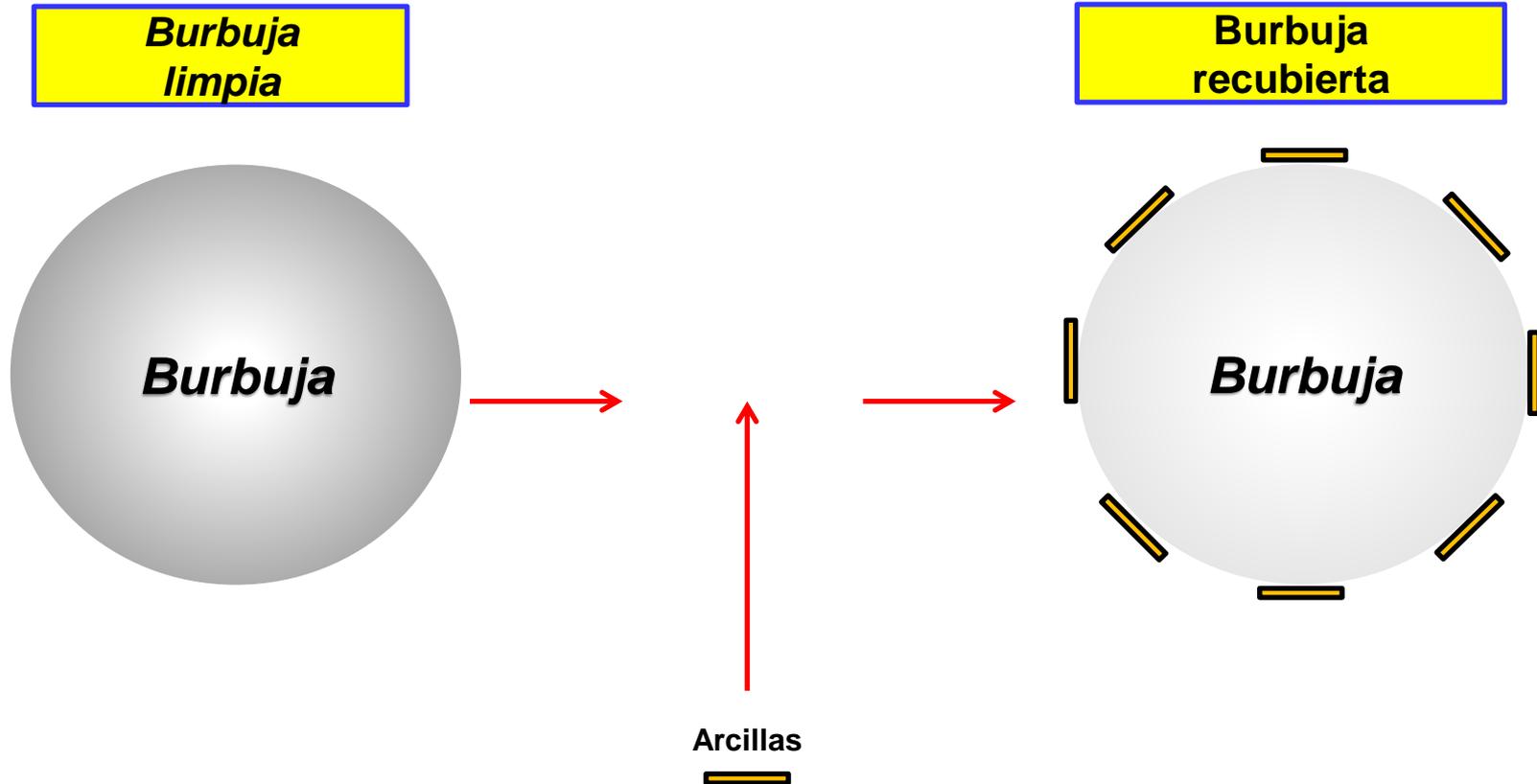
**¿Cómo impactan los minerales de arcilla en los subprocesos indicados?**

# Mecanismos de acción de arcillas: coatings sobre mena



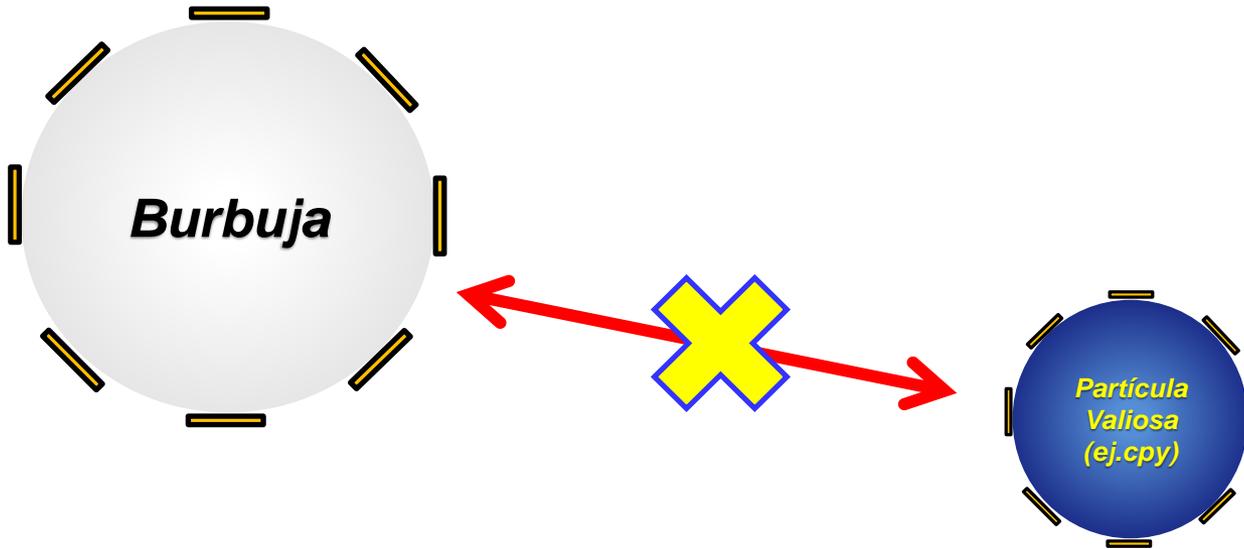
***Partículas menos hidrofóbicas flotan mal***

## Mecanismos de acción de arcillas: coating sobre burbuja



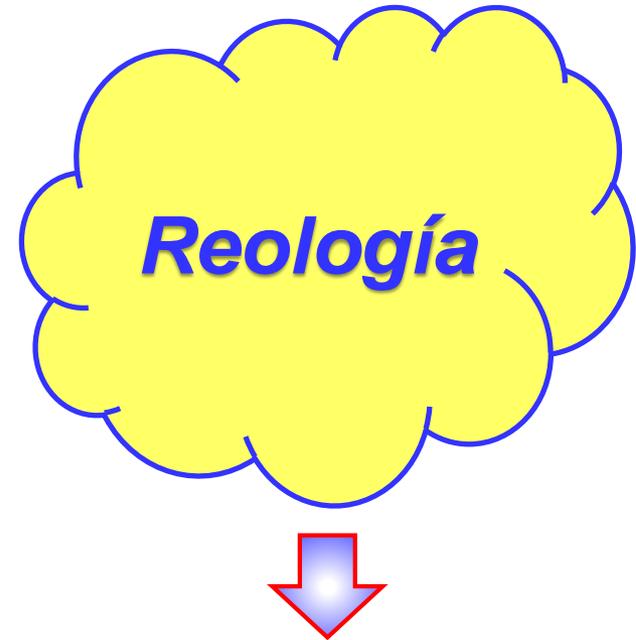
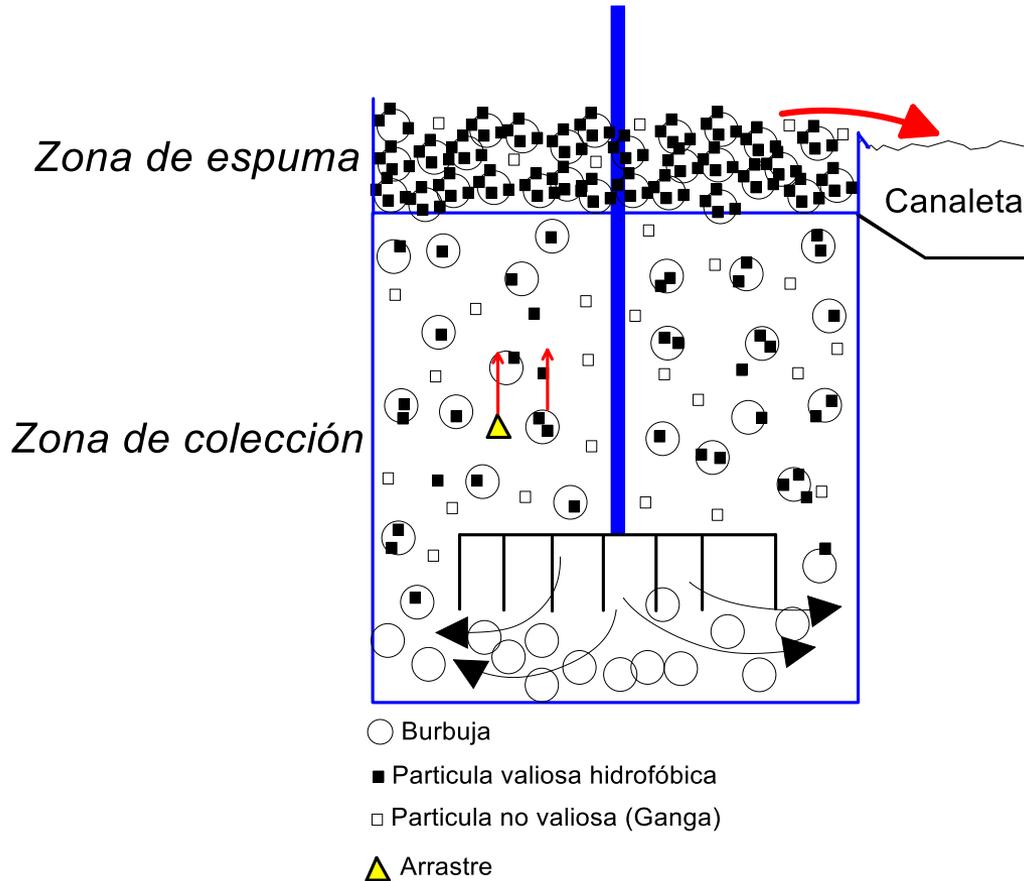
***Burbujas recubiertas por arcillas retienen menos partículas valiosas, menos/más estables***

# Mecanismos de acción de arcillas: mala adhesión



***Adhesión se ve afectada***

# Mecanismos de acción de arcillas: ascenso de agregados

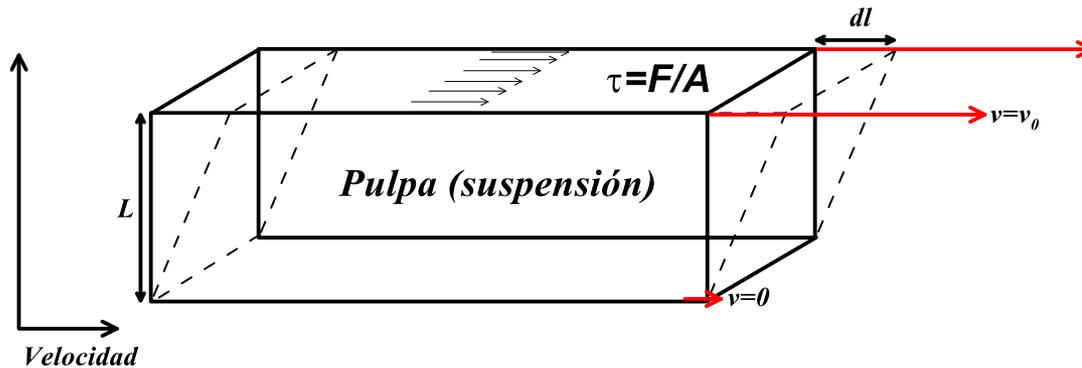


**Minerales de arcilla afectan fuertemente la reología de suspensiones!!!!**

# Mecanismos de acción de arcillas: reología

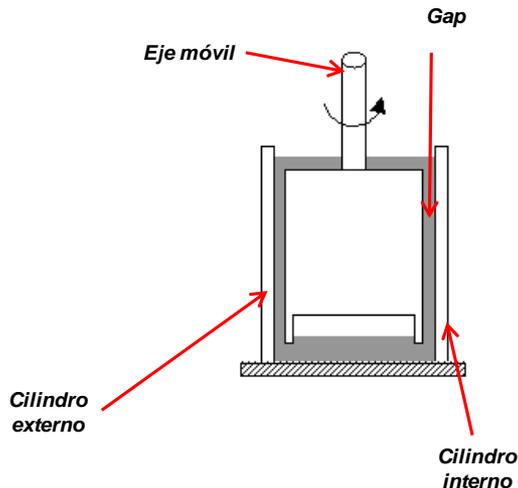
## Reología de suspensiones

- Ciencia de estudio de la deformación y el flujo de la materia.
- Ciencia de estudio de yield stress y viscosidad.



$$\tau = \frac{F}{A} \text{ (Pa)}$$

$$\dot{\gamma} = \frac{v_0 - 0}{L} = \frac{v_0}{L} \text{ (s}^{-1}\text{)}$$



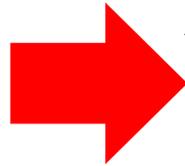
$\tau$  : esfuerzo de cizalle (*shear stress*).

$\dot{\gamma}$  : velocidad de deformación de cizalle (*shear rate*).

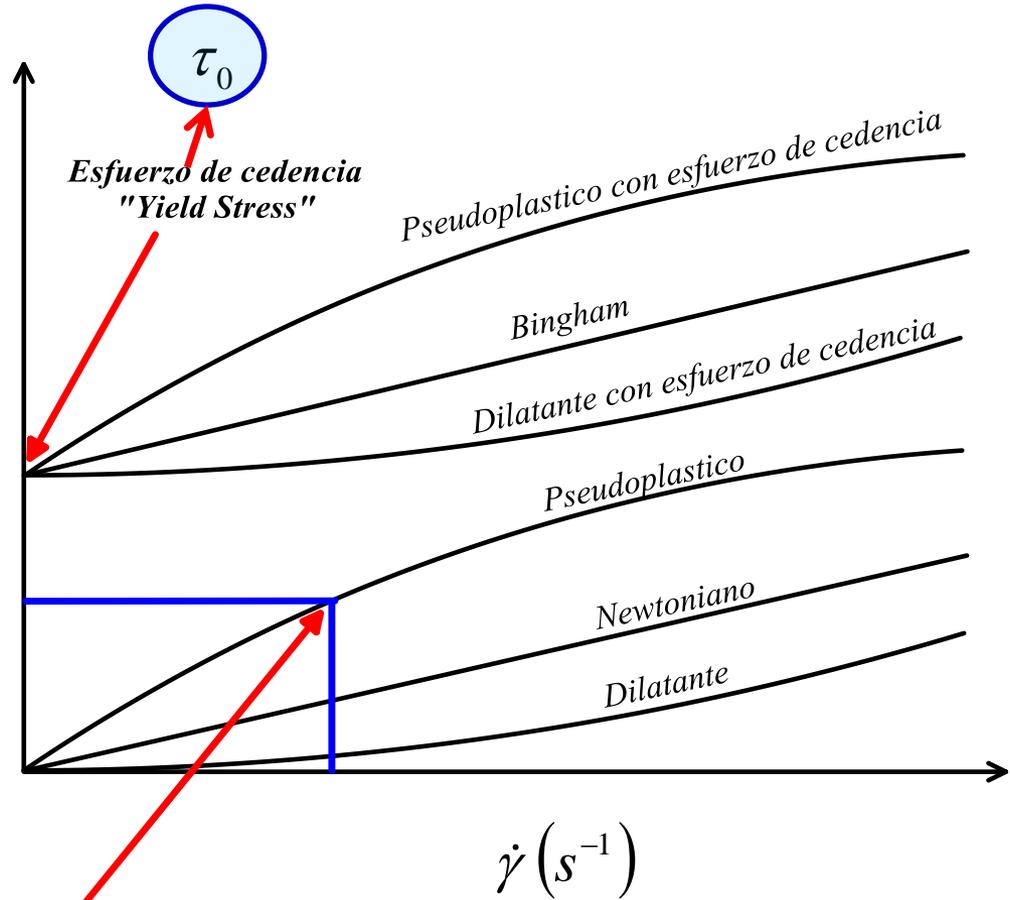


# Mecanismos de acción de arcillas: reología

Reograma



$\tau$  (Pa)

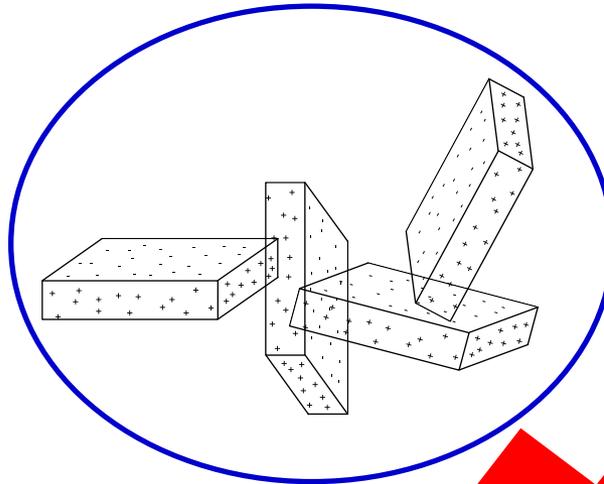
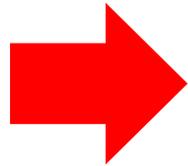


$$\eta_{app} = \frac{\tau}{\dot{\gamma}}$$

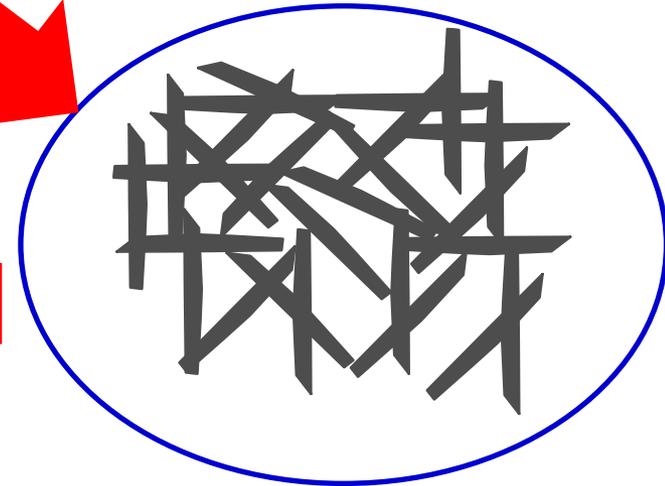
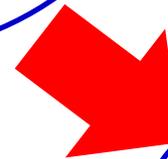
Viscosidad aparente

# Mecanismos de acción de arcillas: reología

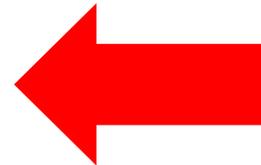
***Anisotropía superficial***



***Estructura***

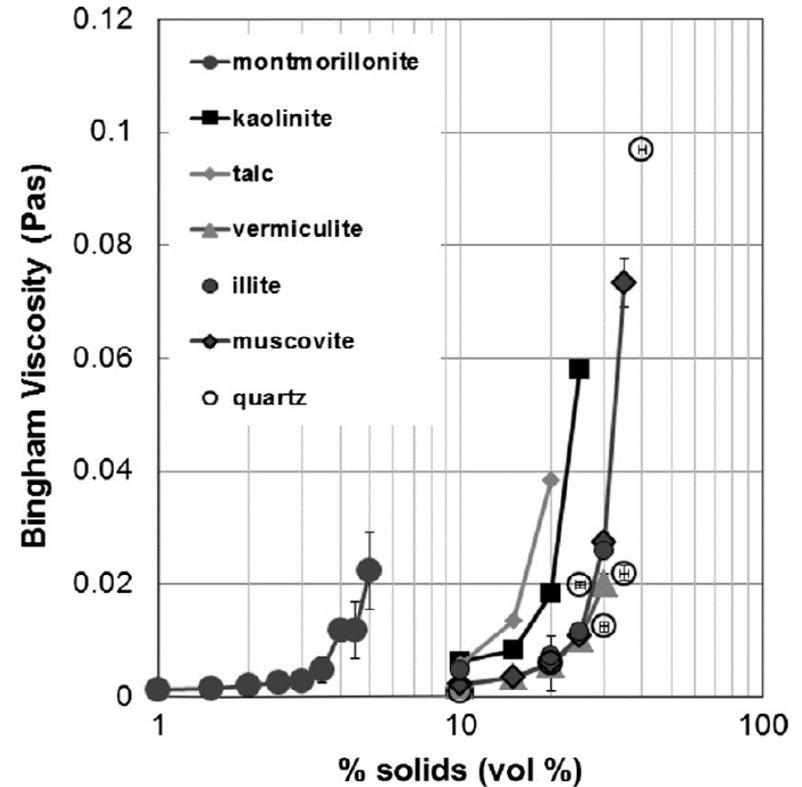
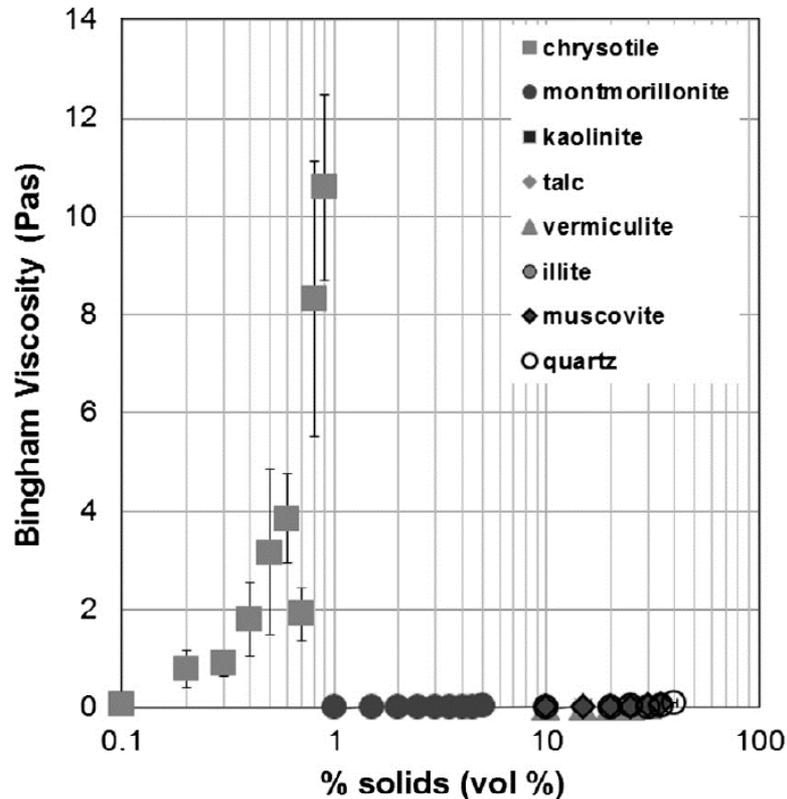


***Alta viscosidad y yield stress***



# Mecanismos de acción de arcillas: reología

## Viscosidad



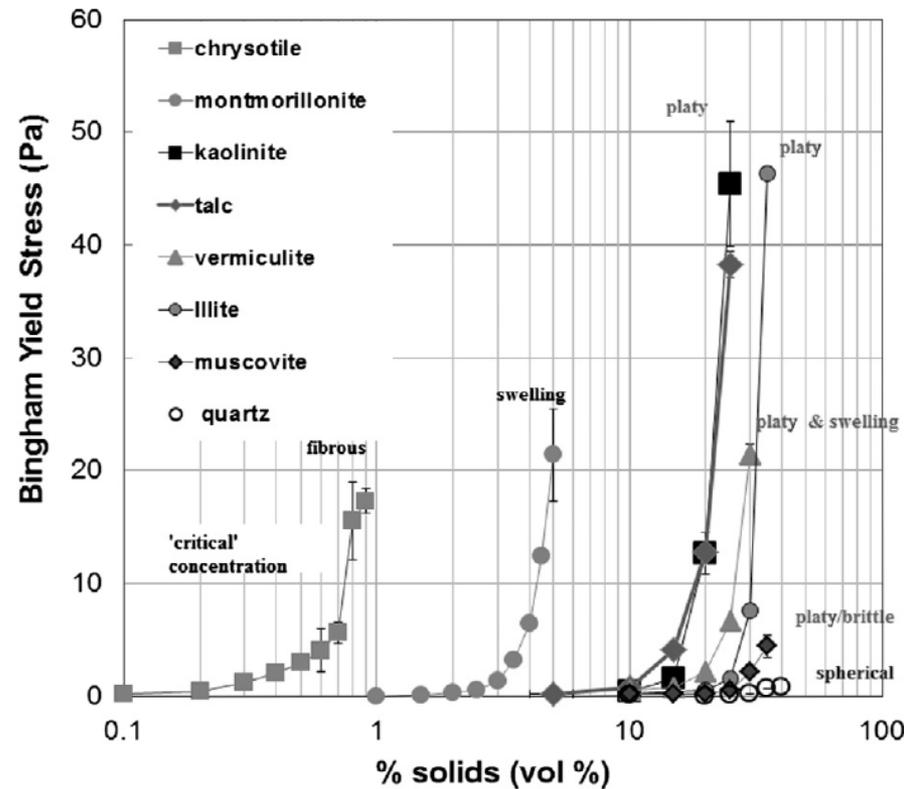
Ndlovu et al. (2014). A preliminary rheological classification of phyllosilicate group minerals. *Minerals Engineering*, 55, 190-200.

**La naturaleza mineralógica define el impacto en reología y en procesos.**



# Mecanismos de acción de arcillas: reología

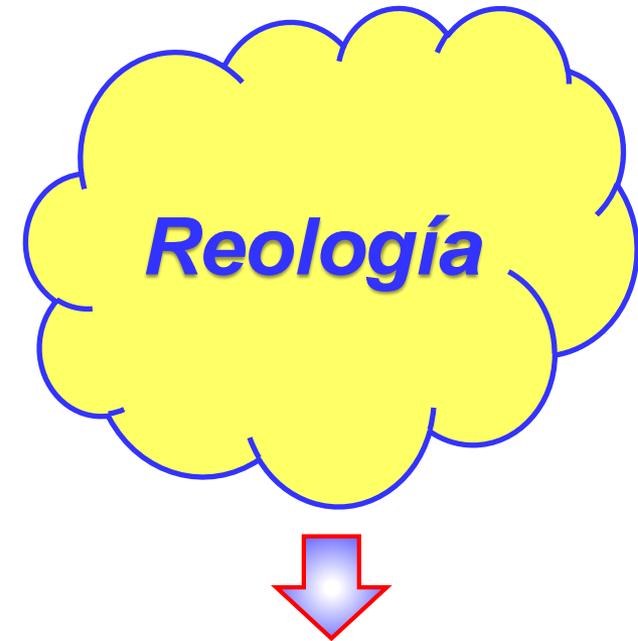
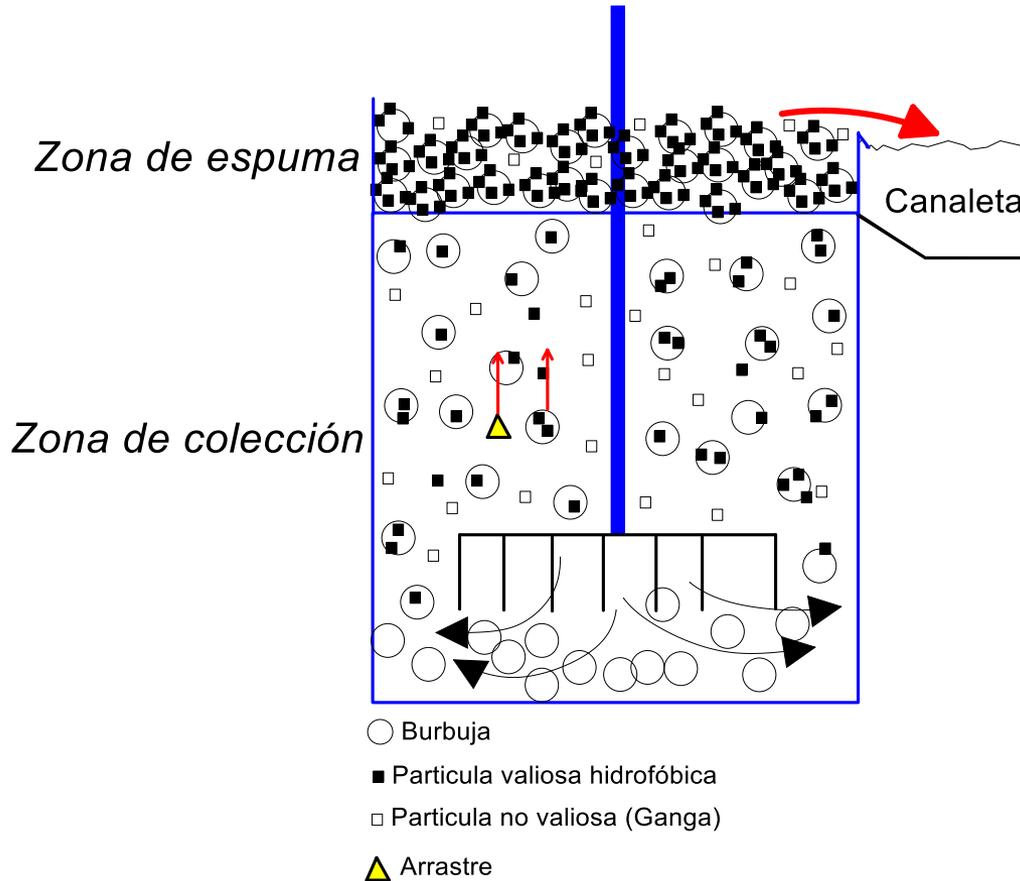
## Yield stress



Ndlovu et al. (2014). A preliminary rheological classification of phyllosilicate group minerals. *Minerals Engineering*, 55, 190-200.

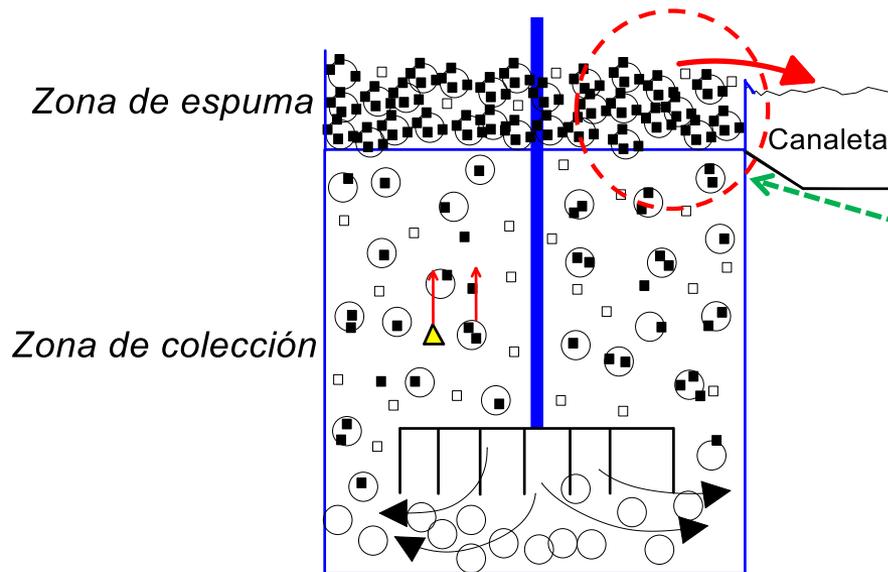
**La naturaleza mineralógica define el impacto en reología y en procesos.**

# Mecanismos de acción de arcillas: ascenso/dispersión

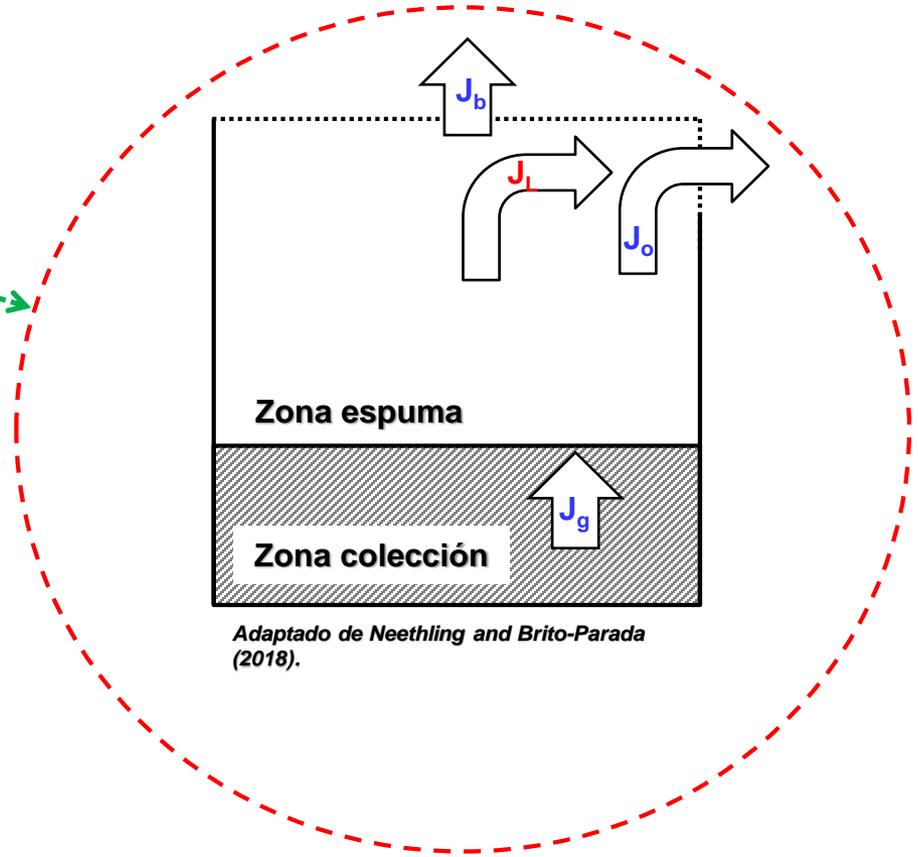


- **Velocidad de ascenso menor**
- **Dispersión de aire ( $J_g$ ,  $\epsilon_g$ ,  $d_b$ ,  $S_b$ )**

# Mecanismos de acción de arcillas: estabilidad de espuma



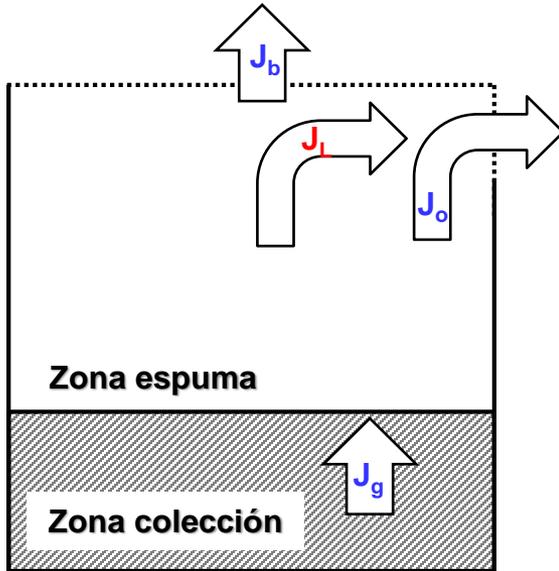
- Burbuja
- Particula valiosa hidrofóbica
- Particula no valiosa (Ganga)
- ▲ Arrastre



Adaptado de Neethling and Brito-Parada (2018).

- $J_g$ : flujo de aire entrando a zona de espuma
- $J_o$ : flujo de aire que rebose celda
- $J_b$ : flujo de aire que sale de celda por ruptura de burbujas
- $J_L$ : flujo de líquido que rebose celda

# Mecanismos de acción de arcillas: estabilidad de espuma



Adaptado de Neethling and Brito-Parada (2018).

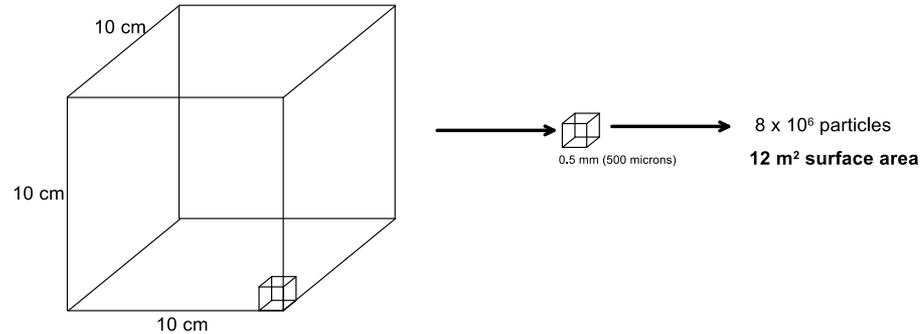
- $J_g$ : flujo de aire entrando a zona de espuma
- $J_o$ : flujo de aire que rebosa celda
- $J_b$ : flujo de aire que sale de celda por ruptura de burbujas
- $J_l$ : flujo de líquido que rebosa celda



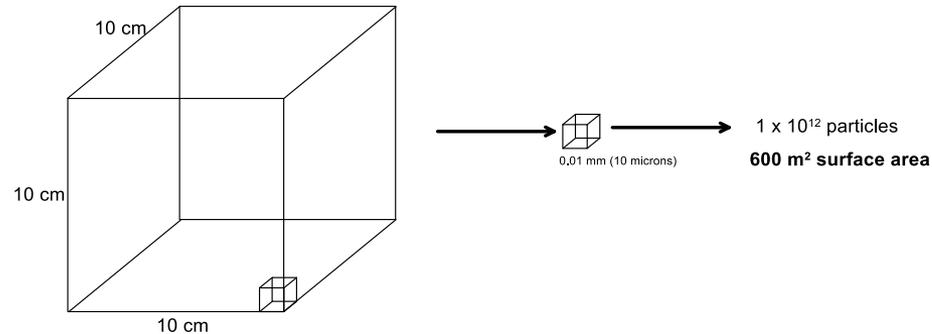
- Función de: coalescencia de burbujas en zona de espuma y  $J_b$ . AMBOS FACTORES AFECTADOS POR MINERALES DE ARCILLA Y OTROS FILOSILICATOS.***

# Mecanismos de acción de arcillas: alta área superficial

**Cubo 1L**



**Cubo 1L**



Partículas finas tiene un área superficial ( $\text{m}^2/\text{g}$ ) específica muy grande lo que hacer más probable la adsorción no específica de reactivos.



## Mecanismos de acción de arcillas: otros

---

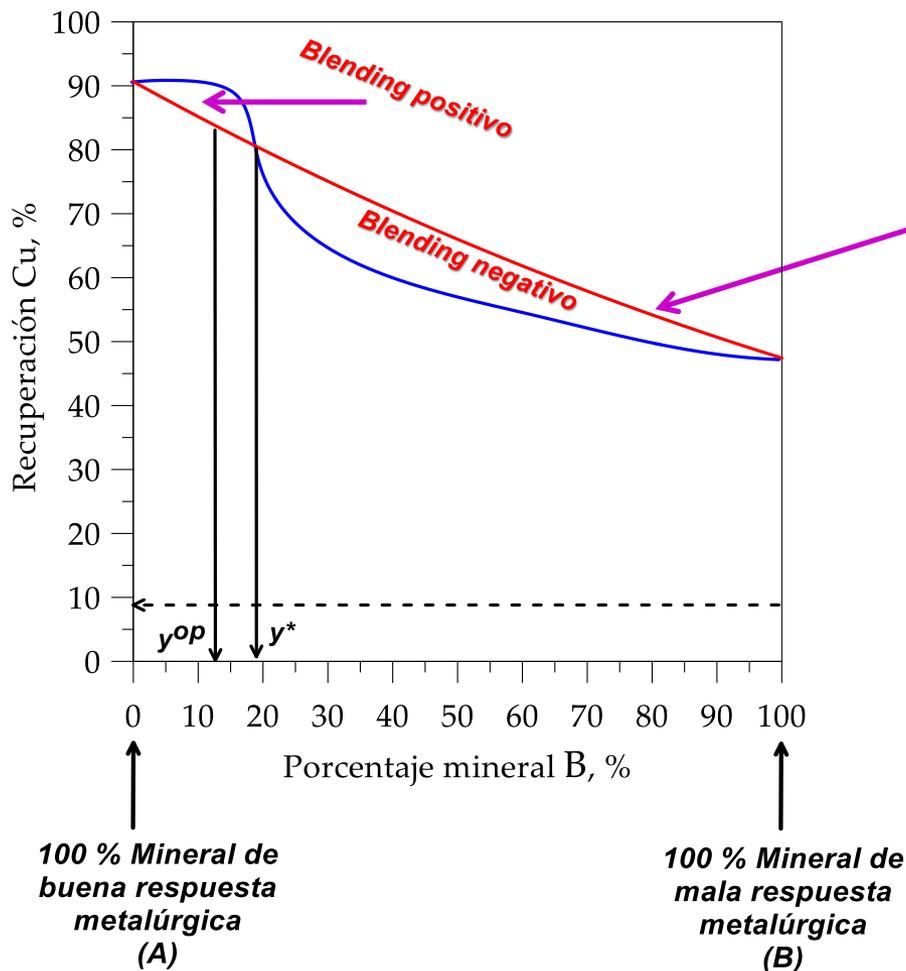
- Mayor arrastre, baja ley de concentrado, efecto agua abajo
- Efectos sobre la evacuación de la espuma desde celda (reología de espuma, evacuación, drenaje, lavado de espuma)
- Gigantismo en celdas/delaminación
- Celda mecánicas puede influir en el tamaño de burbuja generado
- Patrón de flujo en celdas, zonas muertas...



# **4. Atenuación efecto depresor de minerales de arcilla**



# Atenuación: geometalurgia



Recuperación calculada a partir de la ponderación de las recuperaciones individuales de los minerales A y B.

$$R = \frac{R_A \times L_A \times \%M_A + R_B \times L_B \times \%M_B}{L_A \times \%M_A + L_B \times \%M_B}$$

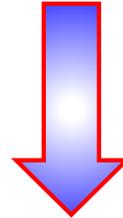
- Blending definido en base a ley
- Blending de minerales arcillosos no se debería necesariamente definir en base a mena, sino considerar la ganga
- Las variables que definen qué mezclar y qué no mezclar están definidas por la mineralogía (Geometalurgia)
- **Se deben desarrollar índices de MEZCLABILIDAD para cada planta**

**Blending index**



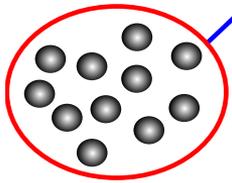
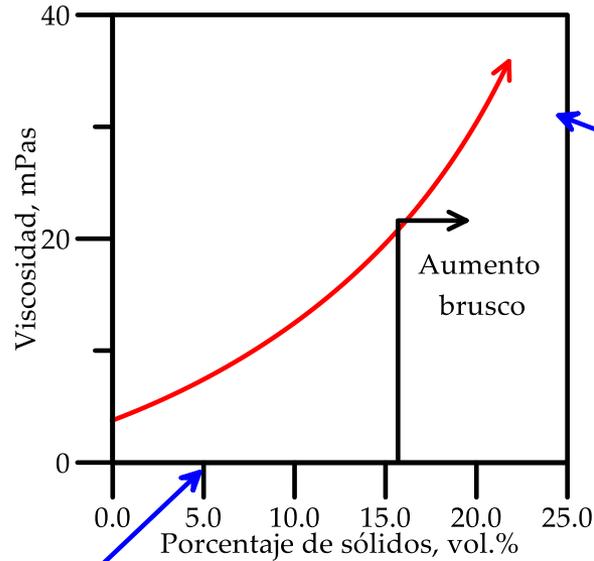
# Atenuación: geometalurgia

---

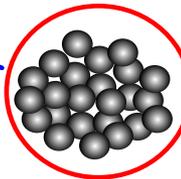


- **Hoy tenemos: tph, recuperación (Cu, Mo, Au, Ag), cal....y reología?????**
- **GEO-REOLOGÍA:  
granulometría de molienda-  
flotación-espesamiento!**

# Atenuación: dilución



Partículas dispersas,  
la viscosidad se acerca  
a la del medio continuo

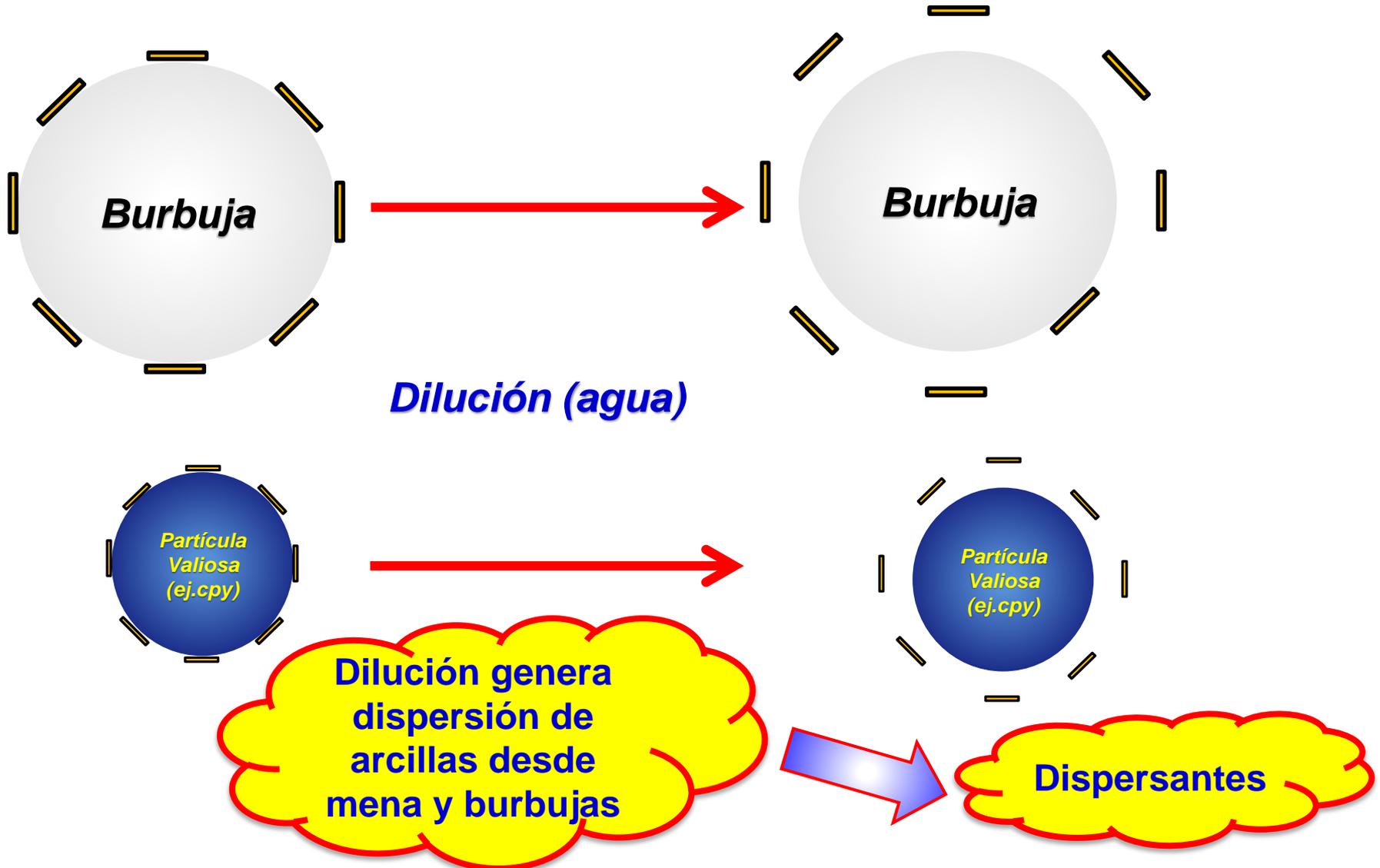


Partículas interaccionan  
generando un aumento de viscosidad

**Dilución genera  
una disminución  
de viscosidad y  
yield stress**



# Atenuación: dilución





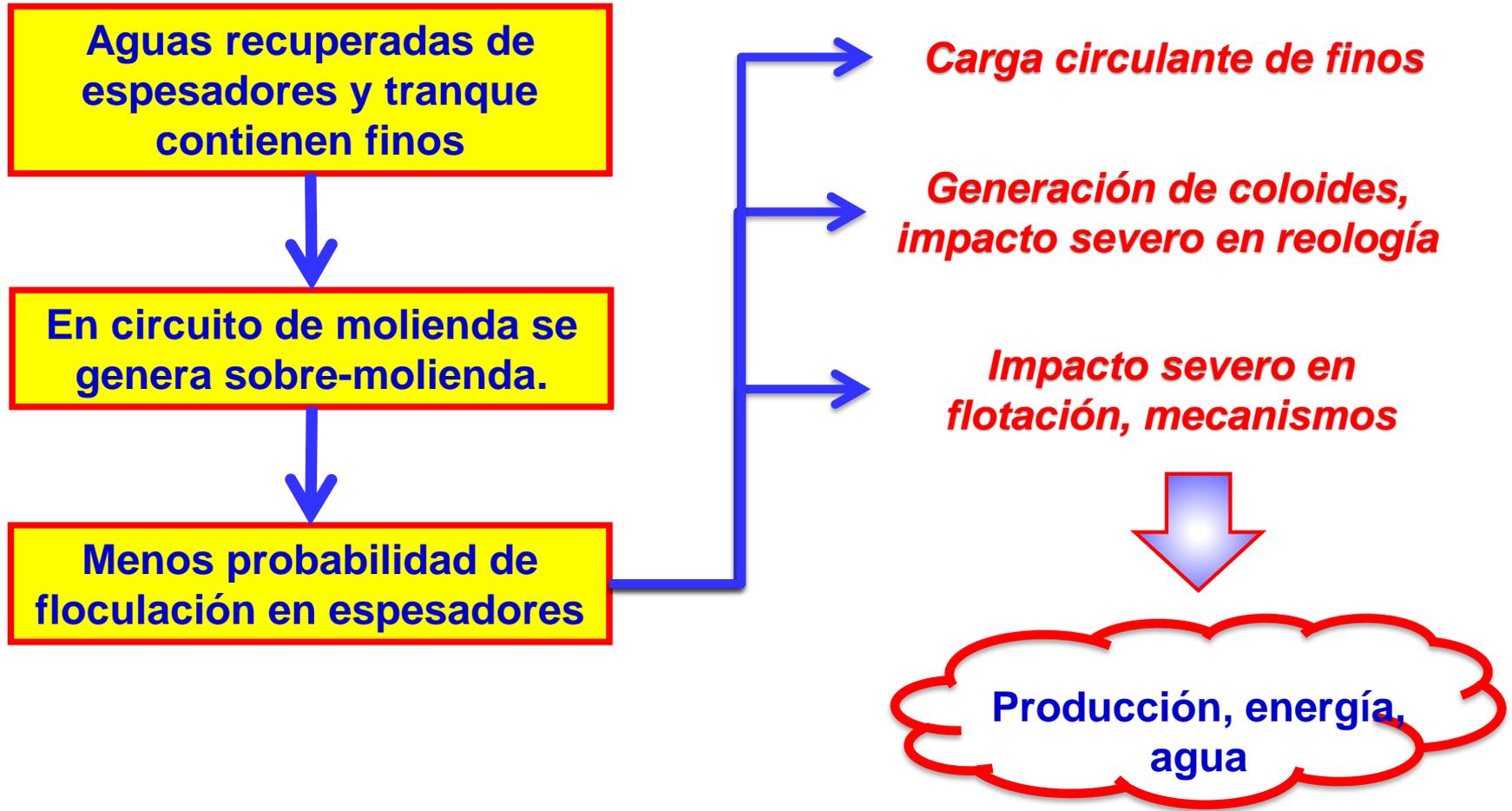
# Atenuación: calidad de agua



**Controlar iones, cal, gestión de modelo cal-pirita, revisar tipo de agua, tratamiento**



# Atenuación: calidad de agua





# 5. Conclusiones



# Conclusiones

---

- *Escenario futuro desafiante* → *avanzar en tecnologías para tratar minerales complejos (arcillas, pirita, arsénico) en un contexto de escasez de agua.*
- *Es necesario generar modelos geometalúrgicos de corto plazo que se hagan cargo de esta problemática (mediciones en línea de mineralogía, reología).*
- *Además del desarrollo de modelos de tonelaje y recuperación, es de suma importancia el desarrollo de modelos geo-reológicos para cada una de las operaciones unitarias de las plantas concentradoras.*



# Conclusiones

---

- *Controlar cargas circulantes de finos/iones en las plantas concentradoras a través de tratamiento de aguas recirculadas: finos, iones, otros.....*
- *Además de la medición de los porcentajes de especies mineralógicas tipo filosilicatos, es muy importante medir la cristalinidad.*
- *INNOVACIÓN!: Avanzar en Industria 4.0 asociada al control en línea de las plantas concentradoras (reactivos, mineralogía, agua, sensores, etc) para mantener competitividad.*

**Universidad de Concepción**  
**Facultad de Ingeniería**  
**Departamento de Ingeniería Metalúrgica**



**CRHIAM**  
CENTRO DE RECURSOS HÍDRICOS PARA LA AGRICULTURA Y LA MINERÍA



**GRACIAS!**

**CLARIANT** 

**“FLOTACIÓN DE MINERALES DE COBRE ”**

31 de julio de 2020

IMetChile agradece a sus auspiciadores

