

# GEOMET2016

3<sup>rd</sup> International Seminar on Geometallurgy

## Protocolo de evaluación de minerales de arcillas en procesos de flotación.

Samia Pérez<sup>1</sup>, Javiera Gerding<sup>1</sup> y Andrew Menzies<sup>2</sup>

<sup>1</sup>*Centro de Estudios Mineralógicos CEM, Chile*

<sup>2</sup>*Departamento de Ciencias Geológicas, UCN, Chile*



# Motivación, por qué?

## Flotación & Minerales de Arcilla

- ✓ El 98% de la alimentación es Ganga.
- ✓ Del 5% - 25% son “Caolines”, “Esmectitas”, “Micas” y “Cloritas” (Ipinza, 2011).
- ✓ En procesos de flotación de cobre los minerales de arcilla auspician:
  - Incremento de la viscosidad de la pulpa (Farrokhpay & Bradshaw, 2012)
  - Cambios en la selectividad y el consumo de los reactivos (Wang, et al., 2015)
  - Incremento en los tiempos de residencia (Jorjani, et al., 2011).

**Principales minerales de ganga que impactan en el proceso de flotación.**

Traducción Ingles español tomado de Baum (2014).

Parámetros	Minerales involucrados
Dureza y abrasión	Cuarzo - Feldespato - Granate - Turmalina - Magnetita
Sliming	Arcillas - Micas - Talco - Sulfatos - Fe óxidos/hidróxidos - Carbonatos
Auto flotadores	Talco - Pirofilita - Serpentina - Clorita - Sericita
Fases solubles en agua	Cu-sulfatos - Sales Na/K - Mo-óxidos - Sulfatos Ca, Al, Mg
Consumidores de reactivos	Arcillas - Micas - Carbonatos - Zeolitas - Fe óxidos - Jarosita
Modificadores de pH	Alunita - Jarosita - Sulfatos Cu, Al, Mg - Cloruros
Desestabilizadores de espuma	Arcillas - Sulfatos - Sericita - Talco - Homblenda

# Motivación, por qué?

Presencia de minerales de arcillas en sistemas porfíricos de Chile.

Grupo mineral	Chuquicamata <sup>1,4</sup>	Collahuasi <sup>1</sup>	Sierra Gorda <sup>2</sup>	SPENCE <sup>3</sup>	Escondida <sup>4</sup>	Cerro Colorado <sup>4</sup>	Carmen de Andacollo <sup>4</sup>	Maricunga <sup>1</sup>	Ministro Hales <sup>5</sup>	El Salvador <sup>1,4</sup>	El Teniente <sup>1,4</sup>	Los Bronces <sup>1,4</sup>	Radomiro Tomic <sup>7,8</sup>	Lomas Bayas <sup>4</sup>	El Abra <sup>4</sup>
Caolinita	✓	✓	✓	✓		✓	✓	✓	✓	✓	✓		✓	✓	✓
Clorita	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓			✓	✓	✓		✓	✓
Illita	✓	✓	✓	✓			✓	✓	✓		✓		✓		
Esmeclita	✓	✓	✓	✓		✓	✓	✓	✓	✓			✓	✓	✓
Pirofilita	✓	✓	✓		✓	✓		✓	✓						

La información presentada en la tabla no es determinada en ninguna condición bajo iguales parámetros de muestreo, técnicas de determinación ni parámetros de cuantificación.

<sup>1</sup> Tomado de Bulatovic et al. (1998) <sup>2</sup> Tomado de Brunetti (2011) <sup>3</sup> Tomado de Arancibia (2009)

<sup>4</sup> Tomado de Camus (2003) <sup>5</sup> Tomado de Miranda & Díaz (2013) <sup>6</sup> Tomado de Briceño & Rubio (2012)

Zonas de Alteración Hidrotermal	
	Alteración Argílica Avanzada
	Alteración Argílica
	Alteración Propílitica
	Alteración Filica
	Alteración Potásica

# Cómo?

## Metodología de Trabajo

### Recopilación Bibliográfica

- Arcillas
- Flotación
- Metodologías de caracterización

### Caracterización Mineralógica

- Muestreo de circuito de flotación.
- Estudio mineralógico

### Resultados

- Diagnóstico de comportamiento de minerales de arcillas en el proceso.
- Balance Metalúrgico

### Protocolo de Estudio

- Escenarios de investigación.
- Pasos para caracterización de minerales de arcilla.

# Recopilación Bibliográfica

## Conceptos Importantes

### “arcilla”

“material de origen natural, compuesto principalmente de minerales de grano fino, que generalmente es plástico a ciertos contenidos de agua y que se endurece por secado o cocción” (Guggenheim & Martin, 1995).

*Joint Nomenclature Committees (JNCs)*

### “mineral de arcilla”

“minerales de filosilicatos y minerales que imparten plasticidad de la arcilla y que se endurecen durante el secado o la cocción”.(Brindley, 1952).

*JNCs: Association Internationale pour l'Etude des Argiles (AIPEA) + Clay Minerals Society (CMS)*

***En geología el límite de tamaño se establece en partículas menor de  $2\mu\text{m}$  (Moore & Reynolds, 1997).***

# Recopilación Bibliográfica

## Propiedades de Minerales de Arcilla.

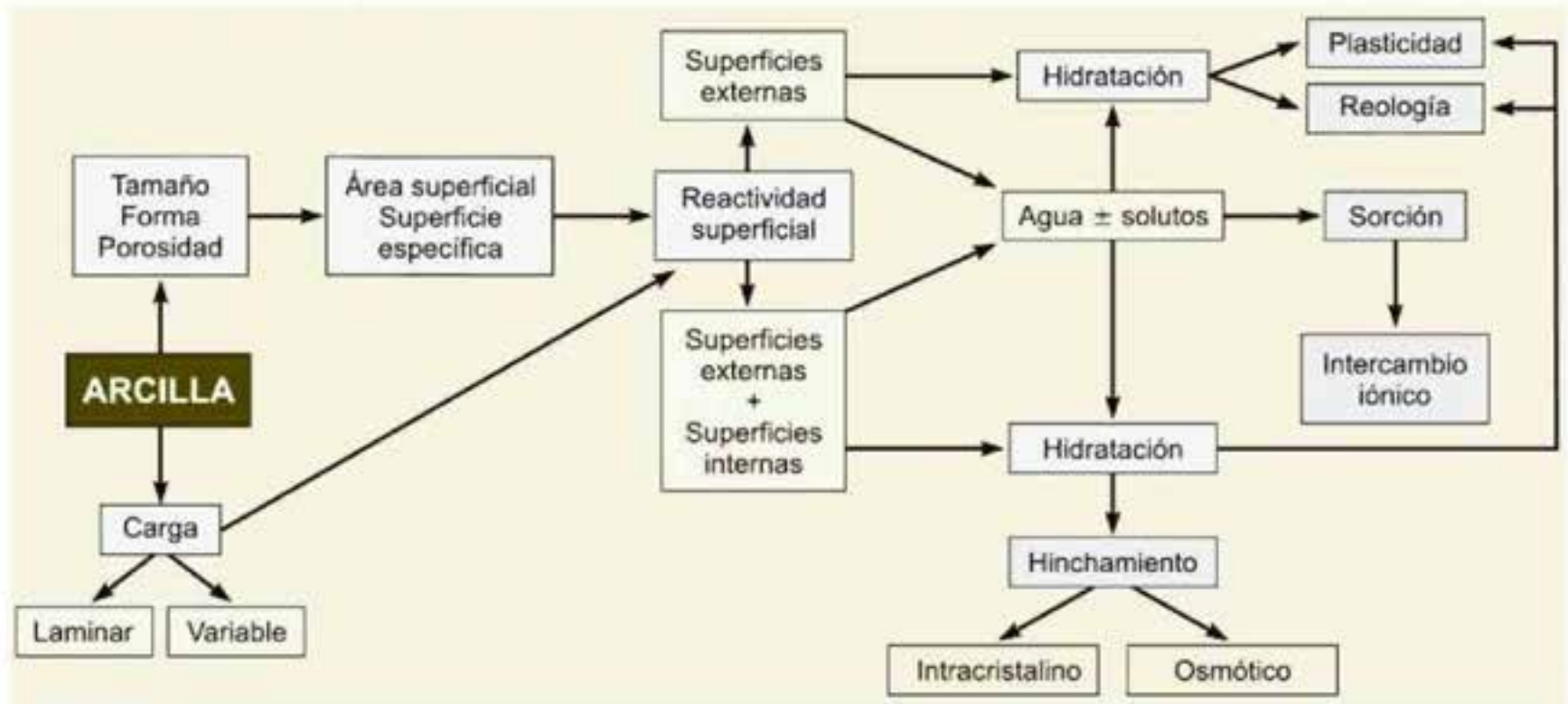


Minerales de arcilla según sus propiedades sorcitivas.

Tomado de Carretero & Pozo (2007).

# Recopilación Bibliográfica

## Propiedades de Minerales de Arcilla.



Propiedades físicas y fisicoquímicas de las arcillas.

Tomado de Carretero & Pozo (2007).

# Recopilación Bibliográfica

## Conceptos Importantes

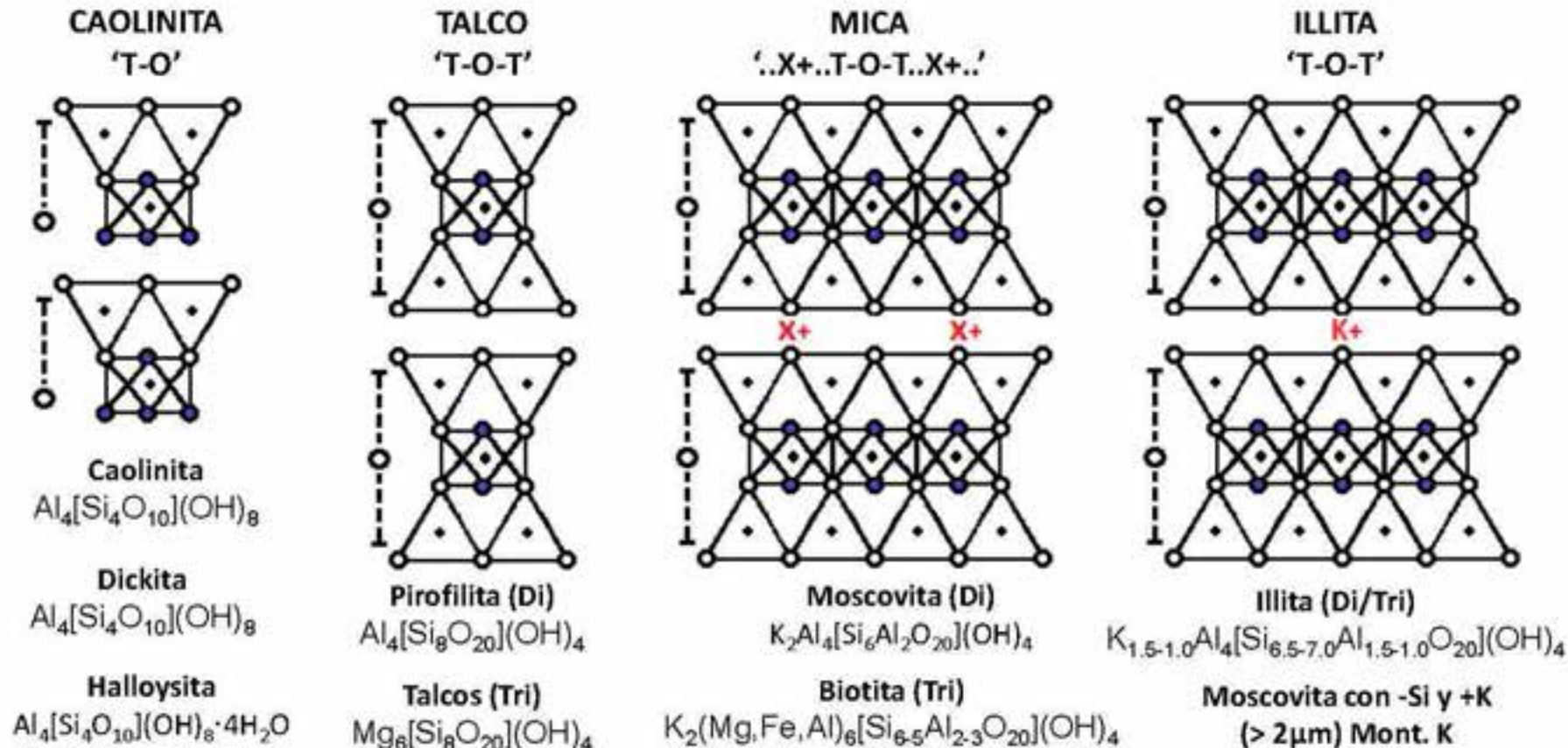


Ilustración esquemática de la estructura de filosilicatos. Tomado y editado de Ndlovu et al. (2013).

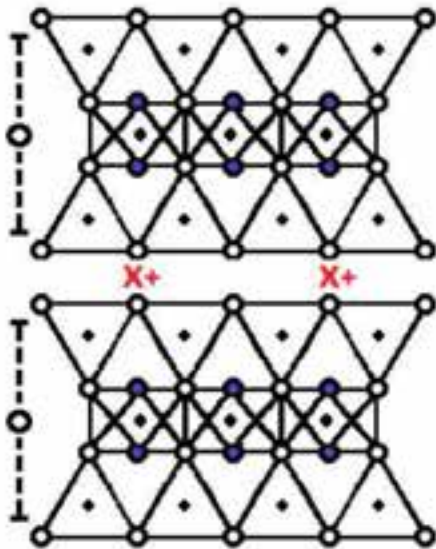


# Recopilación Bibliográfica

## Conceptos Importantes

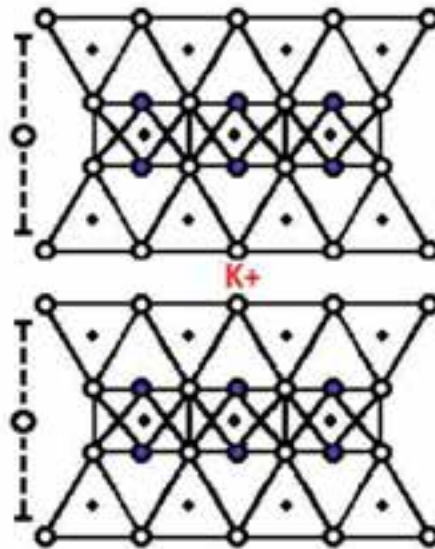
MICA

'..X+..T-O-T..X+..'



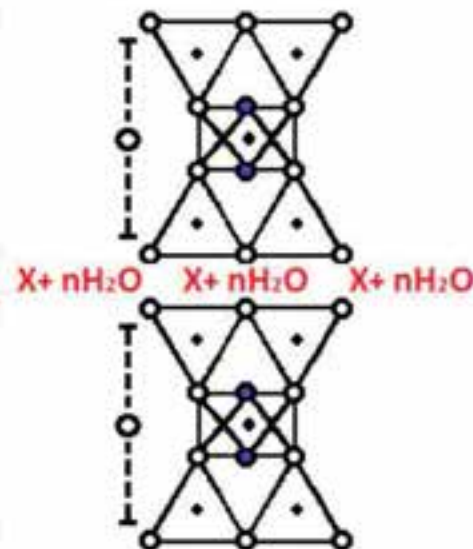
ILLITA

'T-O-T'



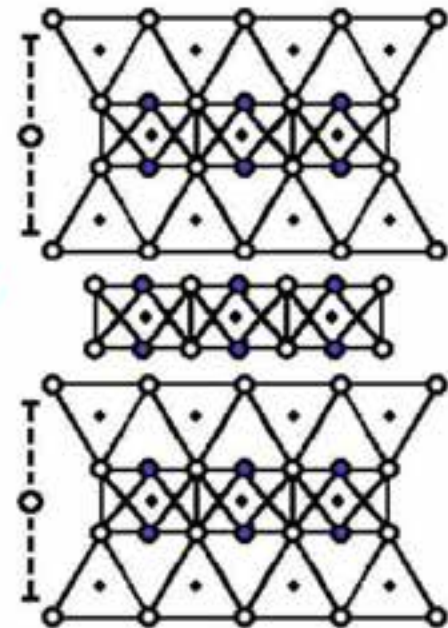
ESMECTITAS Y VERMICULITA

'..X+..T-O-T..X+..'

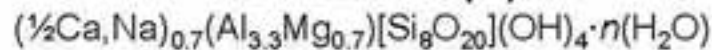


CLORITA

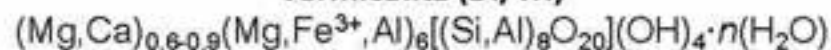
'T-O-T...O...T-O-T'



Montmorillonita (Di)



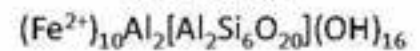
Vermiculita (Di/Tri)

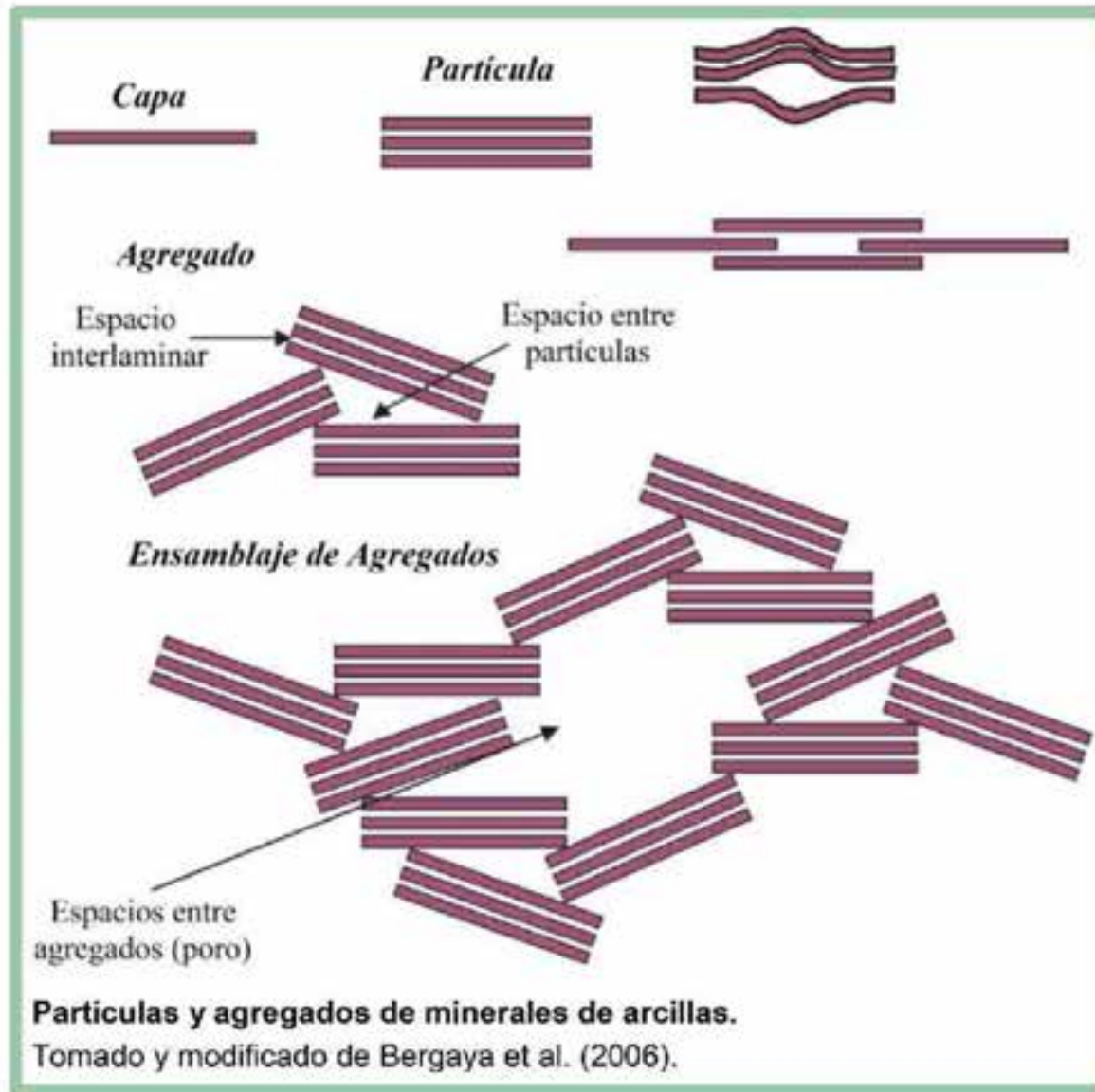


Clinocloro



Chamosita





# Cómo?

Técnica	Equipo	Marca
Florescencia de Rayos X (XRF)	Espectrómetro Secuencial S8 TIGER.	Bruker
Difracción de Rayos X (XRD) para Roca Total y Arcillas	Difractómetro de Rayos X D2 PHASER	Bruker.
Mineralogía Automatizada basada en SEM	Analizador Mineral Integrado TESCAN (TIMA)	TESCAN

## Otros

- Analizador mineral basado en espectroscopia del infrarrojo cercano (NIR)
- Espectroscopia de difracción por Rayos Laser.
- Espectroscopia Raman

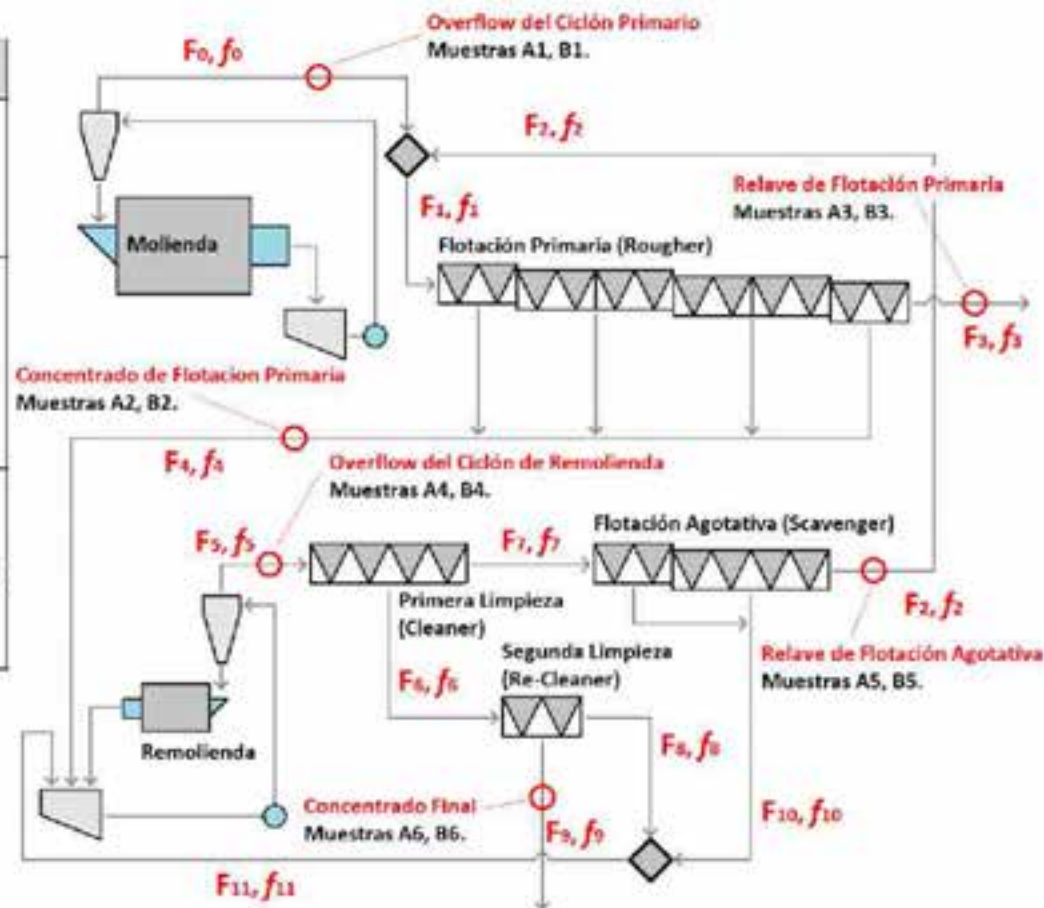
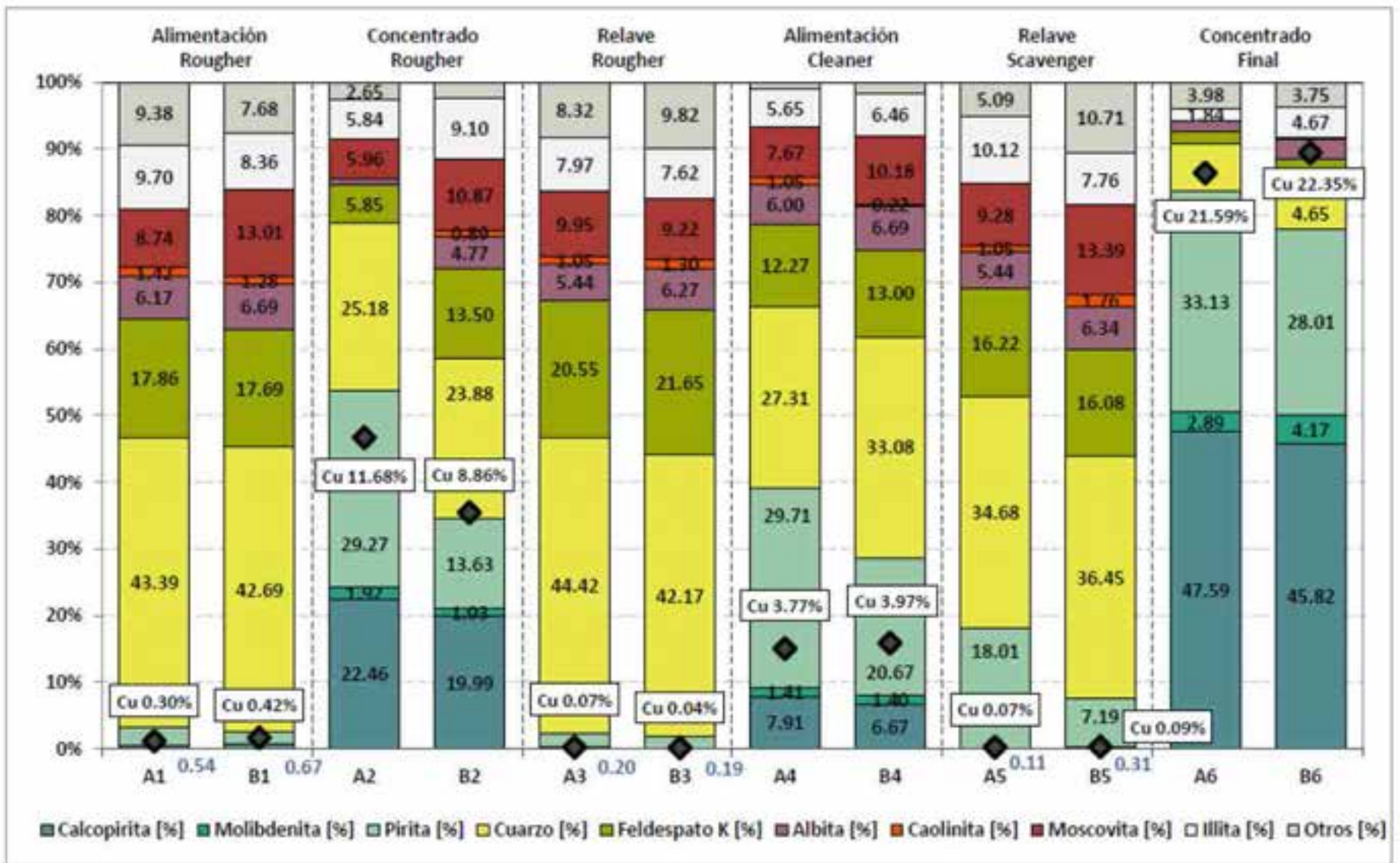
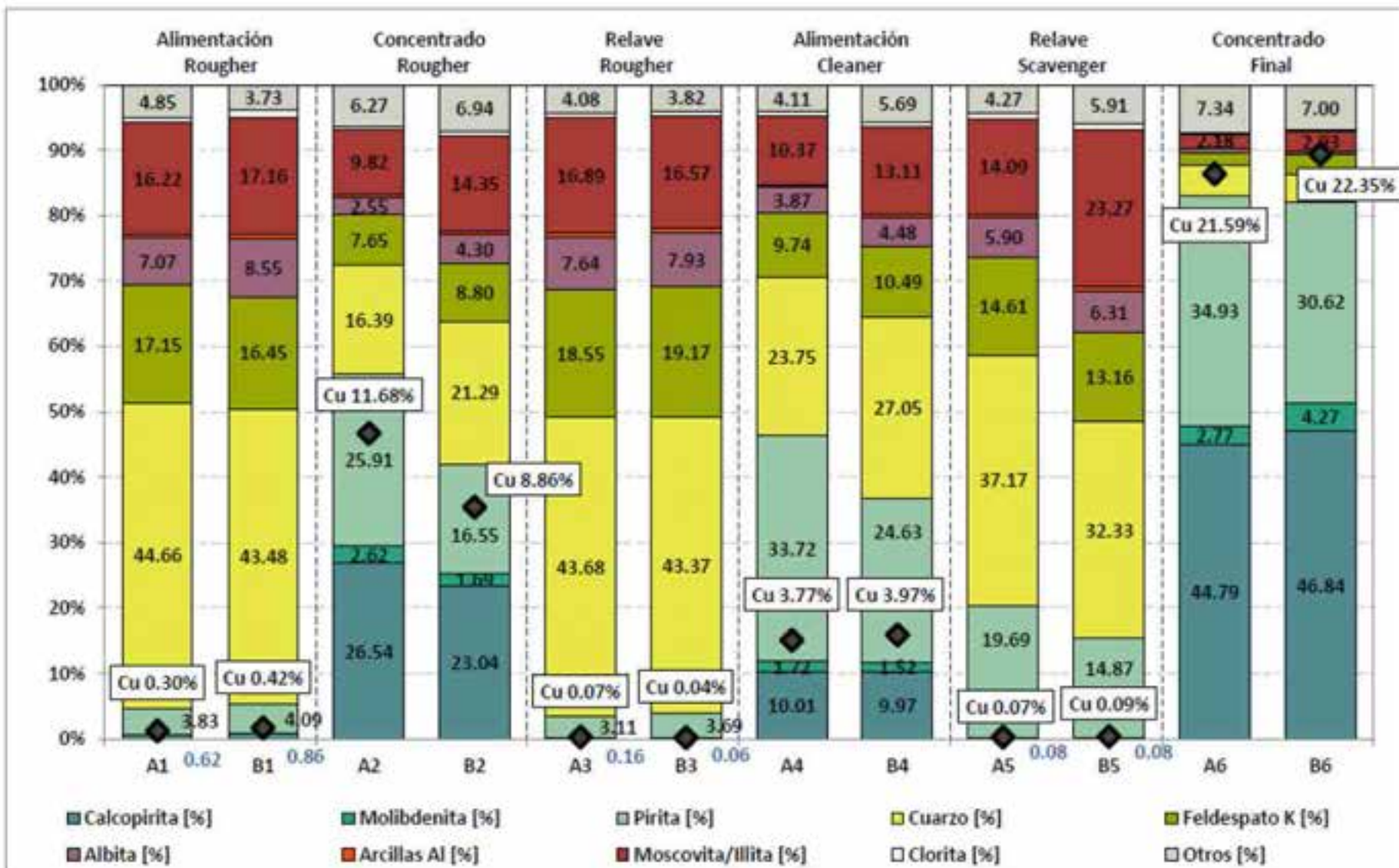


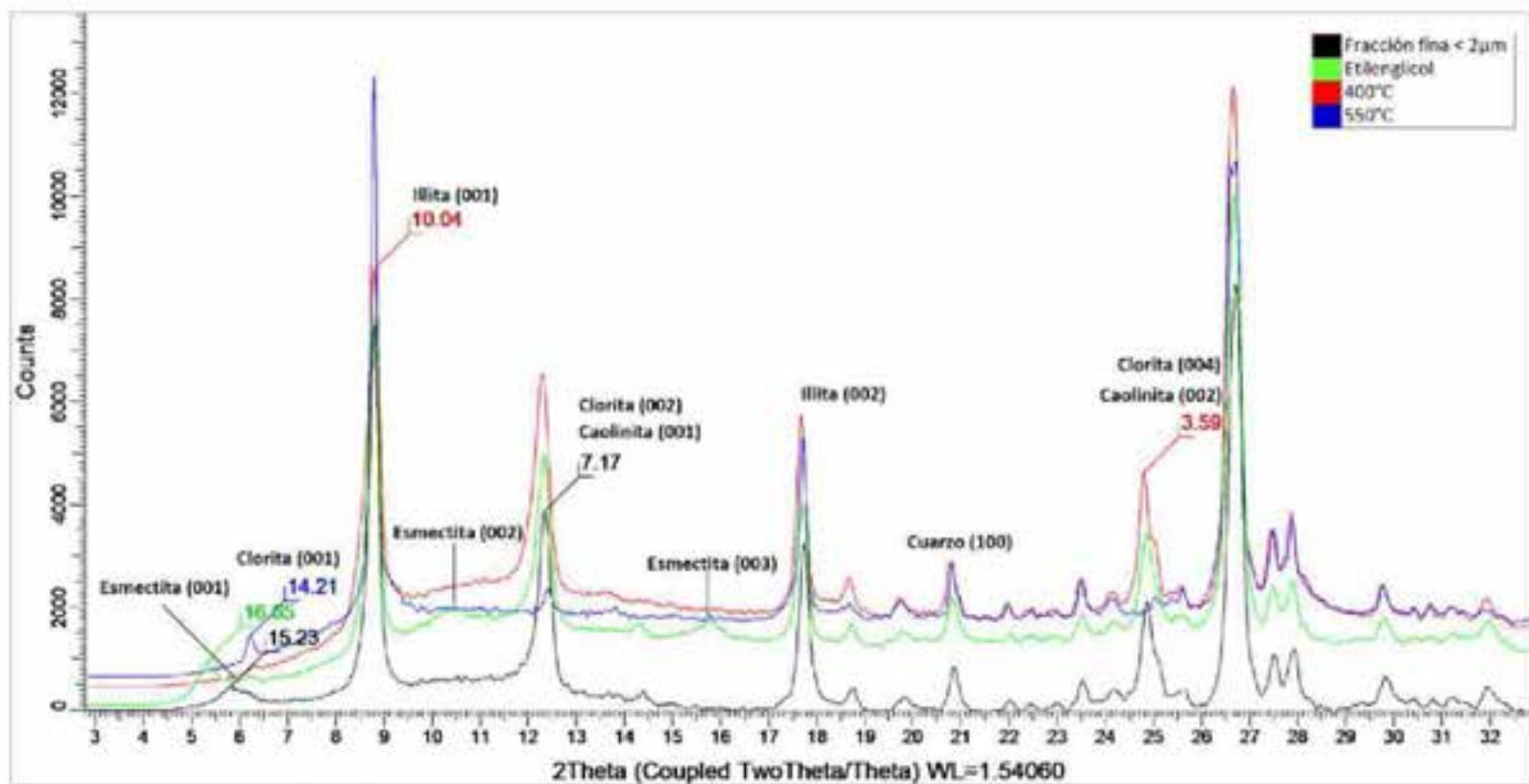
Diagrama de flujo de proceso de flotación.



Caracterización mineralógica via XRD Roca Total.



Caracterización mineralogía via TSCAN.



Difractograma XRD Arcillas muestra A1.

- Factores de Intensidad Mineral (MIF).
- **Identificación de especies minerales para Biscaye (1965).**
- Enfoque 100%

### Cuantificación de fracciones de peso de la separación por centrifugación.

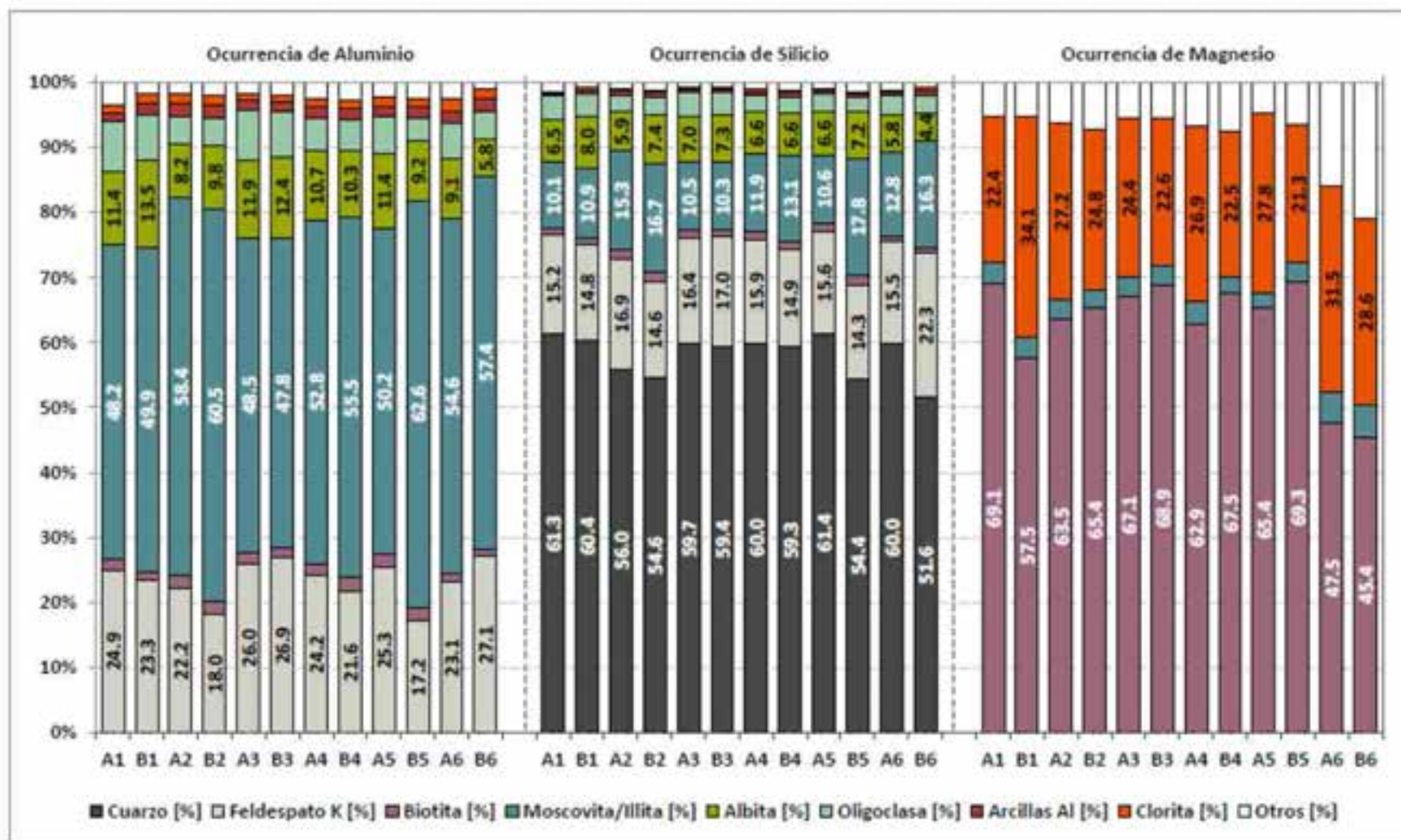
Fracción	Alimentación Rougher		Concentrado Rougher		Relave Rougher		Alimentación Cleaner.		Relave Scavenger		Concentrado Final	
	A1	B1	A2	B2	A3	B3	A4	B4	A5	B5	A6	B6
Gruesa > 2 $\mu$ m [%]	92.64	93.95	95.5	92.26	95.25	95.26	91.55	93.21	94.25	90.27	98.07	96.31
Fina < 2 $\mu$ m [%]	7.36	6.05	4.5	7.74	4.75	4.74	8.45	6.79	5.75	9.73	1.93	3.61

### Semi-cuantificación mineralógica de arcillas via XRD.

Especie	Alimentación Rougher		Concentrado Rougher		Relave Rougher		Alimentación Cleaner		Relave Scavenger		Concentrado Final	
	A1	B1	A2	B2	A3	B3	A4	B4	A5	B5	A6	B6
Caolín/Clorita [%]	3.09	3.24	1.85	3.31	0.00*	0.00*	0.00*	0.00*	3.72	3.48	0.00*	0.00*
Caolín [%]	0.00*	0.00*	0.00*	0.00*	1.74	2.38	3.22	2.47	0.00*	0.00*	0.00*	0.00*
Illita [%]	2.80	1.59	2.65	2.55	2.18	1.18	5.23	4.32	2.03	6.25	0.01**	3.61
Esmectita [%]	1.47	1.23	0.00*	1.88	0.61	0.95	0.00*	0.00*	0.01**	0.00*	0.00*	0.00*
Clorita [%]	0.00*	0.00*	0.00*	0.00*	0.22	0.23	0.00*	0.00*	0.00*	0.00*	0.00*	0.00*

\* Significa que no se cuantifica por esta técnica, pero no supone que no esté presente.

\*\* Se reporta presencia, pero por su bajo contenido no se puede cuantificar (Traza).



Ocurrencia mineral de aluminio, silicio y magnesio en las secciones A y B.

A1, B1 - Alimentación Rougher

A2, B2 - Concentrado Rougher

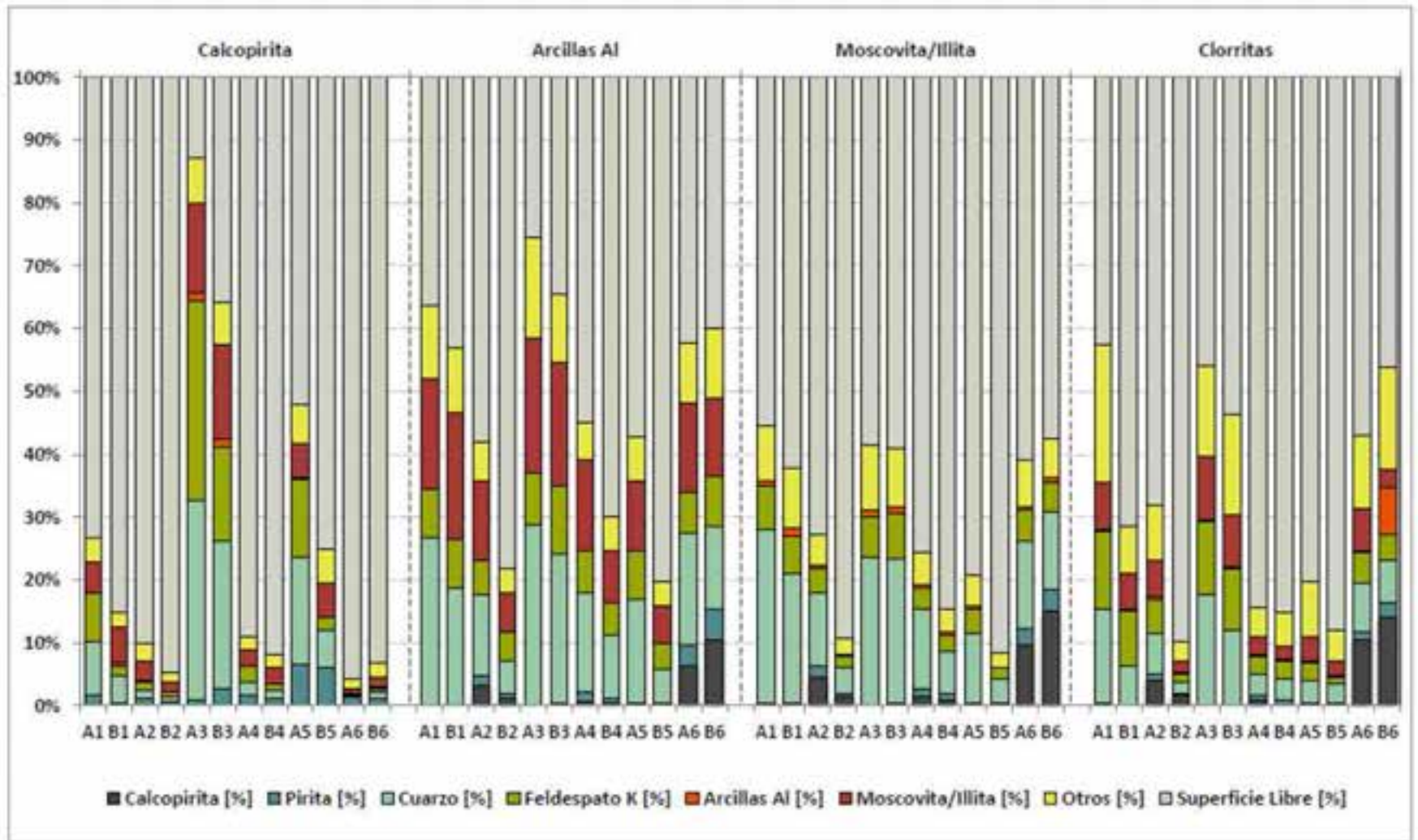
A3, B3 - Relave Rougher

A4, B4 - Alimentación Cleaner

A5, B5 - Relave Scavenger

A6, B6 - Concentrado Final





**Oclusión mineral.**

A1, B1 - Alimentación Rougher

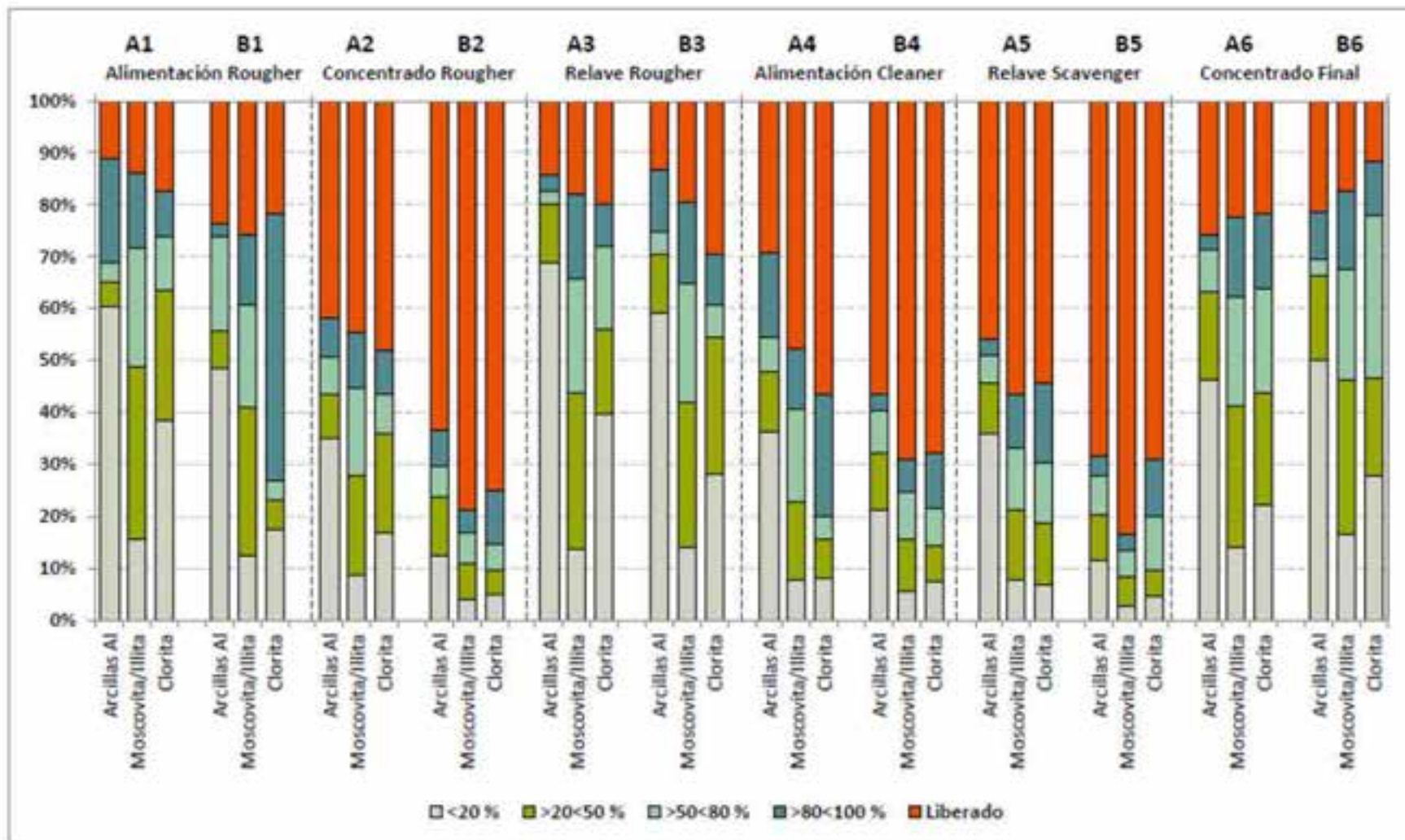
A2, B2 - Concentrado Rougher

A3, B3 - Relave Rougher

A4, B4 - Alimentación Cleaner

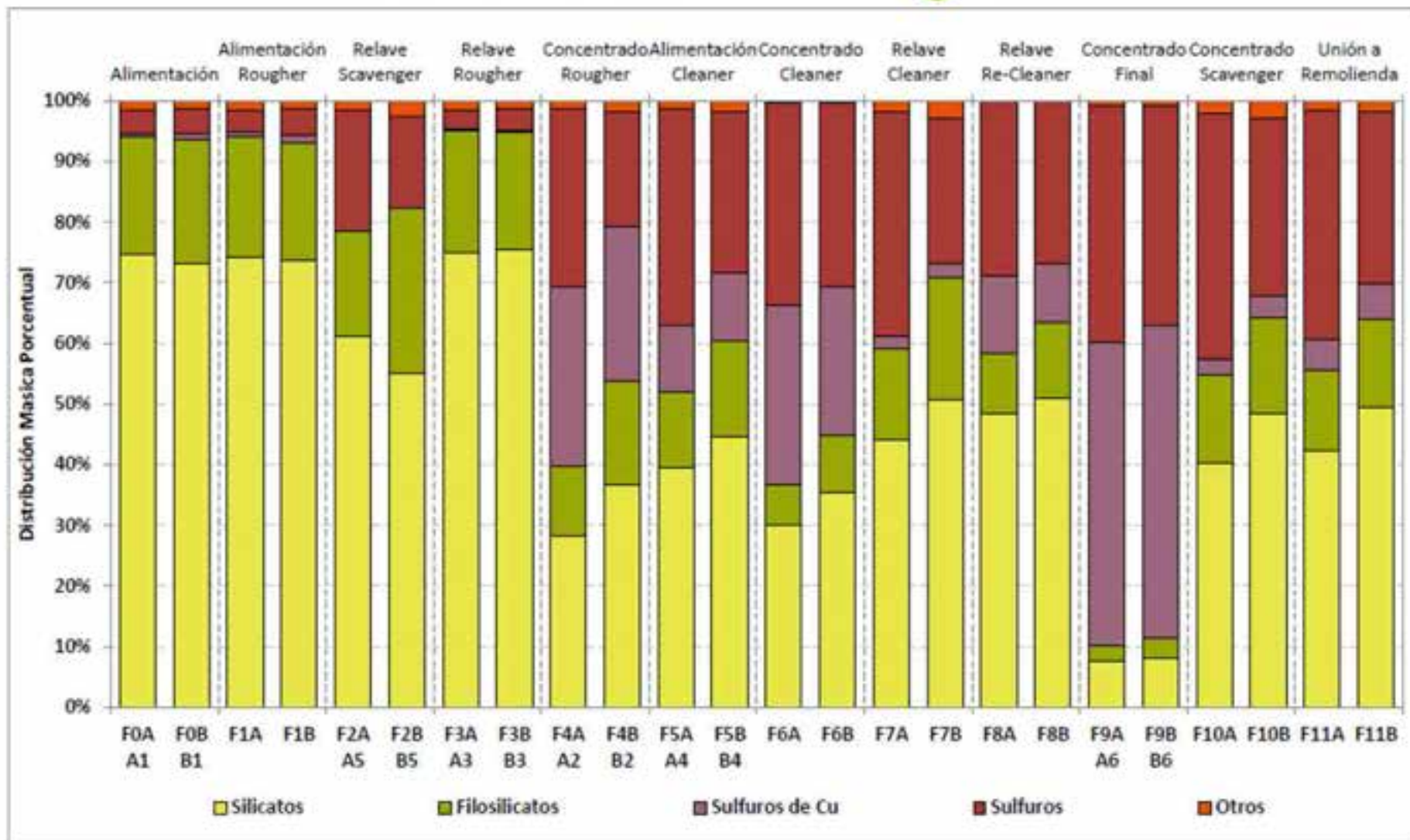
A5, B5 - Relave Scavenger

A6, B6 - Concentrado Final



Liberación mineral de filosilicatos.

# Balance Mineralógico



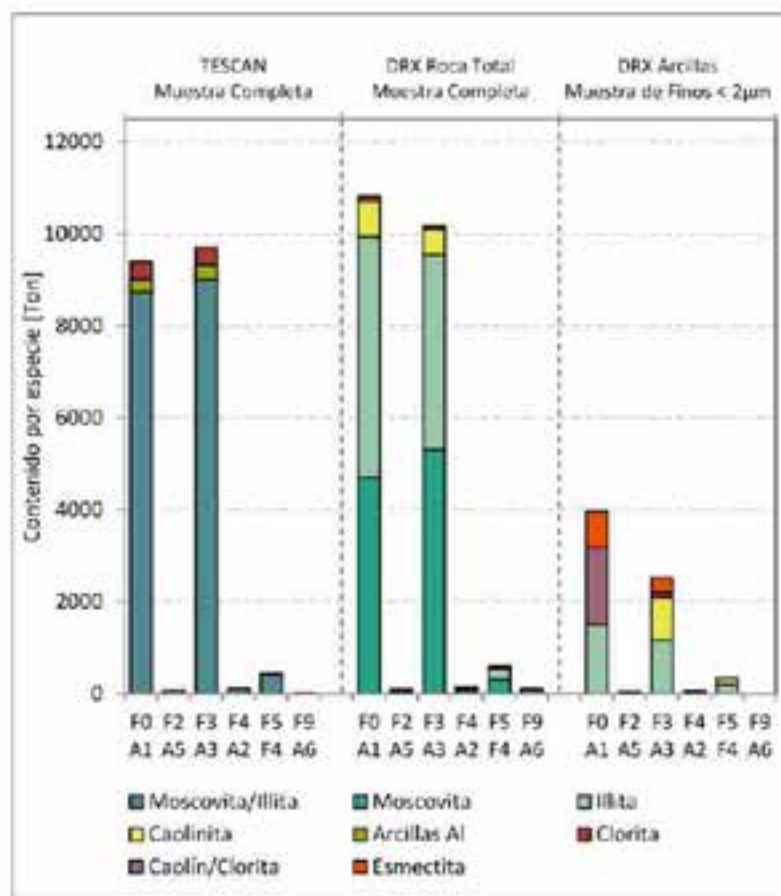
Distribución másica porcentual de las corrientes de las secciones A y B.

# Balance Mineralógico - Arcillas

Prefijos de identificación de filosilicatos y arcillas según técnica aplicada.

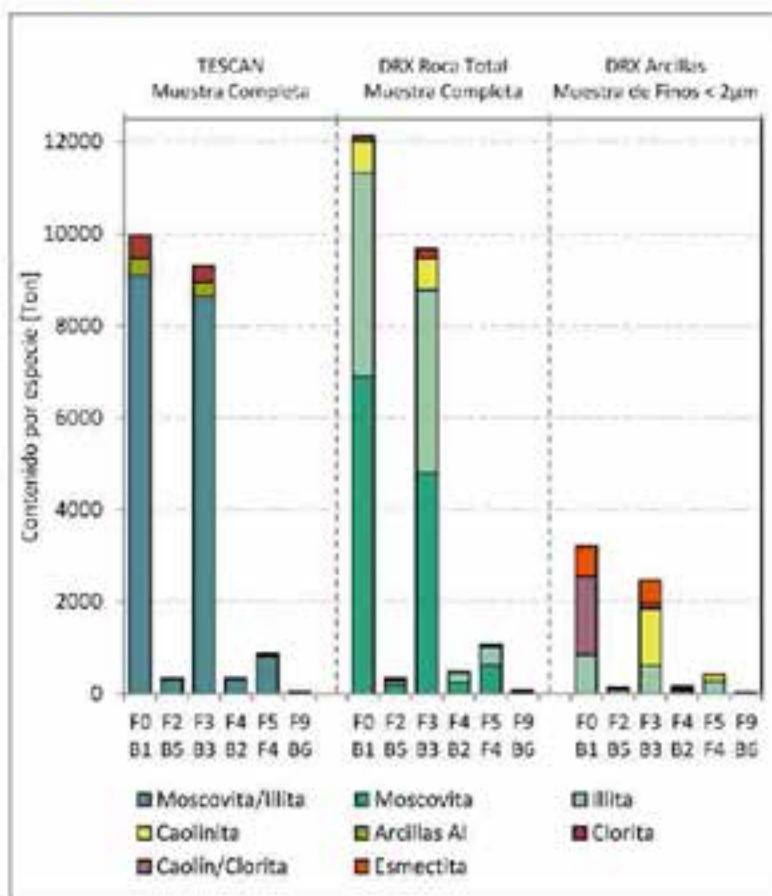
Técnica	Mineralogía Automatizada	XRD Roca Total	XRD Arcillas
<i>Muestra</i>	<i>Muestra completa</i>	<i>Muestra completa</i>	<i>Fracción fina &lt; 2 μm</i>
Especie/Grupo	Reporta como:	Reporta como:	Reporta como:
<b>Caolinita</b>	Arcillas Al	Caolinita	Caolinita Caolinita/Clorita
<b>Clorita</b>	Cloritas	Clinocloro	Clorita Caolinita/Clorita
<b>Moscovita</b>	Moscovita/Illita	Moscovita	(Partículas generalmente macroscópicas. No reporta en la fracción fina < 2μm)
<b>Illita</b>	Moscovita/Illita	Illita	Illita
<b>Esmectita</b>	Arcillas Al	(Partículas microscópicas. No se alcanzan a identificar en los difractogramas)	Esmectita

# Balance Mineralógico - Arcillas



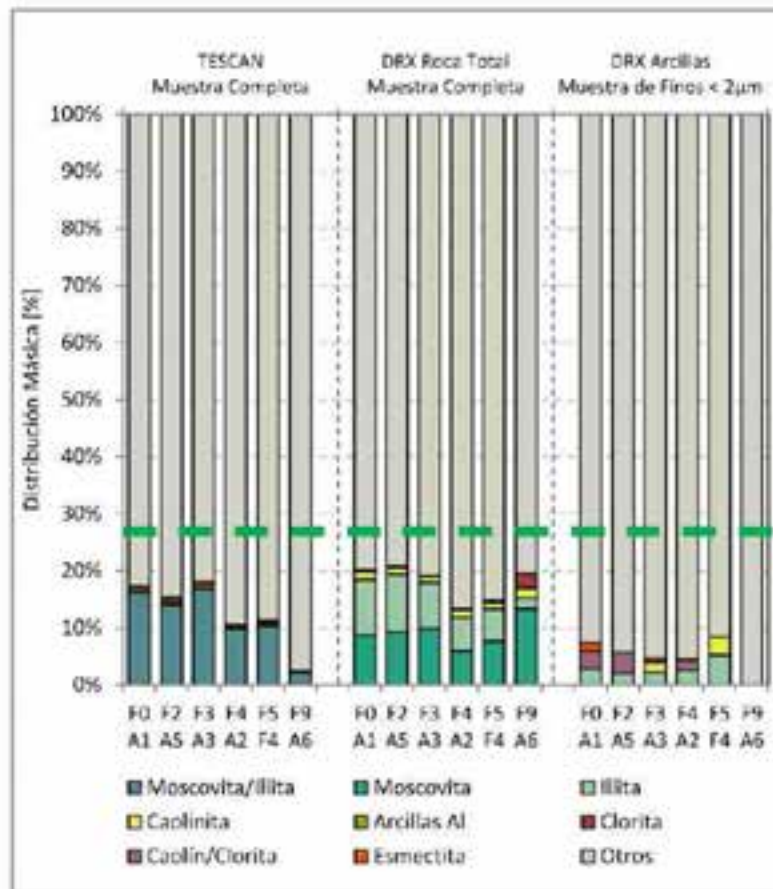
Contenido másico de filosilicatos y arcillas en corrientes muestreadas de la Sección A.

A1, B1 - Alimentación Rougher    A2, B2 - Concentrado Rougher    A3, B3 - Relave Rougher  
A4, B4 - Alimentación Cleaner    A5, B5 - Relave Scavenger        A6, B6 - Concentrado Final



Contenido másico de filosilicatos y arcillas en corrientes muestreadas de la Sección B.

# Balance Mineralógico - Arcillas



Distribución másica porcentual de filosilicatos y arcillas en corrientes muestreadas de la Sección A.

A1, B1 - Alimentación Rougher

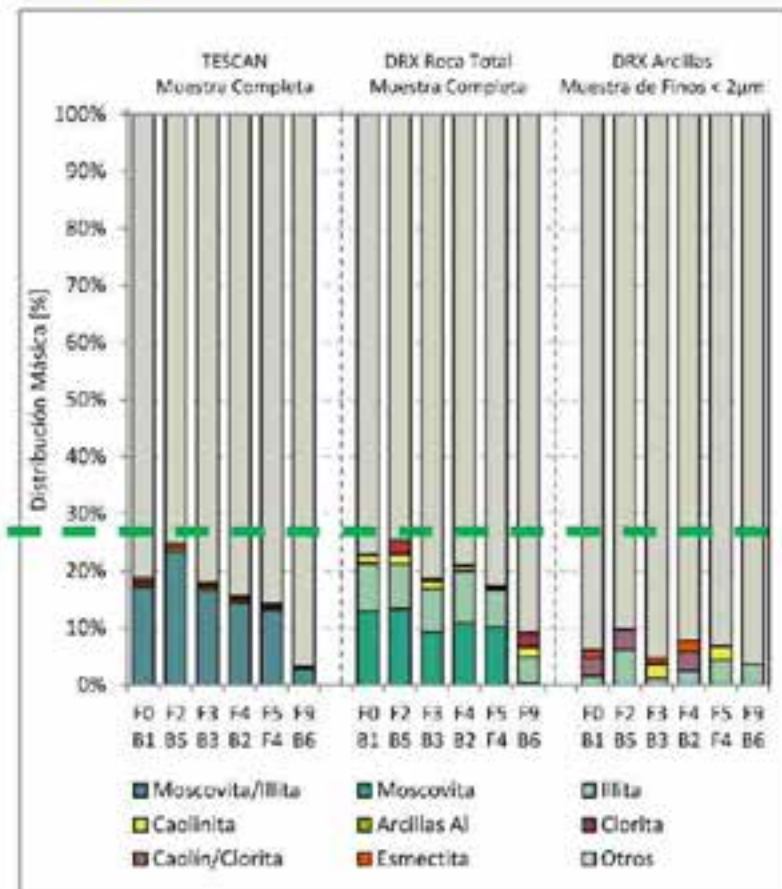
A2, B2 - Concentrado Rougher

A3, B3 - Relave Rougher

A4, B4 - Alimentación Cleaner

A5, B5 - Relave Scavenger

A6, B6 - Concentrado Final



Distribución másica porcentual de filosilicatos y arcillas en corrientes muestreadas de la Sección B.

# PROTOCOLO DE EVALUACIÓN DE MINERALES DE ARCILLAS EN PROCESO DE FLOTACIÓN.



# 1. Definición de Minerales de Arcillas.

Definición de minerales de arcillas según diferentes criterios.

Según definición JNCs	Según su capacidad de absorción	Según su tamaño < 2µm	Según sus efectos
Grupo Caolinita - Serpentina	Subgrupo Caolines (Arcilla no absorbente)	Subgrupo Caolines	Subgrupo Caolines
Grupo Pirofilita - Talco	-	Subgrupo Pirofilita	Subgrupo Pirofilita
Grupo Esmectitas	Grupo Esmectita (Arcilla absorbente – expansiva)	Subgrupo Montmorillonitas	Grupo Esmectitas
Grupo Vermiculita	-	-	-
Grupo Illitas	Grupo Illitas (Arcilla no absorbente)	Subgrupo Illitas	Subgrupo Illitas
Grupo de las Micas	-	-	-
Grupo de las Cloritas	Grupo de las Cloritas (Arcilla no absorbente)	-	-
Grupo Palygorskita-Sepiolita	Grupo Palygorskita-Sepiolita (Arcilla absorbente – No expansiva)	-	-



# 1. Definición de Minerales de Arcillas.

Clasificación de minerales de arcilla según referencias bibliográficas.

Grupo	Subgrupo	Moore & Reynolds (1997)	Meunier (2005)	Murray (2007)	Christidis (2011)	Deer et al. (2013)
Caolinita-Serpentina	Caolines	✓	✓	✓	✓	✓
	Serpentinas	✓	✓		✓	
Pirofilita-Talco	Pirofilita	✓	✓		✓	
	Talco	✓	✓		✓	
Esmectitas	Montmorillonitas	✓	✓	✓	✓	✓
	Saponitas	✓	✓		✓	
Vermiculita	Vermiculita	✓	✓		✓	✓
Illitas	Illita	✓	✓	✓	✓	✓
Micas	Mica	✓	✓		✓	
	Mica	✓	✓		✓	
Micas Frágiles	Mica Frágil	✓	✓		✓	
	Mica Frágil		✓		✓	
Cloritas	Clorita	✓	✓	✓	✓	
	Clorita	✓	✓		✓	
Palygorskita-Sepiolita (Estructura Fibrosa)	Palygorskita	✓	✓	✓	✓	✓
	Sepiolita	✓	✓		✓	

## 2. Contexto del Estudio

### Escenarios de estudios mineralógicos en procesos de flotación.

Escenario 1	Escenario 2	Escenario 3	Escenario 4
<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Análisis de muestras para anticipar y prever futuros escenarios.</li> <li>▪ Obtener datos específicos para incorporar en modelos predictivos o de planeación.</li> <li>▪ Uso de muestras de pozos de tronadura y sondajes.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Análisis que se generan como una necesidad para soluciones puntuales de proceso.</li> <li>▪ Entendimiento de la dinámica de los materiales.</li> <li>▪ Muestras tomadas posterior a la evidencia de una situación no considerada.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Análisis considerados en la batería de ensayos de pruebas metalúrgicas y plantas piloto. (Test de flotación)</li> <li>▪ Casi siempre consideran un plan de muestreo.</li> <li>▪ Muestras de nuevos materiales de alimentación o condiciones de proceso (puntos de acción o nuevas combinaciones de aditivos o reactivos).</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Análisis donde el objetivo principal no son los minerales de arcilla, pero se espera que incluya otra información pertinente.</li> <li>▪ Muestras puntuales y de programas de aseguramiento de la calidad (QA) y control de calidad (QC).</li> </ul>

**Preventivo**

**Puntual**

**Pruebas**

**Oportunidad**

# 3. Consideraciones de Muestreo.

## Tipos de muestras según escenarios

Escenario 1	Escenario 2	Escenario 3	Escenario 4
<ul style="list-style-type: none"> <li>Muestras de pozos de tronadura y sondajes (Perforación Diamantina y Perforación de Aire Reverso)</li> <li>Muestras de chancado, molienda, alimentación a la flotación.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Muestras de mina, chancado, molienda.</li> <li>Alimentación, concentrado y relave de celdas Rougher, celdas Scavenger, Cleaner, Re-Cleaner.</li> <li>Espesador de relaves, agua clara, filtros de concentrados, deposición de relaves.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Muestras de pozos de tronadura y sondajes (Perforación Diamantina y Perforación de Aire Reverso)</li> <li>Muestras de chancado, molienda, alimentación a la flotación.</li> <li>Alimentación, concentrado y relave de celdas Rougher, celdas Scavenger, Cleaner, Re-Cleaner.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Cualquier tipo de muestra.</li> <li>Muestras de QAQC.</li> </ul>

Exploración Mina

Proceso

Mina/Procesos

Todas/QAQC

# 4. Selección de Método Cuantitativo.

	Información entregada	Identificación de Especies	Identificación y Cuantificación	Muestra	Ventajas	Desventajas
XRD Roca Total	<ul style="list-style-type: none"> <li>Mineralogía Modal</li> <li>Grado de cristalinidad.</li> <li>Cristalinidad por especies.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Determinación de filosilicatos de tamaño macroscópico como lo es el grupo de las Micas.</li> <li>Grupos caolinita, clorita, illitas, pirofilita y esmectitas, pueden semi-cuantificarse, pero no a niveles traza.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Intensidades características según geometría de cada mineral.</li> <li>Según asignación e interpretación del espectro, el software semi-cuantifica partir de las áreas bajo la curva de cada reflexión.</li> <li>Determinación de especies mayoritarias de la muestra. No hay un límite de detección mínimo, puesto que la identificación de los Peaks es dependiente del porcentaje másico de los otros minerales formadores de la muestra.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>La muestra es micronizada.</li> <li>Tiempo de micronizado lo define el técnico de preparación de muestra.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Análisis Rápido</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Correcta identificación de fases depende de grado de micronización de muestra.</li> <li>Filosilicatos a nivel traza no son cuantificados.</li> <li>No detecta grupo de Esmectitas ni filosilicatos de tamaño microscópico, puesto que las señales salen del espectro.</li> <li>Cuantificación no es absoluta, es interpretativa.</li> </ul>

## 4. Selección de Método Cuantitativo.

	Información entregada	Identificación de Especies	Identificación y Cuantificación	Muestra	Ventajas	Desventajas
XRD Arcillas	<ul style="list-style-type: none"> <li>Mineralogía de fracción fina (&lt;2 <math>\mu\text{m}</math>)</li> <li>Grado de cristalinidad.</li> <li>Cristalinidad de especies de la fracción fina (&lt;2 <math>\mu\text{m}</math>)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Según las señales puede identificar los grupos caolinita, illita, vermiculita, esmectita, pirofilita, palygorskita-sepiolita y <i>Mixed Layer</i>.</li> <li>Según el modelo aplicado se pueden semi-cuantificar los porcentajes de masa en la muestra de finos separada.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Intensidades características según geometría de los filosilicatos identificados.</li> <li>Según asignación e interpretación del espectro, el software provee las áreas bajo la curva de cada reflexión.</li> <li>Con las áreas bajo la curva, es posible usar métodos de semi cuantificación según las especies del Difractograma. (Ver Tabla 12)</li> <li>Limite mínimo de detección: Relativo. No existe un valor fijo mínimo de detección.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>La muestra no es reducida</li> <li>Las muestras de concentrado vienen ricas en aldehídos, alcoholes, esterres (espumantes) y demás reactivos de origen orgánico, lo que dificulta la adecuada separación de la fracción fina.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Permite identificar especies minerales con mayor precisión que otras técnicas, incluso de especies a nivel traza.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Separación de finos de la muestra es compleja y es altamente dependiente de la experiencia del técnico preparador.</li> <li>La preparación de la muestra requiere mayor cantidad de tiempo.</li> <li>La identificación y la determinación del área de los Peaks aumentan la varianza del método.</li> <li>Métodos de semi-cuantificación no tienen protocolo de elección.</li> <li>Cuantificación no es absoluta, es interpretativa.</li> </ul>

# 4. Selección de Método Cuantitativo.

	Información entregada	Identificación de Especies	Identificación y Cuantificación	Muestra	Ventajas	Desventajas
Mineralogía Automatizada basada en SEM	<ul style="list-style-type: none"> <li>Mineralogía Modal.</li> <li>Análisis de liberación y oclusión mineral.</li> <li>Imágenes de partículas.</li> <li>Asociación mineral.</li> <li>Distribución de tamaño por fases minerales (granos y partículas)</li> <li>Ocurrencia de elementos.</li> <li>Superficie libre.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Puede identificar a nivel de especies según se le especifique al equipo.</li> <li>Identifica todos los minerales, incluso trazas contenidos en la briqueta.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Composición química.</li> <li>Límite de detección de minerales: 0.01%.</li> <li>El equipo puede configurarse para reportar grupos o especies minerales. Según especificación del cliente.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>La muestra no es reducida granulométricamente.</li> <li>Se estudia el perfil granulométrico y se crean las briquetas según la heterogeneidad de la muestra.</li> </ul> <p><b>Observaciones:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>La segregación mineral que ocurre durante el encapsulamiento de la muestra en la resina que conforma la briqueta, predispone a que los minerales menos densos y pequeños queden sobre la superficie de la briqueta.</li> <li>En el desbaste de la briqueta se pueden ir algunos filosilicatos (si quedaron con el plano 001 paralelo a la superficie de la briqueta).</li> <li>El medio acuoso del pulido es selectivo para filosilicatos (agua) y otros minerales (alcohol).</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Mayor cantidad de información reportada.</li> <li>Buena conciliación con XRF.</li> <li>Método determinístico, no depende de la interpretación del analista.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>En la conformación de la briqueta se debe tener especial atención para evitar pérdida de finos durante pulido y desbaste.</li> <li>Identificación de fases según composición química, lo que hace menos precisa la distinción entre especies de similar composición.</li> <li>Muestras heterogéneas deben separarse en dos o más fracciones para la constitución de briquetas; incrementando tiempos de barrido y el costo de la muestra.</li> </ul>

# 5. Caracterización de Minerales de Arcillas.

## Estabilidad de la espuma

- Montmorillonita > moscovita > illita > caolinita
- Esmectitas (> 15%) y Caolinita (> 30%)
- Flotoactividad reduce la ley de cobre.

## Propiedades reológicas

- Montmorillonita > moscovita, caolinita
- Influye pH y cristalinidad. Formación de agregados.
- Esmectitas (5 al 15%), Caolinita (> 30%) y Moscovita.

## Cinética de Flotación

- Caolinita (>30%): Efectos sobre velocidad de flotación de minerales de Cu. Efecto pronunciado a pH < 6.

## Recubrimiento Limo

- Moscovita > illita, pirofilita > montmorillonita, caolinita.
- Moscovita (> 30%), Illita (> 30%) cobertura superficial. Esmectitas (30%), caolinita (30%) efectos mínimos

## Interacción con minerales de ganga

- Montmorillonita > caolinita > illita
- Iones Ca<sup>2+</sup> tienen efecto sinérgico sobre reología.

## Grado/Recuperación de Cu.

- Montmorillonita, pirofilita > moscovita > caolinita > illita
- Esmectitas (> 15%), Illita (> 30%), caolinita (> 30%) Menor grado de Cu. Menor recuperación de Cu.

# 5. Caracterización de Minerales de Arcillas.

Elección de técnica metodológica según parámetro metalúrgico de estudio.

Parámetros metalúrgicos	Grupo	Impacto	Preponderancia de Impacto	Técnica de cuantificación adecuada
Estabilidad de la espuma	Esmectitas	<ul style="list-style-type: none"> <li>Concentraciones &gt; 15%, aumenta considerablemente estabilidad de la espuma. <sup>¶</sup></li> <li>Reduce la cantidad de espuma en la parte superior de suspensión. <sup>†</sup></li> </ul>	Montmorillonita > moscovita > illita > caolinita <sup>¶</sup>	Difracción de Rayos X Arcillas
	Caolinita	<ul style="list-style-type: none"> <li>Concentraciones &gt; 30%, aumenta ligeramente la estabilidad de la espuma. <sup>¶</sup></li> <li>Flotoactividad reduce la ley de cobre. <sup>†</sup></li> </ul>		
Propiedades reológicas (Viscosidad)	Esmectitas	<ul style="list-style-type: none"> <li>Límite de elasticidad de pulpa aumenta considerablemente a concentraciones &gt; 15%. <sup>¶</sup></li> <li>Formación de agregados de estructura similar a una esponja (hinchamiento) <sup>¶</sup></li> <li>Cambia comportamiento de la suspensión de newtoniana a pseudoplástico. <sup>¶,¶</sup></li> <li>Efectos tangibles a concentraciones de 5 al 15 en %peso. <sup>†</sup></li> </ul>	Montmorillonita > moscovita, caolinita <sup>¶,†</sup>	Difracción de Rayos X Arcillas
	Caolinita	<ul style="list-style-type: none"> <li>Límite de elasticidad de pulpa aumenta ligeramente a concentraciones &gt; 30%. <sup>¶</sup></li> <li>Incrementa la viscosidad de la suspensión y la desvía del comportamiento newtoniano <sup>¶</sup>. Efecto pronunciado a menor pH. <sup>¶</sup></li> <li>Efecto incrementa con grado de cristalinidad. Caolinita mal cristalizada tiene mayor área superficial, por tanto, mayor efecto. <sup>†</sup></li> </ul>		
	Moscovita	<ul style="list-style-type: none"> <li>Cambia el comportamiento de la pasta en relación al pH del medio. PH 7 comportamiento de gel tixotrópico y viscoelástico; pH 1, comportamiento de gel elástico y altamente en red. Cambio en la química de la pulpa y modificación de la estructura de otras partículas de arcilla. <sup>†</sup></li> </ul>		
Recubrimiento Limo (Potencial Z)	Esmectitas	<ul style="list-style-type: none"> <li>Adición directa de 30% de montmorillonita sugiere efecto mínimo. <sup>¶</sup></li> <li>La flotación de calcosina en presencia de bentonita es baja. <sup>¶</sup></li> </ul>	Moscovita > illita, pirofilita > montmorillonita, caolinita <sup>¶</sup>	Mineralogía Automatizada basada en SEM
	Caolinita	<ul style="list-style-type: none"> <li>Adición directa de 30% de caolinita sugiere efecto mínimo. <sup>¶</sup></li> <li>Recubrimiento sobre partículas de calcosina <sup>¶</sup> y hematita <sup>†</sup>.</li> </ul>		
	Illita	<ul style="list-style-type: none"> <li>Adición directa de 30% de illita sugiere cobertura de la superficie parcial. <sup>¶</sup></li> <li>La adsorción de cobre en la superficie de illita es fuertemente dependiente del pH. <sup>¶</sup></li> </ul>		
	Micas	<ul style="list-style-type: none"> <li>Adición directa de 30% moscovita, sugiere cobertura de la superficie total de las partículas de calcopirita. <sup>¶</sup></li> </ul>		
Cinética de Flotación	Caolinita	<ul style="list-style-type: none"> <li>Disminuye velocidad de flotación de minerales de interés. <sup>¶</sup></li> <li>Efecto sobre la flotabilidad de la calcopirita en concentraciones superiores a 30%. Efecto pronunciado a pH &lt; 6. <sup>¶</sup></li> </ul>	Caolinita	Mineralogía Automatizada basada en SEM



# 5. Caracterización de Minerales de Arcillas.

Elección de técnica metodológica según parámetro metalúrgico de estudio (Continuación)

Parámetros metalúrgicos	Grupo	Impacto	Preponderancia de Impacto	Técnica de cuantificación adecuada
Interacción con minerales de ganga	Esmectitas	<ul style="list-style-type: none"> <li>■ Iones <math>\text{Ca}^{2+}</math> liberados de yeso dispersan suspensiones de bentonita sódica, la desactivan o previenen su hinchazón resultando bajas propiedades reológicas. <sup>a,1</sup></li> </ul>	Montmorillonita > caolinita > illita	Difracción de Rayos X Arcillas
	Caolinita	<ul style="list-style-type: none"> <li>■ Presencia de cantidades significativas de calcita, dolomita y yeso tienen un efecto sinérgico sobre las propiedades reológicas. Efectos similares a un modificador de pH. <sup>a,2</sup></li> </ul>		
	Illita	<ul style="list-style-type: none"> <li>■ La interacción de los minerales de arcilla con otros minerales de la ganga, son el principal contribuyente en los cambios de las propiedades reológicas. <sup>a</sup></li> <li>■ Adición de yeso mejora recuperación, pero disminuye grado debido a mayor arrastre de minerales de arcilla. <sup>a</sup></li> </ul>		
Grado de flotación de cobre Recuperación	(Minerales de arcilla)	<ul style="list-style-type: none"> <li>■ Mayor cantidad de finos disminuye ley de Cu y aumenta grado de <math>\text{Al}_2\text{O}_3</math> y <math>\text{SiO}_2</math>. <sup>a</sup></li> <li>■ Mayor viscosidad de pasta, más baja recuperación de cobre. <sup>1</sup></li> <li>■ Interacción con reactivos puede mejorar la recuperación, pero disminuyen grado debido al arrastre de filosilicatos a la espuma. <sup>f</sup></li> </ul>	Montmorillonita, pirofilita > moscovita > caolinita > illita <sup>a,2</sup>	Mineralogía Automatizada basada en SEM
	Esmectitas	<ul style="list-style-type: none"> <li>■ Concentraciones &gt; 15%, grado de Cu decrece considerablemente 18-5%. <sup>a</sup></li> <li>■ Concentraciones &gt; 15%, recuperación de Cu disminuye 90-80%. <sup>a</sup></li> <li>■ Mayor viscosidad, menor calidad de la espuma, menor recuperación de cobre. <sup>f</sup></li> </ul>		
	Pirofilita	<ul style="list-style-type: none"> <li>■ Flotación de pirofilita se ve afectada por una amplia molienda. Disminución de grado y recuperación de <math>\text{Al}_2\text{O}_3</math> puede explicarse por el efecto de tamaños muy finos y el resultado de la alteración estructural generado durante la molienda. <sup>a</sup></li> </ul>		
	Caolinita	<ul style="list-style-type: none"> <li>■ Concentraciones &gt; 30%, grado de Cu decrece considerablemente 18-1%. <sup>a</sup></li> <li>■ Concentraciones &gt; 30%, recuperación de Cu disminuye ligeramente 90-88%. <sup>a</sup></li> <li>■ Recuperación global de flotación disminuye significativamente a mayores porcentajes de caolinita y el efecto se aumenta a pH &lt; 6. <sup>a</sup></li> </ul>		
	Illita	<ul style="list-style-type: none"> <li>■ Concentraciones &gt; 30%, grado de Cu decrece considerablemente 18-5%. <sup>a</sup></li> <li>■ Concentraciones &gt; 30%, recuperación de Cu disminuye ligeramente 90-88%. <sup>a</sup></li> </ul>		

Efectos evaluados sobre la adición directa de filosilicatos en flotación de calcopirita.

Fuentes: a: Barkhordari et al. (2009), b: Peng & Zhao (2011), c: Farrokhpay & Ndlovu (2013), d: Cruz et al. (2013), e: Forbes et al. (2014), f: Wang et al. (2015), g: Cruz et al. (2015a), h: Cruz et al. (2015b), i: Zhang & Peng (2015), j: Nosrati, et al. (2011), k: Zhao & Peng (2014), l: Sahoo, et al. (2016), m: Du, et al. (1997), n: Erdemoglu & Sankaya (2002), o: Ndlovu, et al. (2014), p: Jorjani, et al. (2011)-q: Farrokhpay, et al. (2016)

# 5. Caracterización de Minerales de Arcillas.

Elección de técnica metodológica según escenario de estudio y definición de minerales de arcilla.

Definición de minerales de arcilla	Escenario 1	Escenario 2	Escenario 3	Escenario 4
Según definición JNCs (todos los filosilicatos)	Mineralogía automatizada basada en SEM	Mineralogía automatizada basada en SEM	XRD X Roca Total Mineralogía Automatizada basada en SEM	Mineralogía automatizada basada en SEM
Según su capacidad de absorción	XRD Roca Total XRD Arcillas	XRD Roca Total XRD Arcillas	XRD Roca Total XRD Arcillas	
Según su tamaño < 2 µm	XRD Arcillas	XRD Arcillas	XRD Arcillas	
Según sus efectos	Mineralogía automatizada basada en SEM	Mineralogía automatizada basada en SEM	XRD Roca Total XRD Arcillas	

# 6. Integración de la Mineralogía de Arcillas

Parámetros metalúrgicos	Posibles acciones de mejora
(Etapa previa) Reducción de tamaño	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Optimización de la etapa de molienda y remolienda a partir de la determinación del grado de liberación de las diferentes fracciones de tamaño en función de los contenidos de <math>\text{SiO}_2</math> and <math>\text{Al}_2\text{O}_3</math> (Barkhordari, et al., 2009)</li> <li>▪ Determinación de la influencia del grado de liberación y áreas de superficie libre de los minerales en función de la recuperación.</li> </ul>
Estabilidad de la espuma	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Cambios en la velocidad de flujo del gas de vaporización, la distribución del tamaño de burbujas, la concentración de los tensoactivos y surfactantes (Reis &amp; Barrozo, 2016).</li> <li>▪ Cambio de espumantes.</li> <li>▪ Evaluación de la afinidad de los colectores con los minerales de arcilla. Ej: Caolinita expone fuerte afinidad a los colectores catiónicos (Yuehua, et al., 2004); mientras la clorita flota fácilmente con colectores aniónicos y catiónicos (Gui-shan, et al., 2009).</li> <li>▪ Reemplazo de mezclas de reactivos patentados (especialmente colectores), por mezclas ajustadas a las condiciones propias del proceso (Petróvskaya, 2015)</li> </ul>
Propiedades reológicas (Viscosidad)	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Ajuste de los parámetros de acondicionamiento de la pulpa, las propiedades de la pulpa (densidad, contenido de sólidos) y los parámetros electroquímicos/potenciales (pH, Eh, conductividad). (Shean &amp; Cilliers, 2011)</li> <li>▪ Evaluación de los reactivos usados (espumantes, colectores, depresantes, activadores), su dosificación y orden de adición.</li> <li>▪ Pruebas de valoración de la interacción de los minerales de mena y ganga en el medio acuoso y los efectos sobre la reología de la pasta.</li> <li>▪ Uso de modificadores de viscosidad tales como pirofosfato de sodio y sosa cáustica (Ndlovu, et al., 2013)</li> </ul>

# 6. Integración de la Mineralogía de Arcillas

Parámetros metalúrgicos	Posibles acciones de mejora
Recubrimiento Limo (Potencial Z)	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Uso de aglutinantes selectivos que aglomeren los minerales de arcilla, reduzcan su actividad superficial y los deprese (Tao, et al., 2010).</li> <li>▪ Modificaciones del Potencial Z a partir del uso de electrolitos (Zhao &amp; Peng, 2014), floculantes (Mpofu, et al., 2003) y/o agentes oxidantes o reductores.</li> <li>▪ Evaluación de presencia de iones tales como <math>Ca^{2+}</math>, que inducen al revestimiento limo mucho más fácilmente (Zhijun, et al., 2013).</li> </ul>
Cinética de Flotación	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Pruebas que identifiquen los minerales que flotan de manera natural y los que primeros que floten luego de acondicionada la pasta de flotación.</li> <li>▪ Evaluación de tiempos de residencia, cantidad de celdas dispuestas, niveles de llenado y aireación</li> <li>▪ Valoración del orden de adición de los reactivos (Petrovskaya, 2014)</li> <li>▪ Evaluación de la suficiencia y calidad de la configuración del circuito. (Lotter, 2011)</li> </ul>
Interacción con minerales de ganga	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Seguimiento a posibles interacciones como minerales con alta carga de iones de <math>Ca^{2+}</math>, <math>Mg^{2+}</math>, <math>Na^+</math> y <math>K^+</math>.</li> </ul>
Grado de flotación de cobre Recuperación	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Uso de polímeros o biopolímeros como depresantes selectivos para minerales fotoactivos (Mpofu, et al., 2003)</li> <li>▪ Flotación separada de partículas finas y gruesas. (Petrovskaya, 2014)</li> <li>▪ Re diseño del diagrama de flujo de la operación, considerando o no (excluyente) el cambio de los flujos, el uso de nuevos equipos y/o la eliminación de etapas en el proceso existente. (Lotter, et al., 2011)</li> </ul>



**Muchas Gracias!**