

Mineralogía Aplicada Casos de Estudio

XXXVI Convención Internacional de Minería

Acapulco 2025

M. en C. Saúl Ortiz Landeros

Noviembre 2025

CONTENIDO

1. Conceptos Generales
2. Información Estudios Mineralógicos
3. Concepto Liberación de Minerales
4. Casos de Estudio

OBJETIVO

- ✓ Remarcar la importancia de realizar estudios mineralógicos a las muestras de exploración de los proyectos y nuevos cuerpos minerales que se identifiquen en las operaciones mineras.
- ✓ Presentar casos de estudio que nos indican como los estudios mineralógicos pueden ayudar en la optimización de los resultados metalúrgicos.

- ✓ Por mineral se entiende una materia de origen inorgánico, que presenta una composición química y estructura cristalográfica definida.
- ✓ Normalmente cuando analizamos una muestra de un barreno de exploración o bien de un rebaje de la mina obtenemos un ensaye químico por elementos. Sin embargo, esta información no nos permite saber que especies mineralógicas tenemos en nuestra muestra.

TABLE 1
CHEMICAL CONTENT OF THE SAMPLE

Element	Symbol	Unit	Assay
Copper	Cu	%	0.06
Lead	Pb	%	0.84
Zinc	Zn	%	2.08
Iron	Fe	%	3.42
Sulphur	S	%	3.10
Silver	Ag	g/t	292
Gold	Au	g/t	0.13
Arsenic	As	%	0.04
Antimony	Sb	g/t	<20



Galena PbS

Alamosita PbSiO₃

Anglesita PbSO₄

Dezcloisita

PbZn_{0.6}CuO₄(VO₄)(OH)

- ✓ Una información más completa que nos permita tomar decisiones en nuestra plata la podemos tener con un estudio mineralógico.

FIGURE 1A
MINERAL COMPOSITION AND ELEMENTAL DEPARTMENT
Cabeza Composite Marzo 2011, 75µm K₈₀

Sulphide Mineral	Mass %	Non-Sulphide Mineral	Mass %	Copper Department	Mass %	Silver Department	Mass %
Silver Sulphides	0.03	Quartz	57.6	Chalcopyrite	90.9	Native Silver	7.8
Copper Sulphides	0.16	Micas	22.7	Chalcocite	8.3	Acanthite/Argentite	85.8
Galena	0.94	Feldspars	8.6	Tetrahedrite	0.8	Pyrargyrite	5.7
Sphalerite	3.37	Calcite	0.5			Tetrahedrite	0.7
Pyrite	3.61	Iron Oxides	0.3				
Arsenopyrite	0.12	Other Gangue	2.1				
Total	8.24	Total	91.8	Total	100	Total	100

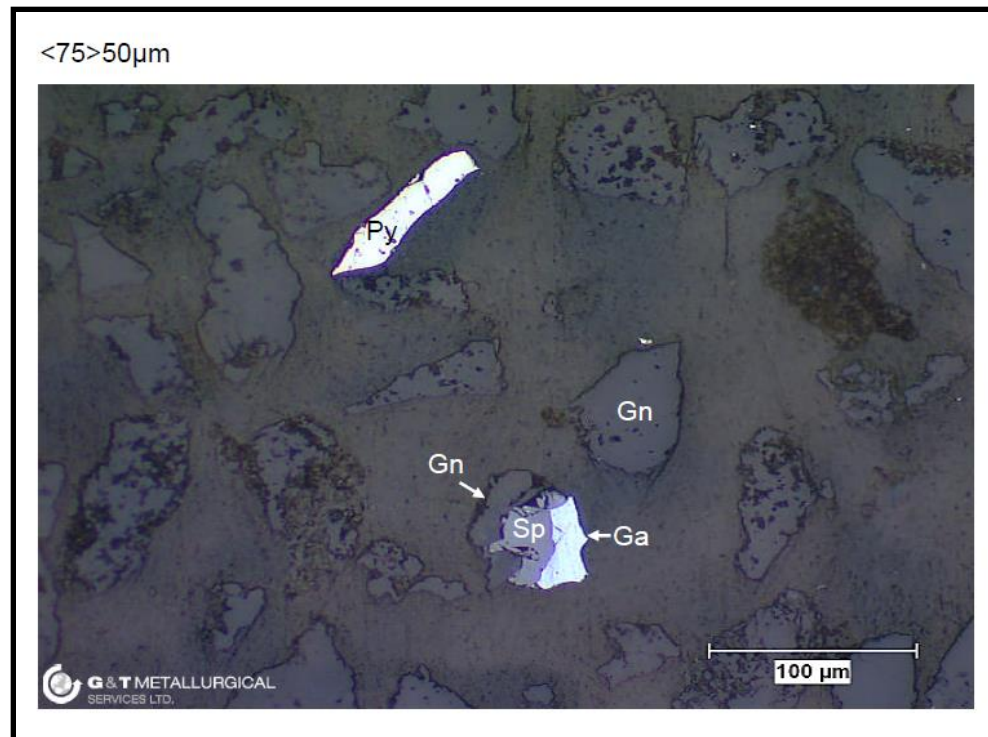
Note: 1) Silver Sulphides includes Acanthite/Argentite, Pyrargyrite and Native Silver. Silver department was based on TMS data.
 2) Copper Sulphides includes Chalcopyrite, Chalcocite/Covellite and Tetrahedrite.
 3) Other Gangue includes Ti Minerals, Chlorite, Apatite and trace amounts of other mineral species. See Appendix IV for details.

Cualquier estudio metalúrgico debe de partir de un estudio mineralógico

- ✓ Entender que “la mineralogía controla la metalurgia” y que “el tipo de roca controla el tonelaje a moler”, Munro P.D., 2008.
- ✓ “La mineralogía controla la metalurgia”. Es esencial que el equipo de trabajo entienda que la respuesta del mineral durante su tratamiento estará en función de los minerales que lo constituyen, tales como calcopirita, bornita, calcosita, covelita, pirita, y cuarzo; y no de los elementos ensayados, tales como cobre, fierro y azufre, Munro P.D., 2008.

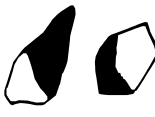






CONCEPTOS LIBERACIÓN DE PARTICULAS

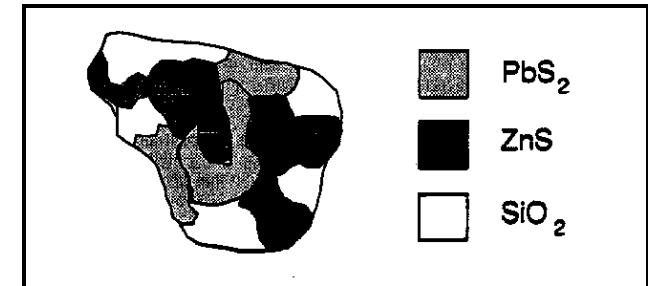
La liberación se mide en porcentaje y representa el porcentaje de partículas que están libres, a partir de un conteo estadístico de un estudio de análisis de imágenes.



Sp Esfalerita, Ga galena, Gn Ganga y Py pirita en muestra San Julian

Porcentaje de Liberación.

TIPO 1a	Intercrecimiento simple, límites rectilíneos o enlazados con curva. El tipo más común en muchas muestras fragmentadas.	
TIPO 1b	Intercrecimiento moteado o manchado. Patrón simple y común en muestras fragmentadas.	
TIPO 1c	Gráfico, mirmetítico o tipo eutéctico. Común, Ejem: calcopirita con estanita, cuarzo con feldespatos, etc.	
TIPO 1d	Inclusiones diseminadas, parecidas a una emulsión gota o del tipo rociado (pecoso). Común, Ejem: calcopirita en esfalerita o estanita, sericita en feldespatos, tetraedrita en galena, etc.	
TIPO 2a	Reemplazamiento o cubierta de bordes. Común; Ejem. calcocita o covelita rodeando a la calcopirita, pirita, bornita, esfalerita, galena, etc.	
TIPO 2b	Esferulítico concéntrico o coloforme. Común; Ejem: uranita con galena; cerusita-limonita; óxidos de hierro y manganeso.	
TIPO 3a	Parecido a vetillas tipo sándwich o crustiforme; Ejem: molibdenita-pirita; sulfuros metálicos en silicatos, carbonatos y fosfatos, etc.	



El grado de liberación determina en parte lo que es teóricamente posible de recuperar.

Patrones de intercrecimiento

Liberación - Flotación.

- ✓ La liberación de valores es la etapa fundamental para obtener buenos resultados en el proceso de flotación.
- ✓ Johnson, N.W. 2010, proporciona directrices sobre niveles de liberación de los minerales de valor, sugiere que para **niveles de liberación mayor de 80%** se cuenta con un alto potencial de realizar una separación eficiente.
- ✓ Johnson N.W. también reconoce que tener una alta liberación no garantiza una separación eficiente ya que también se debe tener bien establecido el esquema de reactivos.

Tabla de Liberación de Minerales

Rebaje SE-01							
p80 109	Gln	Esf	Ccp	Pi	Po	Ars	Gn
Libre	75.46	83.25	86.24	74.15	79.52	92.81	97.96
Bin - Galena		6.40	0.00	0.60	0.00	0.00	0.12
Bin - Esfalerita	19.03		4.97	0.82	0.15	1.72	1.29
Bin - Calcopirita	0.00	0.01		0.00	0.00	0.00	0.00
Bin - Pirita	0.02	0.03	0.02		0.04	1.46	0.37
Bin - Pirrotita	0.00	0.00	0.00	0.00		0.00	0.05
Bin - Arsenopirita	0.00	0.00	0.00	0.01	0.00		0.00
Bin - Gangas	1.73	8.94	4.70	22.36	15.55	0.13	
Ternarios	3.76	1.36	4.07	2.06	4.74	3.88	0.20
Total	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00

Tabla 7. Liberación y asociación absoluta de las especies minerales mayores contenidas en el **Rebaje SE-01**.

Curva de Liberación Primaria

FIGURE 1C
EFFECT OF PRIMARY GRIND SIZE ON MINERAL LIBERATION

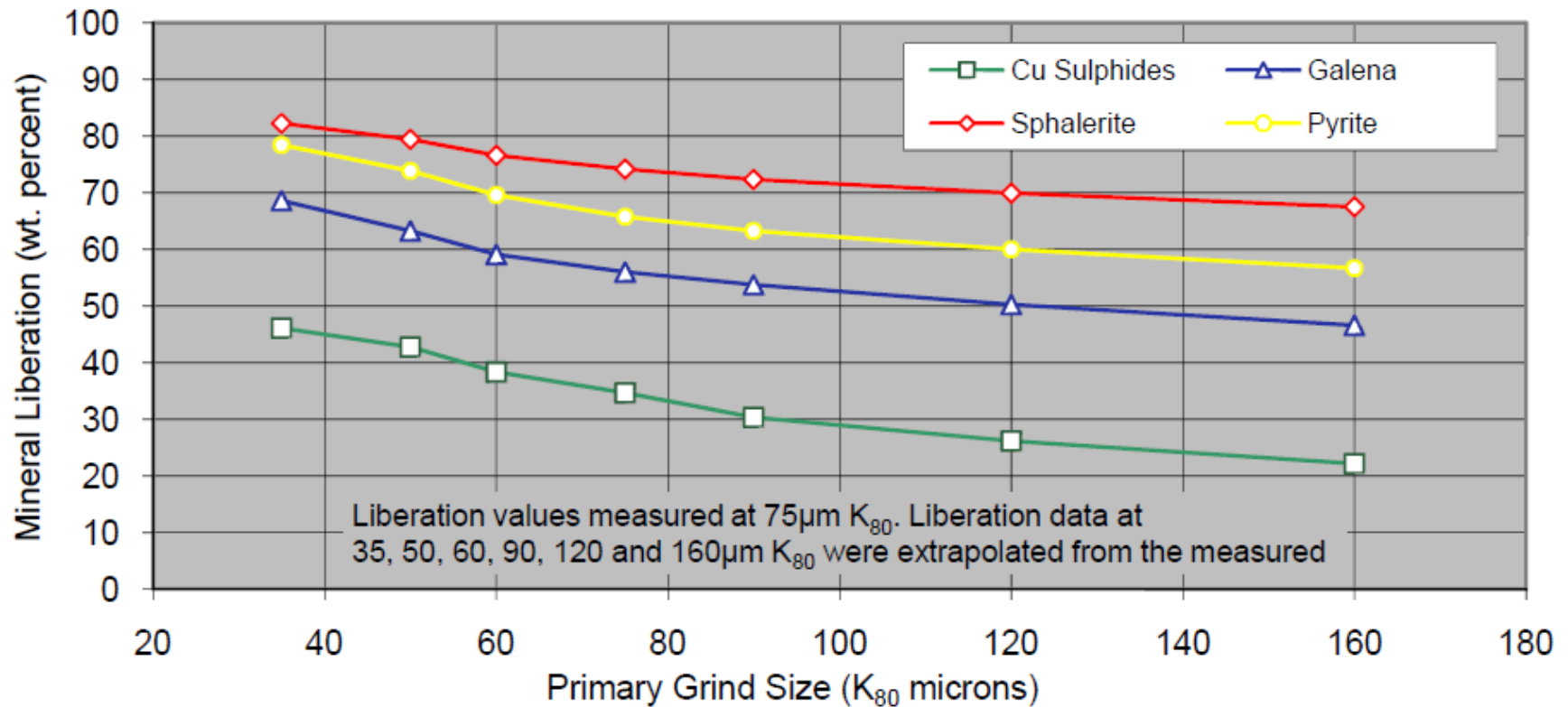
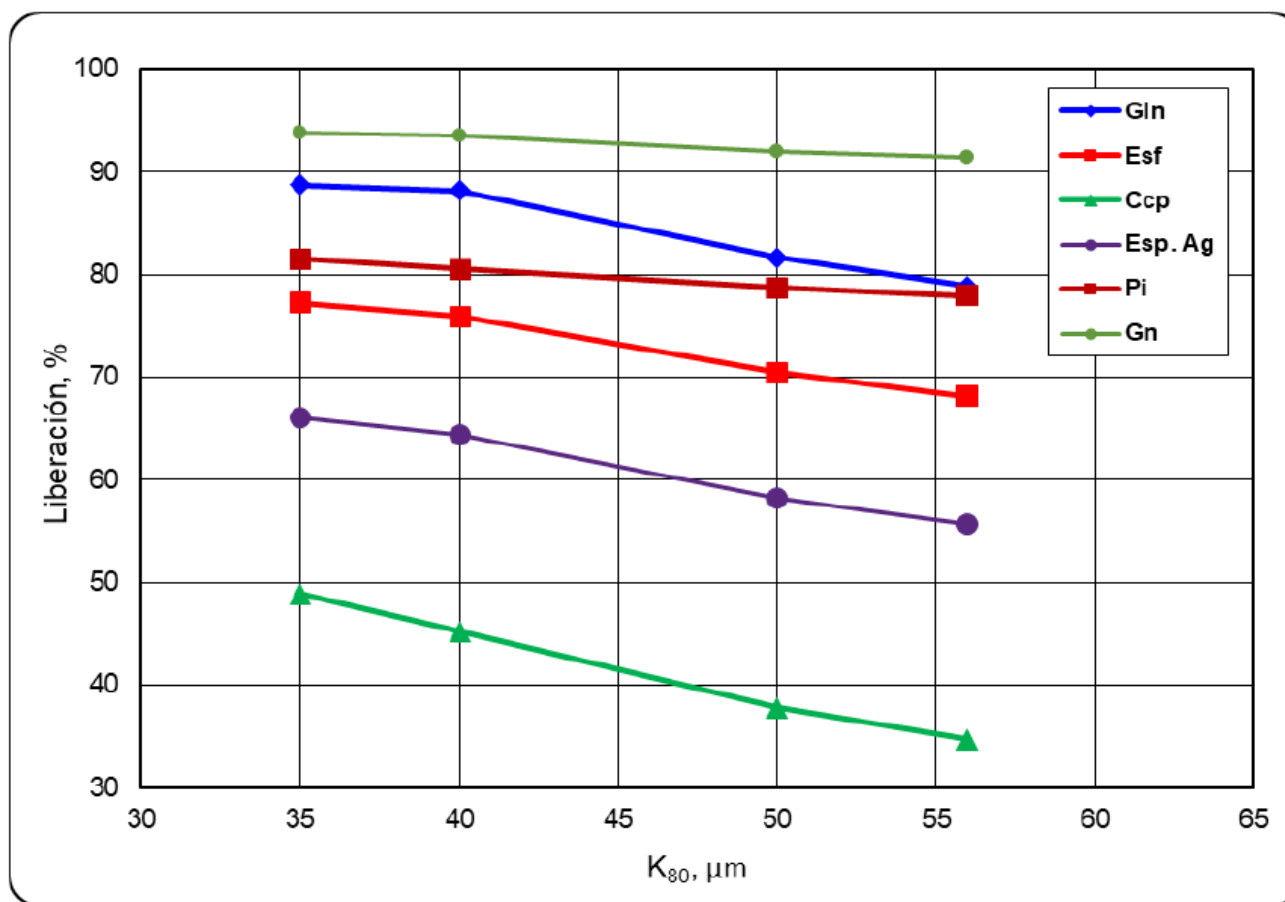


Figura 5.1 Efecto de molienda en la liberación



CASO 1. MINERALES OXIDADOS EN FLOTACIÓN

- ✓ Existen minerales que no pueden ser recuperados por procesos de Flotación o bien requieren esquemas químicos diferentes a los utilizados para la recuperación tradicional de sulfuros.

Casas bajo P80 - 76 μm - Ciénega.

Mineral	Formula	Pb%
Galena	PbS	68.4
Alamosita	PbSiO ₃	8.3
Drugmanita	Pb ₂ FeH(PO ₄) ₂ (OH) ₂	4.5
Holandita	(Ba _{0.8} Pb _{0.2} Mn _{6.6} Fe _{1.3})O ₁₆	0.3
Anglesita	PbSO ₄	5.3
Descloizita	PbZn _{0.6} Cu _{0.4} (VO ₄)(OH)	13.2

Mineral	Formula	Zn%
Esfalerita	(Zn _{0.96} Fe _{0.04})S ⁺	58.6
Willemita	Zn ₂ SiO ₄	36
Lenilenapeita	K ₆ (Mg,Mn,Fe,Zn) ₄₈ (Si,Al) ₇₂ (O,OH) ₂₁₆ •16(H ₂ O)	4.1
Descloizita	PbZn _{0.6} Cu _{0.4} (VO ₄)(OH)	1.3

Ciénega - Casas bajo P80 = 76 μm								
	Gln	Esf	Sulf-Cu	E-Ag	Pi	Ox-Pb	Ox-Zn	Gn
Libre	73.0	74.1	28.6	55.4	76.4	45.4	37.2	98.9
Bin - Galena		1.7	0.0	8.9	0.3	1.2	0.0	0.2
Bin - Esfalerita	3.2		5.1	5.2	0.2	1.2	0.0	0.2
Bin - Sulf-Cu	0.0	0.7		0.0	3.7	0.0	0.0	< 0.1
Bin - E-Ag	0.1	0.02	0.0		0.0	0.0	0.0	0.0
Bin - Pirita	0.6	0.3	6.6	1.8		1.6	0.0	0.2
Bin - Ox-Pb	2.8	2.9	0.0	0.0	3.3		< 0.1	< 0.1
Bin - Ox-Zn	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.2		0.6
Bin - Gangas	11.9	15.9	41.0	17.9	15.0	39.5	58.7	
Ternarios	8.5	4.4	18.7	10.9	1.1	10.9	4.0	0.0
Total	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0

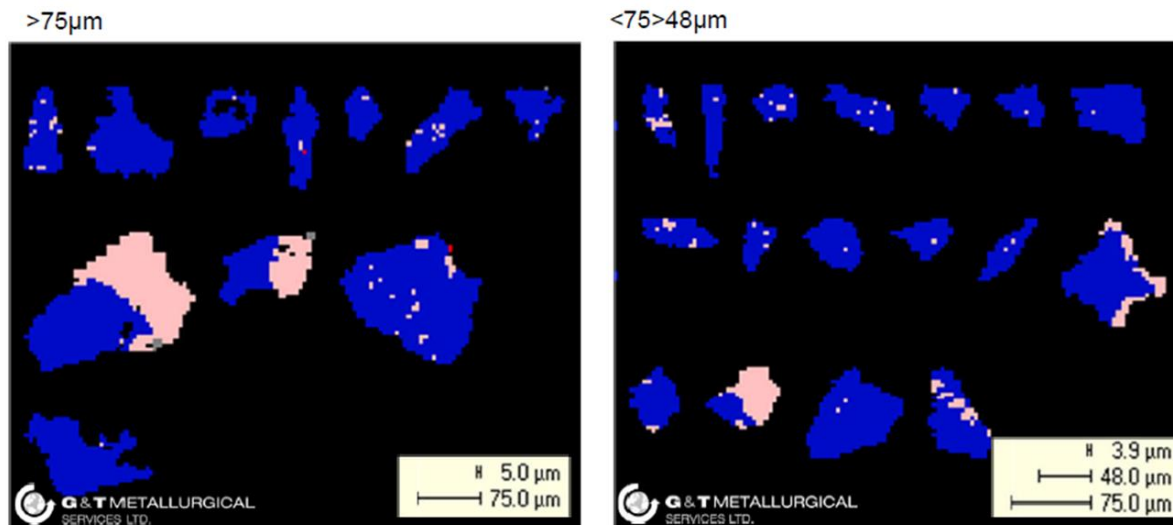
Caso 2. Fierro en la matriz de Esfalerita / Zinc Marmatítico

- ✓ Con un estudio mineralógico podemos conocer la cantidad de Fe presente en la matriz de la esfalerita, esto determinará el grado del concentrado de zinc.



Productos	Zn, %	Fe, %	S, %	Total
Mina A, 2010	62.2	6.0	31.9	100.0
Mina B 2019	56.0	10.5	33.5	100.0
Mina C rebajes	54.3	13.5	32.2	100.0
Mina D 2017	60.1	6.2	33.8	100.0
Mina E 2015	56.8	9.7	33.5	100.0

Caso 3. Fuerte asociación galena-esfalerita y plata finamente diseminada en esfalerita.



Balance metalúrgico separación convencional Pb-Zn Proyecto febrero 2012.

BALANCE METALÚRGICO EN CIRCUITO CERRADO														
Referencia			Ensayes						Distribución					
Producto	Peso		Au	Ag	Pb	Zn	Cu	Fe	Au	Ag	Pb	Zn	Cu	Fe
	TPD	%	g/ton		%				%					
Alimentació Molino	6000	100	0.03	123	0.49	1.7	0.03	4.46	100	100	100	100	100	100
Concentrado de Pb	74.9	1.25	0.93	4659	32.6	15.4	0.45	14.8	34.8	47.3	83.4	11.3	16	4.14
Concentrado de Zn	163.5	2.72	0.27	1925	1.57	52.6	0.72	6.89	22.3	42.7	8.78	84.4	56.4	4.2
Cola Final	5761.6	96.03	0.01	13	0.04	0.08	0.01	4.26	42.9	9.99	7.87	4.24	27.61	591.7

Caso 4. Cambio en la mineralización de un nuevo rebaje.

- ✓ Muy buena liberación a molienda gruesa 120 micras, se esperan grados y recuperaciones elevadas.

p80 128	Gln	Esf	Ccp	Pi	Po	Ars	Gn
Libre	93.60	91.63	74.23	90.59	75.53	95.96	99.46
Bin - Galena		2.24	5.54	2.49	3.00	0.32	0.16
Bin - Esfalerita	1.88		10.20	1.89	0.85	0.09	0.17
Bin - Calcopirita	0.34	1.78		0.14	3.00	0.00	0.04
Bin - Pirita	0.63	0.50	0.70		3.20	1.81	0.13
Bin - Pirrotita	0.03	0.04	0.24	0.23		0.00	0.01
Bin - Arsenopirita	0.01	0.00	0.00	0.29	0.00		0.01
Bin - Gangas	3.07	3.14	5.96	3.86	11.60	1.36	
Ternarios	0.43	0.66	3.14	0.49	2.83	0.47	0.03
Total	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00

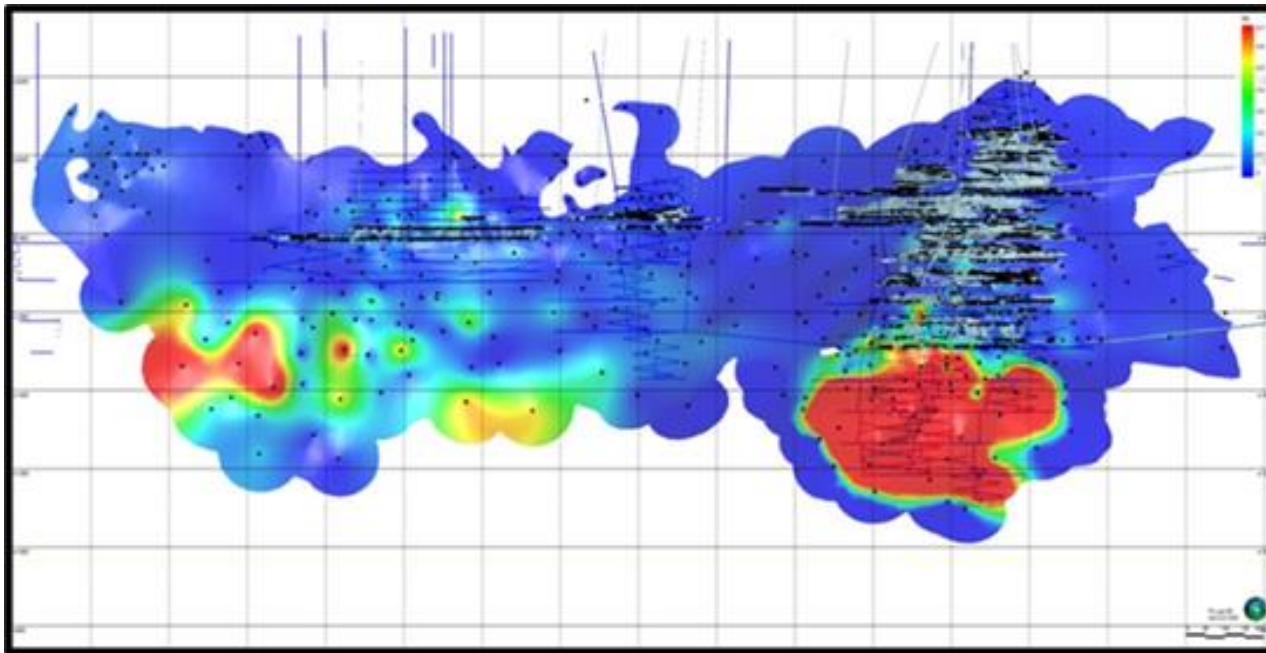
Tabla 6. Liberación y asociación absoluta de las especies minerales mayores contenidas en la muestra de Manto

- ✓ Los resultados metalúrgicos empiezan a ser más pobres cuando entra en operación un nuevo rebaje de la mina.
- ✓ Se muestra fuerte asociación galena-esfalerita incluso con moliendas más finas 109 micras.

Rebaje SE-01							
p80 109	Gln	Esf	Ccp	Pi	Po	Ars	Gn
Libre	75.46	83.25	86.24	74.15	79.52	92.81	97.96
Bin - Galena		6.40	0.00	0.60	0.00	0.00	0.12
Bin - Esfalerita	19.03		4.97	0.82	0.15	1.72	1.29
Bin - Calcopirita	0.00	0.01		0.00	0.00	0.00	0.00
Bin - Pirita	0.02	0.03	0.02		0.04	1.46	0.37
Bin - Pirrotita	0.00	0.00	0.00	0.00		0.00	0.05
Bin - Arsenopirita	0.00	0.00	0.00	0.01	0.00		0.00
Bin - Gangas	1.73	8.94	4.70	22.36	15.55	0.13	
Ternarios	3.76	1.36	4.07	2.06	4.74	3.88	0.20
Total	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00

Tabla 7. Liberación y asociación absoluta de las especies minerales mayores contenidas en el **Rebaje SE-01.**

- ✓ Presencia de cobre en la profundización de la mina.



Caso 5. Disolución de minerales de oro y plata en cianuro.

Solubilidad de Minerales de Oro

Respuesta a cianuración de minerales de oro más comunes		
Mineral	Velocidad de lixiviación	% Disolución
Oro nativo, Au	Muy rápida	100
Electrum, (Au, Ag)	Rápida	100
Aurocuprurio, (AuCu)*	Rápida	100
Silvanita, (AuAgTe ₄)	Lenta	100
Calaverita, (AuTe ₂)	Lenta	>80
Maldonita, (Au ₂ Bi)	Lenta	0-20
Aurostibnita, (AuSb ₂)	0	0
Auroantimonato, (AuSbO ₃)	0	0
* También definido como tetraauricuprurio		
Fuente: M. D. Adams Pag. 39		

Solubilidad de Minerales de Plata

Mineral	% Disuelto en 24 horas*
Argentita, (Ag_2S)	100
Cerargirita, (AgCl)	100
Proustita, (Ag_3AsS_3)	Poco soluble
Pirargirita, (Ag_3SbS_3)	Poco soluble

* No se menciona la concentración de NaCN

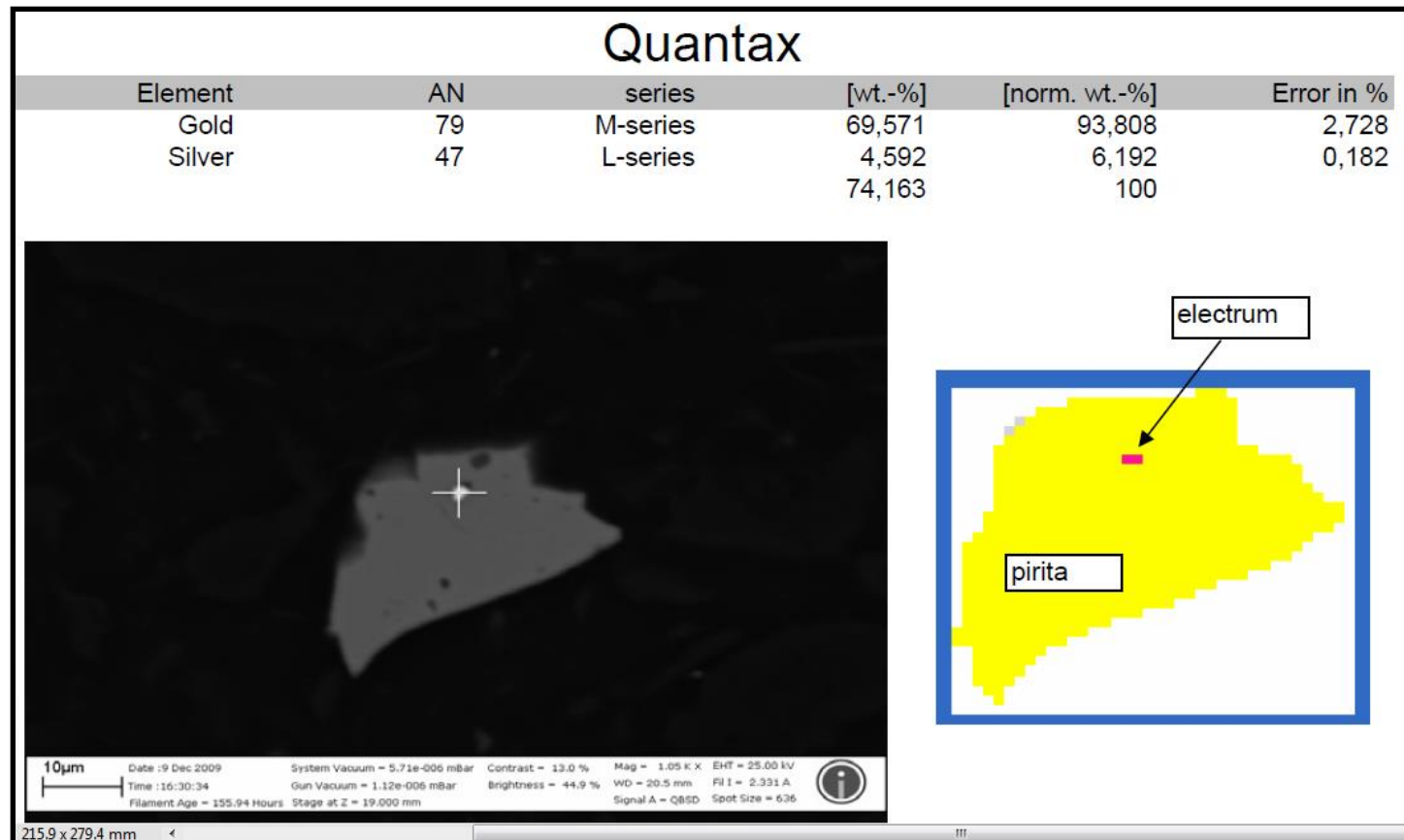
Caso 6. Mineral con oro finamente diseminado.

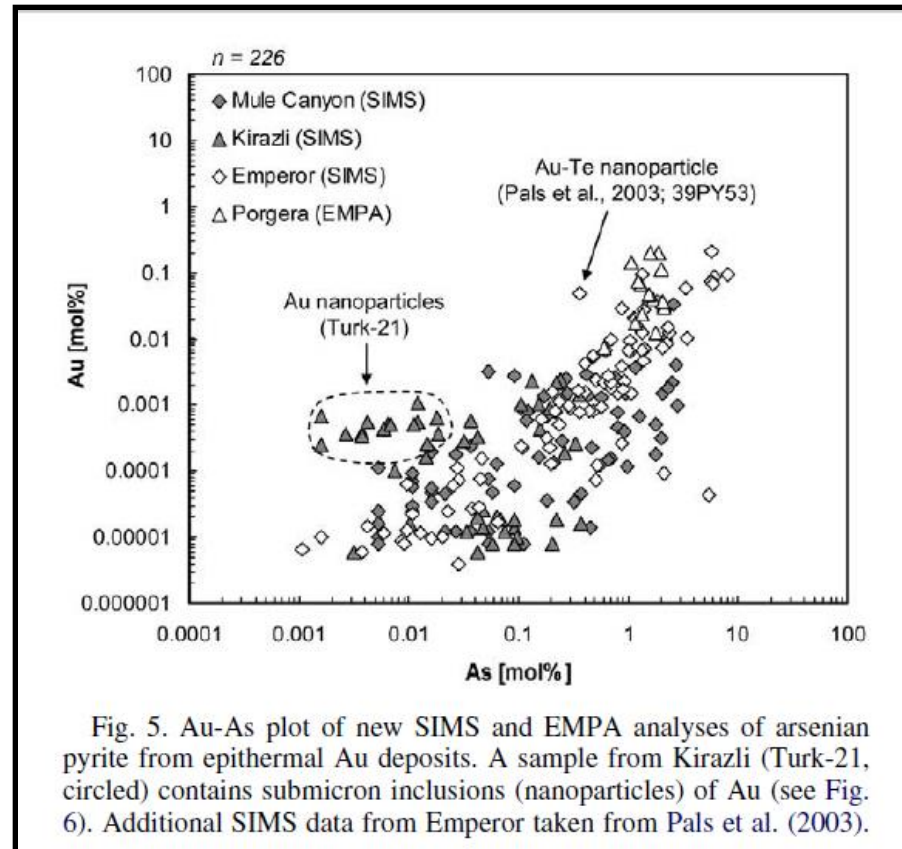
Minerales refractarios de oro.

Se dice que un mineral es refractario cuando su recuperación por cianuración es baja, así pues, por definición decimos que es “altamente refractario” cuando se lixivia menos del 50% del oro, y “moderadamente refractario” cuando se lixivia entre 50 al 80% del oro.

Su baja lixiviación normalmente se asocia a que el oro está distribuido en partículas finamente diseminadas e inclusive en algunos casos como nano-partículas o a tamaños sub-microscópicos que impiden su contacto con el cianuro.

- ✓ Mineral con bajas recuperaciones por contener una gran proporción de partículas de oro finamente diseminado en tamaños de 0 a 10 micras.





Su baja lixiviación normalmente se asocia a que el oro está distribuido en nano-partículas o a tamaños sub-microscópicos que impiden su contacto con el cianuro.

CONCLUSIONES

1. Es esencial que las empresas cuenten con directrices bien definidas para asegurar que la información geometalúrgica sea generada desde el inicio y en cada fase de los proyectos y que esta continúe una vez que la planta esté en operación. Un aspecto clave es contar con un equipo de trabajo interdisciplinario (geólogos, mineros, metalurgistas).
2. Análisis Modal. En el caso de la flotación se requiere de conocer las características mineralógicas de las partículas en cada fracción de tamaño, su grado de liberación y asociación (con que otras especies están asociadas) y solo de esta manera se puede entender y explicar el proceso, modelar su comportamiento y diseñar soluciones adecuadas para su procesamiento.

3. Mediante un análisis modal se pueden derivar varias cosas tales como, el tamaño óptimo de la molienda, requerimientos de remolienda y los límites mineralógicos de la muestra.

4. La evaluación de muestras de las diferentes zonas de la mina debe continuar durante toda su vida operativa, ya que esta información nos alertara oportunamente sobre las acciones a seguir, en base a los resultados obtenidos y tomando acciones cuando las desviaciones lo ameriten. Cada operación debe contar con un presupuesto para la realización de estos trabajos.

MUCHAS GRACIAS