

CUANTIFICACIÓN MINERAL DE MENAS COMPLEJAS POR ANÁLISIS DIGITAL DE IMÁGENES DE MICROSCOPIA ELECTRÓNICA DE BARRIDO

Oscar Jesús Choque Fernandez¹; Marcondes Lima da Costa¹;
Herbert Pöllmann²; Paulo Gomes Brandao³

¹Centro de Geociencias/UFPA, Belém – PA, Brasil;

²Institut für Geologische Wissenschaften und Geiseltalmuseum, Halle Universität, Alemania;

³Depto. Eng. de Minas/UFMG, Belo Horizonte – MG, Brasil.

RESUMEN

Este trabajo describe un método para la realización de análisis cuantitativos de minerales de MENA complejos usando imágenes capturadas en Microscopios Electrónicos de Barrido. Este consiste en la adquisición de la imagen por MEB, procesamiento de la imagen digital binaria de cada mineral, separación de las características de cada imagen binaria, medición de los parámetros seleccionados en cada imagen y la adquisición de informaciones numéricas del analizador de imágenes. La mena de cobre compleja usada para este método proviene de Salobo, Carajás, Brasil; y los análisis hechos sobre la misma muestran que esta técnica es una herramienta de cuantificación de fases minerales de relativa rapidez y precisión, comparable con los datos obtenidos por otros métodos. Los resultados de esos análisis permitieron cuantificar la composición mineralógica de la mena de Salobo, constituida de: bornita 4%, calcocita 2% y calcopirita <1%, hospedados en magnetita (54%) y silicatos (40%).

INTRODUCCIÓN

La utilización de la tecnología digital aplicada a las imágenes de microscopía electrónica de barrido (MEB), se muestra como una valiosa herramienta en la cuantificación de minerales en escala micrométrica. Con los analizadores automáticos de imágenes se puede determinar la especie mineral, los porcentajes de cada especie, analizar la morfología, los tamaños de partícula y los aspectos texturas como sus asociaciones minerales[1]. La aplicación, inicialmente restringida a sulfuros simples de fácil obtención y confiable identificación, se expandió significativamente para minerales indicadores, minerales con composición variable, rocas-reservorios de petróleo, materiales carbonosos en sulfuros, cementos clinker, minerales del grupo del platino [2].

Hoy en día, muchos laboratorios usan la microscopía electrónica de barrido (MEB) como herramienta patrón en la identificación y cuantificación de fases minerales a partir de electrones retrodispados (BSE) y espectrometría de rayos X por dispersión de energía (SED). En nuestro país, hasta donde se conoce, analizadores de imágenes son raros

y por eso esta técnica no ha sido todavía incorporada en los diversos Centros de Investigación. Como hay pocos ejemplos de análisis de imágenes específicos para análisis modal en la literatura (casi todos asociados a liberación mineral), el presente trabajo describe estudios en analizador de imágenes acoplado al microscopio electrónico de barrido (MEB) para la determinación de fracciones volumétricas de fases minerales de cobre, teniendo como ejemplo al mineral cuprífero de Salobo, Brasil.

EL MÉTODO DE ANÁLISIS DE IMÁGENES

El propósito del análisis de imágenes es desarrollar metodologías capaces de extraer ciertos parámetros característicos a partir de imágenes de cuerpos sólidos [3]. Previamente a ese desarrollo, algunos conceptos deben ser comprendidos cuando se trabaja con imágenes digitales, como ser: sistemas de análisis de imágenes, análisis de imágenes, imagen digital y píxel.

Sistemas de análisis de imágenes. Comúnmente llamados analizadores de imágenes, consisten en programas de computador (softwares), los cuales permiten la adquisición, el procesamiento de imágenes y aún la obtención de características de interés de éstas, automáticamente o no [4, 5].

Análisis de imágenes. Está definida como la ciencia que realiza mediciones geométricas y densitométricas sobre imágenes bidimensionales de laguna fuente. Una de las principales aplicaciones es en la microscopía cuantitativa, dando lugar rápidamente a datos seguros y estadísticamente significativos, substituyendo los métodos tradicionales [6].

Imagen digital. La digitalización de imágenes puede ser comprendida como la transformación de una imagen por una matriz de números, la cual puede ser matemáticamente procesada.

Píxel. Es un elemento dentro del cual la figura es dividida para su análisis. Es la menor área de resolución.

El camino para la obtención de datos cuantitativos, característicos o de microestructuras a partir de imágenes, envuelve una serie de procedimientos representados en el flujograma de la figura 1.

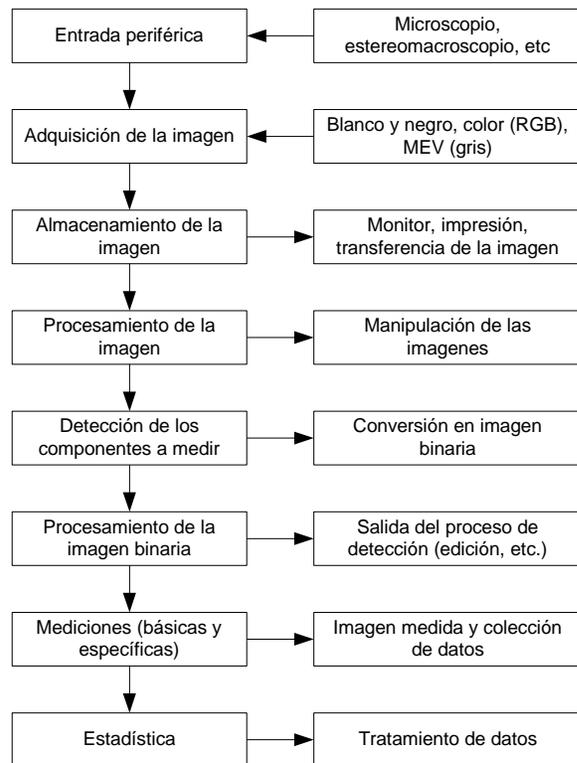


Figura 1. Procedimientos empleados en los análisis de imágenes.

- La adquisición de imágenes en el MEB presupone la obtención de señales emitidas por la muestra, las cuales son detectadas por sensores, y posteriormente las señales convertidas en voltaje. El brillo en cada punto de la imagen es determinado por la relación entre su brillo y la localización de la fuente de luz, combinados con la orientación y la naturaleza de la superficie analizada.
- El procesamiento de la imagen es un conjunto de "herramientas" que puede ser aplicado siempre que se desee mejorar la visualización o resaltar las características de los objetos de interés con el objetivo de perfeccionar la detección de este para obtener medidas más precisas.
- La detección de los componentes a ser medidos corresponde a la identificación de áreas de interés en la imagen, aplicando filtros con diferentes niveles de tonalidades grises y posterior conversión en imágenes binarias.
- El procesamiento de la imagen binaria envuelve la manipulación de esta, resultando en otra imagen, también binaria. Aplicaciones simples necesitan apenas de procesamientos sencillos (usando una función simple), entretanto aplicaciones más complejas requieren de más funciones. Algunas funciones binarias típicas del procesamiento se resumen en la siguiente tabla:.

TABLA 1. Funciones típicas binarias en el procesamiento de imágenes [6].

Función	Detalle
Erosión (Erode)	Separa contactos entre objetos.
Dilatación (Dilate)	El proceso contrario de la erosión.
Open	Combinación de erosión, seguido de dilatación con etapas idénticas. Objetos pequeños y detalles de partículas finas pueden ser perdidos.
Close	Combinación de orden reverso: primero dilatación, luego erosión con etapas idénticas. Esto resulta en el llenado de cavidades y agrupamiento de partículas "cerradas".
Skelotonization	Forma especial de erosión, teniendo como resultado una línea al centro de cada partícula.

Algunas veces las funciones de la tabla 1 no satisfacen las necesidades del analista, debido a sobreposición o contacto con los objetos. Esto puede ser resuelto

combinando imágenes procesadas o sin procesar y usando las operaciones lógicas o booleanas A y B, A o B, y A x/o B (A en A) [6].

- Las medidas o análisis de imágenes son hechas sobre la estructura de un píxel y deben pasar previamente por un tratamiento estadístico de datos, ser convertido en unidades de medida básicas (parámetros de medición de campo), como: áreas, puntos, líneas, perímetros, Intersecciones, etc. Ellas son aplicadas sobre un campo entero visualizado. Entretanto los parámetros específicos de medida son aquellos realizados sobre las características de una imagen binaria (tabla 2), del campo visualizado.
- Finalmente, todos los valores medidos y determinados pueden ser almacenados como tablas en el mismo analizador de imágenes. Estas tablas pueden ser exportadas a programas de planillas externas (por ejemplo Excel), o programas estadísticos para evaluación adicional.

La secuencia de operaciones de los análisis de imágenes puede ser almacenada dentro de programas tipo como: Qwin del Quantimet (leoca9 [6], ZeissKS400 (Zeiss) [7], QEM-SCAN desarrollado por la CSIRO-Australia, entre otros.

TABLA 2. Algunas unidades de medidas específicas aplicadas en los análisis de imágenes [6, 7].

Parámetros	Detalle [1, 2]
Área	El área de la facción. El número total de píxel detectados dentro de la facción.
Perímetro	El complemento total del borde de la facción. Todos los píxel periféricos de un objeto usando correcciones específicas para cantos diagonales.
Diámetro Feret	Distancia de dos tangentes paralelas para un objeto según una dirección determinada.
Coordenadas	Ordenadas X e Y de un píxel orientado puntualmente para un objeto.
Variación de colores gris	Variación de niveles de gris de todos los píxeles en un objeto.

MATERIALES E INSTRUMENTACIÓN

Siguiendo el flujograma de la figura 1, el trabajo fue realizado en secciones pulidas sobre minerales de mena de cobre de Salobo, Provincia Mineral de Carajás, Brasil. El mismo consistió en la adquisición de una imagen de dos dimensiones de un área de la muestra, procesamiento de ésta a través de filtros, producción de imágenes separadas

(imágenes binarias) de cada mineral, separación de las características de cada imagen binaria por la operación de dilatación-erosión, medición de los parámetros seleccionados en cada imagen y la adquisición de informaciones numéricas.

Con la finalidad de evaluar la reproducibilidad de los datos en las fracciones volumétricas, las imágenes fueron obtenidas en dos microscopios electrónicos de barrido (MEB), un JEOL de la Universidad de Halle, Alemania y otro de la LEO de la Escuela Politécnica de la Universidad de San Pablo (EP-USP), Brasil; usando los programas CAMEO de la Oxford y QWIN (que opera el analizador de imágenes Quantimet 600), respectivamente. Las imágenes obtenidas en el MEB de la EP-USP, fueron analizadas también con un analizador de imágenes Quantimet 500 del laboratorio de Petrografía de la Universidad Federal de Pará, Brasil.

Las mediciones fueron realizadas a partir de imágenes binarias en diversas tonalidades grises. El programa CAMEO puede distinguir hasta 3 tonalidades grises, (por diferencia de la imagen de fondo es posible obtener una cuarta tonalidad), y con los Quantimets 600 y 500 [6] pueden distinguirse hasta 6 tonalidades grises. En el mineral de Salobo se han categorizado 5 tonalidades grises derivadas de las imágenes de electrones retrodispersados (BSE) generadas en el MEB, siendo estas correspondientes a bornita (br), calcocita (cc), calcopirita (cpy), magnetita (mg) y silicatos (sk) (inclusive fluorita). Los silicatos y la fluorita se presentan generalmente con las mismas tonalidades grises, por eso son agrupados como una fase mineral única. La obtención de imágenes para análisis modal fue realizada en modo manual en el MEB de la Universidad de Halle y de modo automático en el MEB de la USP.

Para las conversiones de porcentaje en volumen a porcentaje en peso de cada fase, se tomaron en consideración las densidades (g/ml) de cada mineral: calcosita 5,7; bornita 5,1; calcopirita 4,4; magnetita 5,2 y silicatos (media 3,3) ((greenalita, biotita, almandina, granerita, fatalita, minesotaita, stilpnomelana, cuarzo y clorita + fluorita) y posteriormente, usando la ecuación:

$$\% \text{ peso} = \frac{\% \text{ volumen de cada fase} \times \text{densidad de cada fase}}{\% \text{ volumen total de las fases medidas}}$$

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Los análisis cuantitativos fueron realizados en menas de cobre con características particulares como: mineralización diseminada, grano fino y roca mineralizada extremadamente dura, los cuales imponen algunos prerrequisitos en la realización de mediciones, a saber:

- La muestra debe tener una buena cualidad de pulimento, pues la dureza elevada de los sulfuros y magnetita así como la baja dureza de los silicatos produce relevos indeseables para futuras medidas.

- El instrumento de captura de la imagen debe tener resolución adecuada para la discriminación mineral. Esto debido al hecho que los sulfuros de cobre (bornita, calcocita y calcopirita), ocurrentes como granulación fina en la mena, pueden ser fácilmente confundidos entre sí o asumidos como única fase mineral, situación que fue observada en relación a los silicatos.
- Los resultados obtenidos deben ser compatibilizados en el contexto mineralógico.

CARACTERIZACIÓN MINERALÓGICA DE LAS MENAS DE COBRE DE SALOBO

Los sulfuros de cobre ocurren como cristales < 3,0 mm y granos finos irregulares diseminados, finas bandas alternadas y/o foliadas con silicatos, vetillas y/o stringers largos/cortos, diminutas inclusiones, entrecrecimientos mirmequíticos y sustituciones de bornita-calcocita y bornita calcopirita (br/cc, br/cpy, br-cc y br-cpy) (figuras 2a y 2b). Estas fases ocurren hospedadas por conjuntos de formaciones ferríferas arqueas características del depósito, con amplia ocurrencia de magnetita y biotita. Si bien esas fases se encuentran asociadas con varios minerales en diferentes pareagénesis, las características de la mena están drásticamente afectadas por el metamorfismo.

En el MEB la bornita, calcocita y calcopirita son de fácil diferenciación mediante tonalidades grises en imágenes de electrones retrodisipados (BSE). Estos se distinguen fácilmente de la magnetita y los silicatos. La magnetita también se distingue claramente de los silicatos y de otros minerales accesorios. Ya entre los silicatos y la fluorita, la diferencia es muy pequeña (figura 2), dificultando la distinción entre ellas.

CUANTIFICACIÓN MINERAL POR LOS MÉTODOS CAMEO Y QUANTIMET

Los resultados de cuantificación mineral en volumen (%) obtenidos por los métodos Cameo (manual) y Quantimet (automático), están indicados en la tabla 3. La comparación entre estos métodos está representada en la figura 3.

A partir de las curvas de la figura 3, se observa una buena coincidencia entre los datos de % volumen de los sulfuros de cobre, magnetita y silicatos en los dos métodos usados. Las fases bornita y calcosita son las más susceptibles a variaciones de medición, pudiendo variar en algunas muestras hasta 2% en volumen (muestras modal18a y modal43), lo que significa en términos relativos desviaciones de casi 30%. Estos son atribuidos a errores estereológicos (propiedades características del mineral), problemas de preparación de muestras (imperfecciones de pulimento: baja calidad o relevo de la muestra) y principalmente el ajuste al brillo y contraste inadecuados para bornita y calcocita, ambos, mayormente entrecrecidos.

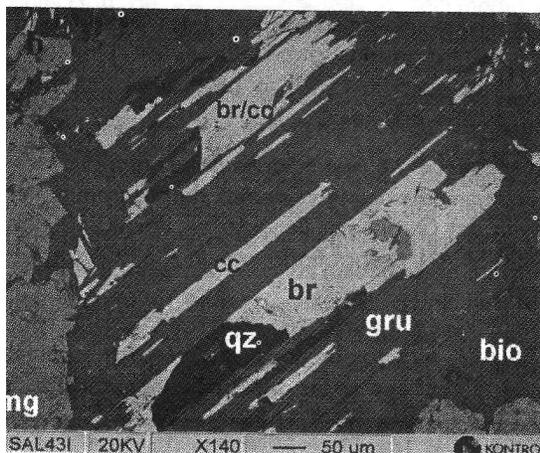
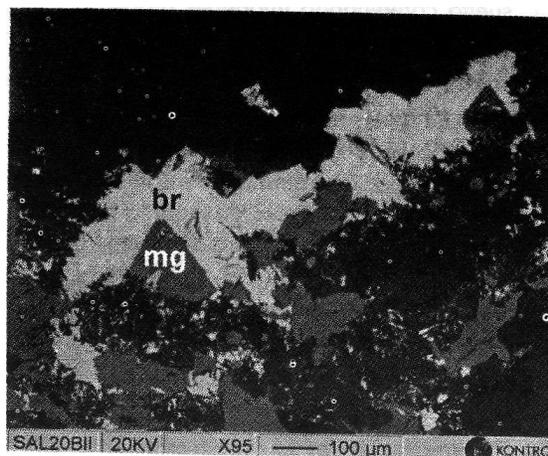


Figura 2. a) Diseminaciones de bornita (br) siguiendo los cristales hipidiomórficos de la magnetita (mg); b) láminas micrométricas de bornita (br) y bornita/calcosita (br/cc) intercaladas y orientadas a lo largo de las direcciones cristalográficas de clivaje de la biotita (bio) y granerita, asociadas con blastos de magnetita (mg) y cuarzo (qz). Imágenes de electrones retrodisipados en el MEB.

Como la adquisición de imágenes depende del brillo y contraste [5], la detección de esas fases minerales llega a modificarse, pues los valores límite de tonalidades de grises son válidos solamente para las mismas condiciones de brillo y contraste, los cuales difieren de un microscopio a otro. Los resultados de % volumen para la calcopirita por los dos métodos usados son coincidentes (tabla 3).

Las curvas que corresponden a la magnetita y silicatos (incluyendo la fluorita), para los métodos usados, prácticamente son las mismas (excluyendo el valor de % volumen de la muestra modal18a) (figura 3). Esto confirma que la calidad de los análisis para esos minerales no sufren modificación porcentual significativa según el método usado.

TABLA 3. Composición mineral modal (% volumen) de los sulfuros de cobre (bornita, calcosita y calcopirita), magnetita y silicatos obtenidos con los métodos Cameo y Quantimet 500 y 600.

	CAMEO						QUANTIMET					
	Br	cc	cpy	mg	sk	total	br	cc	cpy	mg	sk	Total
modal3	2,9		3,1	52,8	41,2	100,0	2,9		3,4	52,5	41,1	100,0
modal18a	5,4	3,5		63,4	27,6	100,0	3,5	2,8		51,7	42,0	100,0
modsal28a	1,4		1,5	25,1	72,0	100,0	1,2		1,3	29,1	68,4	100,0
modal37	7,6	2,5			89,9	100,0	5,9	1,8		0,0	92,2	99,9
modsal43	6,1	1,0		52,6	40,3	100,0	6,8	1,5		51,9	39,8	100,0
modsal53	4,6	3,9		52,9	38,7	100,0	3,8	3,3		54,5	38,5	100,0
Media	4,7	1,8	0,8	41,1	51,6	100,0	4,0	1,6	0,8	40,0	53,7	100,0

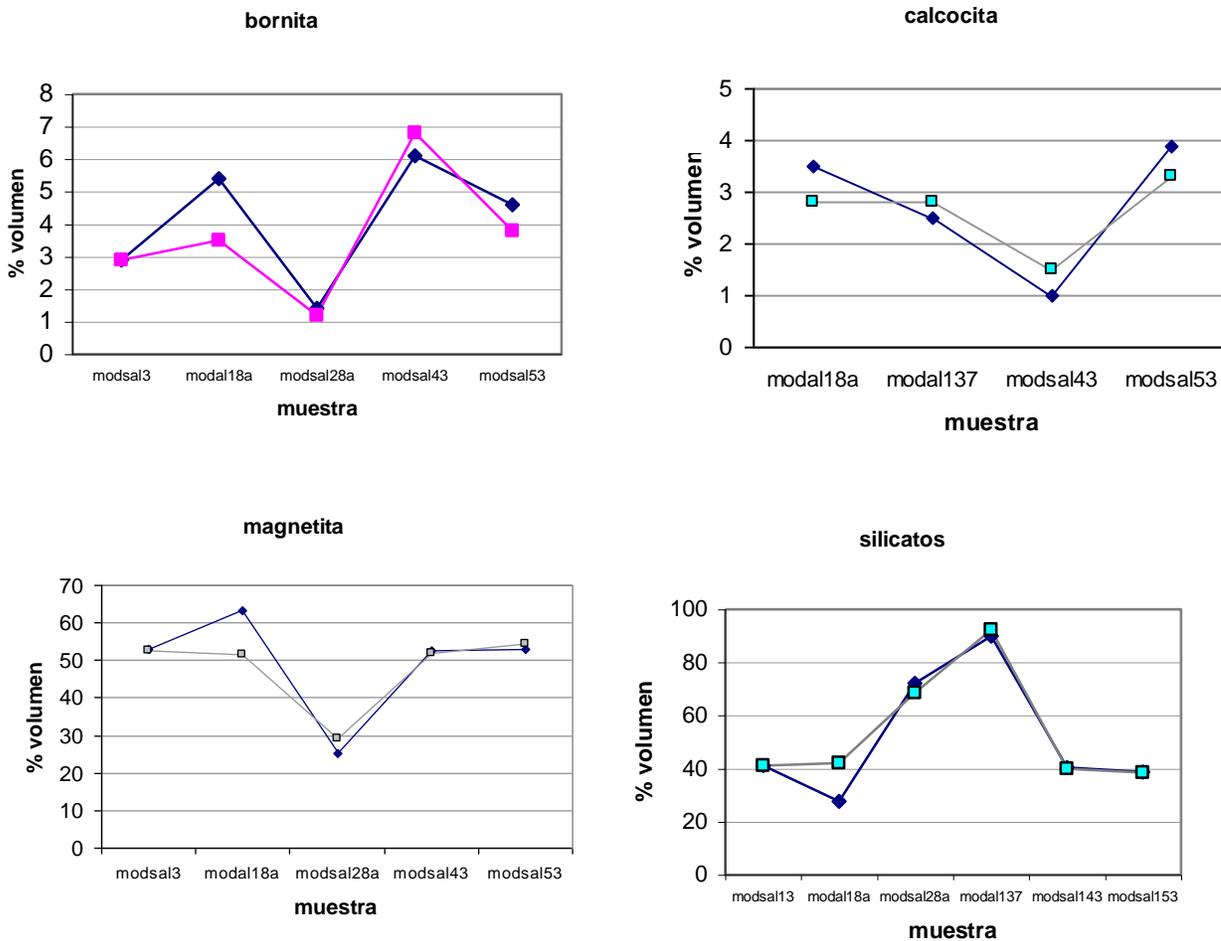


Figura 3. Curvas de comparación de las cantidades minerales (% volumen) de los métodos Cameo y Quantimet.

CANTIDAD DE MINERAL EN LAS MENAS

Los porcentajes en volumen y en peso de los minerales presentes en muestras de testigos de la mena de cobre de Salobo, están indicadas en la tabla 4 y ploteadas en el histograma de la figura 4. Los resultados derivan de la conjunción de los modos de operación (manual en Cameo y automático en Quantimet 600 y Quantimet 500) usado para los análisis modales. Los porcentajes en % peso fueron calculados usando la ecuación mencionada anteriormente.

Bornita, calcocita y calcopirita presentan amplias variaciones entre las muestras (figura 4). La bornita puede variar de 0,4 a 10%; en cuanto a la calcocita y la calcopirita representan cantidades máximas de 5 y 3%, respectivamente. La magnetita varía de cantidades ínfimas hasta 80%, en cuanto a los silicatos de 20 a 90%.

En concordancia con otros estudios mineralógicos [8, 9], los sulfuros de cobre son más comunes cuando son asociados a la magnetita, como es demostrado por las muestras 1 a 6 (figura 4). La bornita y calcocita ocurren también como inclusiones en los silicatos (las veces en que se encuentran asociados a la magnetita), como se demuestra por las muestras 7 a 9.

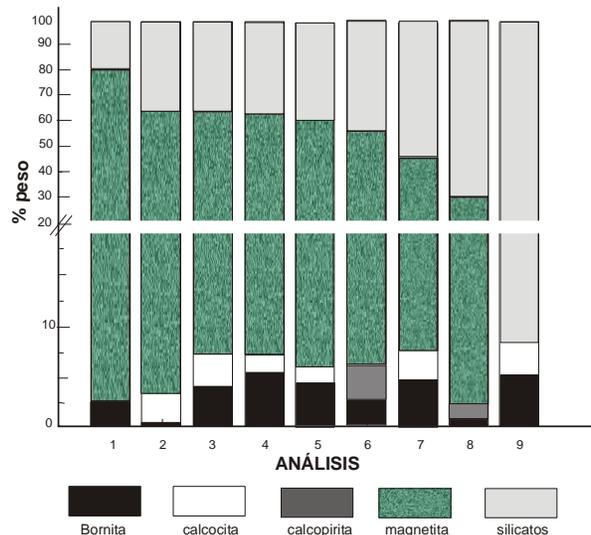


Figura 4. Fracciones volumétricas (% peso) de los sulfuros de cobre (br, cc y cpy), magnetita y silicatos (inclusive fluorita) de la mena de Salobo.

TABLA 4. Composición mineral modal (% volumen y % peso) de los sulfuros de cobre (bornita, calcocita y calcopirita), magnetita y silicatos.

Nº Testigo	Muestra	% Volumen					% Peso				
		br	cc	cpy	mg	Sk	br	cc	cpy	mg	sk
1: F238	Sal66	2,6	0,0	0,0	77,5	19,9	2,7	0,0	0,0	83,6	13,6
2: F150	Sal62	0,4	2,8	0,0	58,3	38,5	0,4	3,6	0,0	67,6	28,4
3: F106	Sal53*	4,2	3,6	0,0	53,7	38,6	4,7	4,6	0,0	62,3	28,4
4: F104	Sal43*	6,5	1,2	0,0	52,3	40,1	7,4	1,6	0,0	61,2	29,8
5: F108	Sal57	4,6	1,3	0,0	52,0	42,1	5,3	1,7	0,0	61,5	31,6
6: F8	Sal3*	2,9	0,0	3,2	46,9	46,9	3,5	0,0	3,3	57,0	36,2
7: F52	Sal18*	4,6	2,8	0,0	36,7	55,8	5,7	3,9	0,0	46,0	44,4
8: F79	Sal28*	1,3	0,0	1,4	27,1	70,2	1,7	0,0	1,6	36,6	60,1
9: F102	Sal37*	6,7	2,6	0,0	0,0	90,7	9,8	4,2	0,0	0,0	85,9
	Media	3,7	1,6	0,5	44,9	49,2	4,6	2,2	0,5	52,9	39,8

La bornita es generalmente el principal sulfuro de cobre en Salobo, con $4 \pm 3\%$ peso del total de las muestras analizadas (figura 5). Para Souza & Vieira [9] la calcocita es el mineral principal (probablemente debido a la mayor cantidad de muestras analizadas por la CRVD-Salobo Metais S.A.). Sigue la calcocita con $2 \pm 2\%$ y la calcopirita con cantidades $< 1\%$. La magnetita y silicatos constituyen un promedio de $54 \pm 24\%$ y $40 \pm 21\%$ en peso, respectivamente, y son los principales minerales en rocas mineralizadas.

Pueden ser observados dos grupos de distribución en fracciones volumétricas entre la magnetita y los silicatos (figura 4): el primero con magnetita encima de 50% en

peso (muestras 1 a 6) y el segundo con magnetita debajo de 50% en peso (muestras 7 a 9). En el primer grupo, con excepción de la muestra 1 (F238), las cantidades de magnetita y silicatos están en una relación de 2:1. El segundo grupo puede ser descrito como un decrecimiento gradual de la magnetita con crecimiento proporcional de los silicatos, indicando una distribución heterogénea de estos minerales en la mena. Esto muestra efectivamente la ocurrencia de diferentes litotipos para la mena de Salobo, clasificados como formaciones ferríferas tipos 1 y 2 [10] o rocas clasificadas como X1 ($> 50\%$ de magnetita) y X3 (10-50% de magnetita) [9].

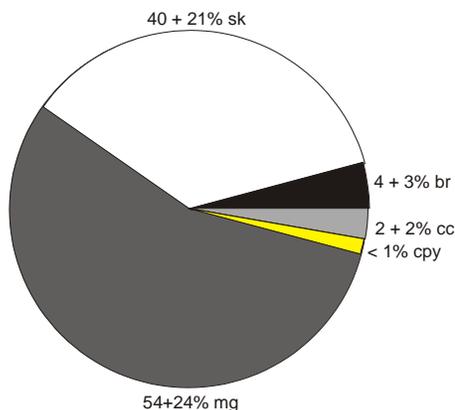


Figura 5. Composición modal (media % peso) de los sulfuros de cobre (bornita-br, calcocita-cc, calcopirita-cpy) magnetita-mg y silicatos-sk de la mena de Salobo obtenida en imágenes retrodipadas del MEB.

CONCLUSIONES

La técnica de sistema de análisis de imágenes obtenidas en el MEB se puede aplicar a la solución de problemas relacionados a la cuantificación mineralógica y parámetros asociados de diferentes tipos de menas, ya en las primeras características de menas o de test metalúrgicos. La misma plantea uno de los más difíciles retos para el geólogo, minero y/o metalurgista. En menas complejas con finas granulometrías, y con frecuencia, de mineralogía y textura complejas, el estudio mineralógico cuantitativo que habitualmente proporciona un apoyo útil al mineralogista, debe superar difíciles problemas de representatividad estadística, de resolución eficaz de partículas muy finas y de precisión en la medida de los parámetros geométricos de éstas. La superación de estos problemas requiere con frecuencia el recurrir al microscopio electrónico, pero a costos mayores que cuando se usa un microscopio óptico.

Los análisis realizados en la mena de Salobo muestran que esa técnica es una herramienta de cuantificación de fases de relativa rapidez y precisión. Entretanto deben ser considerados diversos factores que influyen en las variaciones porcentuales de los sulfuros de cobre, entre ellos: las condiciones operacionales de los microscopios electrónicos utilizados (JEOL de la Universidad de Halle, Alemania y LEO de la Escuela Politécnica de la USP); las características de la mena (diseminados, grano fino y dureza) y; lo más probable, la preparación de las muestras. Como se ha discutido, los porcentajes en peso de los sulfuros de cobre, al margen de la cantidad, pueden auxiliar inclusive en la clasificación litológica de una mena.

Esta técnica aquí descrita puede ser desarrollada en laboratorios de investigación de nuestro país, requiriendo para ello el uso de Microscopios Electrónicos de Barrido y de un sistema de Análisis de Imágenes que bien pueden subsi-

diar, no solamente análisis cuantitativos en menas, sino también en productos de beneficiamiento mineral y otros.

AGRADECIMIENTOS

El primer autor expresa sus agradecimientos al Servicio Alemán de Intercambio Académico (DAAD) y a la *Deumches Zentrum für Luft-und Raumfahrt e.V.* (DLR) por el apoyo financiero durante su doctorado sandwich en la Universidad de Halle, Alemania. Los agradecimientos se extienden al Consejo de Desenvolvimento Científico y Tecnológico (CNPq), CAPES y Compañía Vale do Rio Doce-Salobo Metais S.A. (CVRD) por el apoyo financiero y concesión de material de estudios. También se agradece al Prof. Dr. Enrique Kahn, por la colaboración en los análisis modales realizados en el Laboratorio de Caracterización Tecnológica de la EP-USP (Brasil).

BIBLIOGRAFÍA

- Reid, A.F.; Gottlieb, P.; MacDonald, K.J., Millar, P.R., "QEM*SEM, "Análisis of ore minerals": volume, fraction, liberation and observational variances". In: ICAM II, Los Angeles, Proceedings, 1984, pág. 22 – 25.
- Gottlieb, P.; Butcher, A. R.; Ho Tun E.; Sutherland, D. N. "Applications of automated process mineralogy". In: ICAM 6, Gottingen, Proceedings, 2000, pág. 321 – 323.
- Bonifazi G.; La Marca, F.; Massacci, P.; Patrizi, G. "Bulk particle characterization by image analysis". In: Int. Min. Proc. Cong. 20., Aachen, Proceedings, 1977, pág. 327 – 342.
- Jones, M. P. "Applied Mineralogy". A quantitative approach, Graham & Trotman, 1987.
- Gabas, S. G. "Análise de imagens aplicada à caracterização de minérios – Análise modal e liberação". Dpto. de Engenharia de Minas, Escola Politécnica da Universidades de São Paulo, São Paulo, Tesis de masterado, 1999.
- Leica. "Image Processing and Análisis System". Leica Q500MC Qwin User Manual, 1995.
- Malkusch, W. "Fundamentals and Problem – Solving Sequences of Quantitative Image Analysis". Laboratory Focus, 4 (2) 2000. (A Promotive Communication Inc. Publications Zeiss).
- Pereira, C. E., Andrade, V. L. L., Viana Jr. A., Mo-reira, L. D. "Beneficiation of the Salobo 3A sulphide copper ore". In: COPPER 87, Chile, Proceedings, 1987, pág. 317-327.
- Souza, L. H., Vieira, E. A. P., "Projeto Salobo, Jazida de cobre Salobo/ouro/prata. Relatório final de geologia". Fase Salobo Metais S. A. (1977-1988), Rio de Janeiro, 82 p. (informe interno), 1998.