

Reconocimiento automatizado de menas metálicas mediante análisis digital de imagen: un apoyo al proceso mineralúrgico. I: ensayo metodológico(·)

E. Berrezueta* y R. Castroviejo**

Resumen

La investigación microscópica de menas metálicas ha sido, desde sus inicios, una importante herramienta para el control del proceso mineralúrgico. El volumen de las operaciones actuales es tal que este control es imposible por los métodos clásicos, pero la automatización del proceso por análisis digital de imagen, ADI, se ha visto retrasada, entre otras cosas, por la similar reflectancia, R, de menas importantes, por limitaciones instrumentales y metodológicas y por las dificultades que implica el anisotropismo, las cuales desaparecen evitando la polarización. Los resultados obtenidos muestran la viabilidad de la identificación y cuantificación automatizadas mediante ADI, a partir de medidas R con cámara vídeo 3CCD sobre microscopio de reflexión. Así lo corrobora el ensayo sistemático sobre las principales menas. Se describe la metodología secuenciada. Implica una puesta a punto rigurosa del equipo para controlar problemas instrumentales, derivas, ruido..., el análisis estadístico y la aplicación de criterios complementarios, metalogenéticos y físicos.

Palabras clave

Recursos minerales. Menas metálicas. Análisis de imagen. Microscopía óptica. Mineralurgia, Mineralogía.

Automated microscopic characterization of metallic ores with image analysis: a key to improve ore processing. I: test of the methodology

Abstract

Ore microscopy has traditionally been an important support to control ore processing, but the volume of present day processes is beyond the reach of human operators. Automation is therefore compulsory, but its development through digital image analysis, DIA, is limited by various problems, such as the similarity in reflectance values of some important ores, their anisotropism, and the performance of instruments and methods. The results presented show that automated identification and quantification by DIA are possible through multiband (RGB) determinations with a research 3CCD video camera on a reflected light microscope. These results were obtained by systematic measurement of selected ores accounting for most of the industrial applications. Polarized light is avoided, so the effects of anisotropism can be neglected. Quality control at various stages and statistical analysis are important, as is the application of complementary criteria (e.g., metallogenetic). The sequential methodology is described and shown through practical examples.

Keywords

Mineral resources. Ore minerals. Image analysis. Optical microscopy. Ore processing. Mineralogy.

1. INTRODUCCIÓN

La utilización de la técnica de ADI, Análisis Digital de Imagen, como complemento de estudios de microscopía, proporciona un eficaz soporte numérico para la cuantificación de parámetros geométricos y densitométricos de los minerales. La gran ventaja de esta técnica frente a otros métodos de cuantifi-

cación clásicos, como la platina integradora sobre microscopio óptico, es su mayor versatilidad, agilidad y potencia, lo que permite aumentar la base de observación y automatizar el tratamiento matemático de los datos, posibilitando no sólo resultados más fiables y rápidos, sino también el abordar problemas que por el volumen de trabajo que requieren serían impracticables con procedimientos tradicionales.

(·) Trabajo recibido el día 19 de mayo de 2006 y aceptado en su forma final el día 30 de enero de 2007.

* FIC de la Tierra (Escuela Superior Politécnica del Litoral), Ecuador.

** Departamento de Geología. ETSI Minas (Universidad Politécnica de Madrid, UPM), España.

El estudio automatizado de secciones pulidas, para la identificación, cuantificación y caracterización de las fases minerales presentes en las menas metálicas, puede constituir un importante avance en el control y mejora de la eficiencia de los procesos mineralúrgicos, facilitando la optimización tanto del beneficio en sí (recuperación) como del uso de reactivos y proporcionando, además, informaciones muy valiosas para evitar o incluso remediar la contaminación del medio ambiente por residuos y efluentes. Si se dispusiese de una metodología asequible, ágil y de aplicación general, sin lugar a dudas, se habría logrado una eficazísima herramienta, sin lugar a dudas, útil no sólo para los problemas industriales (entre otros muchos)^[1 y 2], sino también para la investigación mineralógica^[3]. Sin embargo, el proceso de automatización tropieza, en el caso de las menas metálicas, con importantes dificultades, entre las que hay que destacar:

- la coincidencia, al menos parcial, de los valores de color y reflectancia –los que se van a cuantificar con el microscopio óptico– de numerosos minerales; este problema lo resuelve el microscopista experto recurriendo a otras observaciones complementarias de carácter cualitativo que resultan, en conjunto, diagnósticas para la correcta identificación de cada fase mineral: entre ellas destacan las propiedades observadas con luz reflejada (pleocroísmo, reflexiones internas, colores de anisotropismo, etc.), pero, éstas son por su propia naturaleza difícilmente cuantificables;
- la necesidad de prescindir, para el proceso de identificación automatizada, de las propiedades ligadas a la polarización, es decir, al anisotropismo óptico de los minerales, a no ser que se recurra a la medida y correlación de las propiedades para distintas orientaciones en cada grano, rotando la platina o el analizador, lo que supone un proceso no sólo más costoso y lento, sino, también, de diseño más complejo.

Una alternativa empleada por algunos investigadores es el recurso al microscopio electrónico de barrido y al análisis de sus imágenes digitalizadas, basadas en los datos de composición química de las fases minerales detectadas (p.ej. CANMET, Ottawa)^[4]. El MEB tiene ventajas y limitaciones frente al microscopio óptico, de las que existen algunos estudios comparativos^[5]. Una de sus limitaciones es la elevada inversión necesaria, si se compara con el microscopio óptico. La estrategia subyacente a la presente investigación es la de diseñar una metodología eficaz para la mayor parte de los casos, sobre todo los

de interés industrial, pero que sea al mismo tiempo asequible económicamente y que sólo requiera una infraestructura instrumental de instalación y mantenimiento sencillos.

Estas condiciones son las que requieren extensas regiones, como Iberoamérica, en las que los problemas industriales y ambientales ligados al beneficio de los recursos minerales son importantes, pero en las que al mismo tiempo los problemas financieros son agudos. Ello, decanta claramente las opciones a favor de la microscopía óptica, que constituye la referencia básica de la presente investigación.

2. OBJETIVOS

El propósito de este trabajo es presentar una sistemática que hace posible la identificación y cuantificación automatizadas de los principales minerales opacos presentes en secciones pulidas^[6], ampliando la metodología previa^[7]. En concreto, los objetivos son:

- Definición de las variables que condicionan los valores de reflectancia (R %; o nivel de gris, NG) que caracterizan a los minerales.
- Obtención de una metodología que garantice la reproducibilidad de los rangos de segmentación (NG) encontrados para cada fase mineral estudiada.
- Comprobación y validación de la secuencia metodológica planteada.

3. METODOLOGÍA. MATERIALES. INSTRUMENTACIÓN

El primer problema que se plantea es la selección de los minerales para el ensayo de la metodología. El número de minerales lo bastante absorbentes, óptimamente, como para ser considerados opacos es de unos 660^[8]. Teniendo en cuenta lo dicho en la introducción acerca de las dificultades metodológicas de partida, una selección adecuada es una condición crítica. A priori, no todas las menas van a poder distinguirse automáticamente por los parámetros medidos, ya que las hay que tienen valores similares de éstos; sin embargo, no todas son importantes y sólo algunas llegan a ser frecuentes (en torno a una treintena)^[8 y 9]. Por ello, se ha optado por limitar el ensayo, en esta primera fase, a estos minerales más comunes y de mayor interés industrial, aunque la metodología está abierta a posibles ampliaciones.

Se ha seguido un criterio basado en la experiencia, según el cual serán considerados prioritariamente

aquellos minerales que son realmente frecuentes o de importancia probada como menas, condicionantes en la recuperación mineral o en la problemática medio ambiental. Estos son:

- Elementos nativos: grafito, oro, plata, platino.
- Sulfuros, arseniuros: arsenopirita, bornita, calcopirita, cinabrio, covellina, cubanita, esferita, estibina, galena, linneíta, marcasita, niquelina, molibdenita, pentlandita, pirita, pirrotina, sulfosales: trahedrita.
- Óxidos: casiterita, cromita, hematites, ilmenita, magnetita, rutilo, uraninita.
- Hidróxidos: goethita.
- Tungstos: wolframita.

Una ayuda adicional la constituye el criterio de paragénesis, según el cual no todos los minerales van a aparecer asociados al azar, sino que la asociación real está condicionada por el tipo de yacimiento: la información geológica y el estudio mineralógico previo permiten definir esta tipología y establecer cuáles van a ser los minerales reales a discriminar. Este criterio geológico puede integrarse con los valores de los parámetros medidos y potencia la capacidad de discriminación del sistema, incluso para menas no consideradas inicialmente. La integración con la metodología presentada en un sistema experto será objeto de una próxima publicación.

La totalidad del proceso experimental se ha desarrollado en el Laboratorio de Microscopía Aplicada y Análisis de Imagen del Departamento de Ingeniería Geológica, ETSI Minas, Universidad Politécnica de Madrid. La instrumentación utilizada (Fig. 1) comprende un microscopio óptico Leica DMRXP (trabajando con luz reflejada, sin polarización, en aire y con objetivo 20 X), cámara de vídeo 3 CCD SonyXC-003P, tarjeta de adquisición Meteor II, Software de



Figura 1. Equipo de análisis digital de imagen.

Figure 1. Digital Image analysis equipment.

ADI Aphelion 3.1., patrones de reflectancia para calibración de Leitz y del Zentrales Elektronenmikrosonde Labor der Ruhr-Universitaet Bochum (calibrado por el Dr. H. J. Bernhardt) y 52 probetas pulidas de referencia.

4. PROCESO EXPERIMENTAL

La primera parte del proceso experimental comprende la elaboración y/o preparación de las muestras y la descripción mineralógica de la colección de probetas pulidas utilizadas como referencia. A continuación, se aborda la puesta a punto del equipo de ADI, es decir, la consecución de unas condiciones que garanticen la reproducibilidad de las medidas. Posteriormente, se realizará el trabajo con las imágenes, es decir, el desarrollo de las etapas de adquisición, tratamiento y caracterización de las fases minerales. Resta, finalmente, comprobar si los resultados encontrados (rangos de segmentación) se ajustan a los valores esperados (valores de reflectancia para los distintos tramos espectrales, definidos como valores porcentuales, % R) y contrastarlos sobre minerales presentes en probetas pulidas diferentes a las utilizadas como referencia.

4.1. Preparación de muestras

La consecución de unas condiciones homogéneas de acabado de las secciones a estudiar es posible a través del establecimiento de un procedimiento riguroso de elaboración que garantice un pulido óptimo^[10]. A la secuencia típica de preparación de muestras empleada habitualmente, se añade una valoración cuantitativa, a través de las medidas en NG de los minerales y de las rayas de pulido que se presentan en la muestra, con el fin de valorar de mejor manera la calidad de pulido.

4.2. Descripción mineralógica de probetas

Las muestras seleccionadas para su caracterización mineralógica por técnicas tradicionales de microscopía y, a continuación, por ADI, pertenecen a la Colección de menas Rehwald Sammlung, cedida por el Prof. G. C. Amstutz, Mineralogisch-Petrographisches Institut der Universitaet Heidelberg, Alemania, colección que ha servido de base a las descripciones fundamentales para la identificación microscópica de menas metálicas^[11 y 12]. Las muestras

proceden de los principales yacimientos mundiales y se ha buscado que sean representativas a la hora de utilizarlas como materiales de referencia (minerales). La descripción mineralógica (Fig. 2) ha sido realizada utilizando todas las opciones posibles del microscopio óptico de reflexión. La descripción en detalle de cada una de las probetas ha sido almacenada en una base de datos gráfica diseñada exclusivamente para este trabajo.

4.3. Puesta a punto de los instrumentos

Tiene por objeto definir un procedimiento para limitar y corregir la influencia de cada uno de los elementos o instrumentos que intervienen durante la toma de medidas. Previamente al estudio de cada uno de los instrumentos, ha sido controlada la influencia de variables externas como la intensidad de alimentación, iluminación, humedad, temperatura, ruidos-vibraciones, etc., trabajando en valores constantes de estos parámetros.

4.3.1. Microscopio óptico

El instrumento utilizado para la visualización y estudio de las muestras es un Microscopio Óptico de Reflexión (Leica DMRXP) con objetivo de 20X de óptica plana corregida. El valor constante utilizado para el potenciómetro es de 6,5 V, con el cual se evita que los minerales más reflectantes produzcan sobrecarga luminosa y que los menos reflectantes se vean negros^[13]. Las propiedades anisótropas características de ciertas menas, que se traducen en valores variables según la orientación, facilitan el reconocimiento cualitativo de los minerales observados, usando técnicas microscópicas tradicionales de luz polarizada. Usando la técnica de ADI, esta variación en la

reflexión es un problema por cuanto el sistema desarrollado trabaja con rangos fijos. Para evitar esto, la luz del microscopio utilizada para iluminar las probetas pulidas no será polarizada, es decir, se trabaja sin polarizador ni analizador^[14].

La iluminación del microscopio, sobre todo a bajas intensidades, produce una luz que tiende hacia el rojo. Para corregir este desplazamiento, será utilizado siempre el filtro azul. Aunque para la caracterización de algunos minerales se recurre a veces a la observación con objetivos de inmersión (en aceite, habitualmente), se ha renunciado a ello en este estudio, por razones prácticas (sistematización, agilidad y mayor facilidad de automatización).

4.3.2. Cámara de vídeo

Se requiere una cámara de altas prestaciones, a fin de minimizar las fuentes de ruido y de optimizar la reproductibilidad, sin renunciar a la necesaria sensibilidad. El ruido (de fotón, recurrente por sombras y de digitalización)^[15-17] se debe a la dispersión de señales eléctricas que presentan los fotodiodos de la cámara al ser afectados por una cantidad constante de fotones. Adicionalmente, el sobrecalentamiento puede originar, por sobreexcitación, una significativa fluctuación de niveles de intensidad bajo iluminación constante. Se ha trabajado con una cámara de vídeo color 3 CCD de investigación SonyXC-003P.

Al adquirir dos imágenes con un mismo equipo e idénticas condiciones de adquisición, su respuesta digital debería ser idéntica, independientemente del momento en el que sea captada. En la práctica, esto no es así, ya que la respuesta de la cámara habrá variado en ambos instantes, obteniendo dos imágenes similares pero no idénticas. La diferencia entre una y otra imagen será debida al "ruido" y a la "deriva" que se producen en la cámara.

La deriva temporal es la variación de la respuesta de la cámara en función del tiempo; ha sido corregida determinando el tiempo de calentamiento de la cámara para estabilizar la señal. El tiempo necesario para estabilizar el equipo se determina estudiando la respuesta obtenida sobre un conjunto de pixels homogéneos (ventana inmóvil de 10·10 pixels, en este caso) a intervalos conocidos de tiempo. Con ayuda de una representación gráfica de los datos obtenidos, se puede observar la variación sobre dicha ventana a lo largo del tiempo: así, se ha definido el tiempo óptimo de calentamiento antes de realizar medidas como 1 h y 10 min^[10 y 18]. Un estudio similar ha sido realizado sobre la fuente de iluminación del microscopio dando como resultado un tiempo de 40 min, inferior al de la cámara de vídeo.

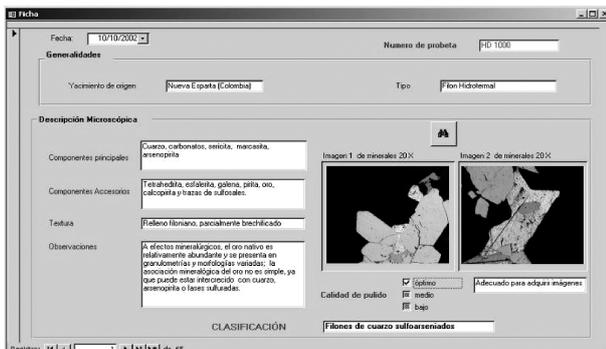


Figura 2. Descripción mineralógica de probetas pulidas.

Figure 2. Mineralogical description of polished sections.

El ruido electrónico es la dispersión de la señal de salida en la cámara debida principalmente, a errores o sobre-excitación de los fotodiodos y a variaciones de la intensidad alimentación. La limitación de este ruido es posible a través de la adquisición de una secuencia de imágenes sucesivas de una misma escena, de las que se obtendrá una imagen promedio. En el momento de realizar la operación de promediado de imágenes, es importante considerar si el ruido es periódico o no; en el caso de que así sea, las imágenes adquiridas para el promediado deberán corresponder a un rango de tiempo equivalente a dicho período o múltiplo del mismo. En este caso, el ruido determinado en la instrumentación utilizada, teniendo en cuenta las correcciones de deriva temporal, presenta una periodicidad recurrente de 300 s. El ruido puesto de manifiesto para cada una de las bandas en las que se ha separado la información, R, G y B, se observa en la figura 3.

En concreto, el número de imágenes tomadas para esta experimentación es de potencias de 2, por adecuarse a la capacidad del procesador para ejecutar operaciones con nivel de rendimiento óptimo. Debido a que la rutina desarrollada para adquirir imágenes automáticamente sólo permite adquirirlas en secuencia continua de la misma escena a intervalos superiores a 4 s, la opción utilizada para el prome-

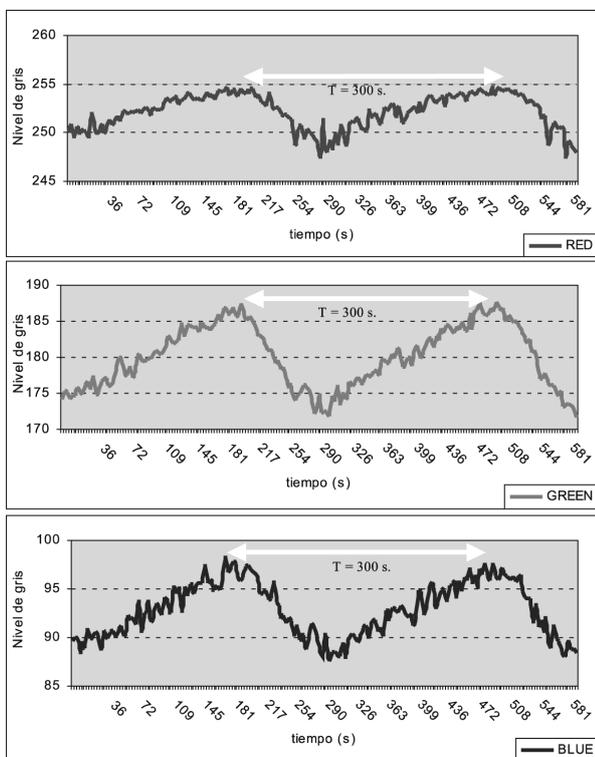


Figura 3. Función de ruido en cada una de las bandas RGB.

Figure 3. Noise level function in RGB channels.

diado de imágenes será de 64. La variabilidad en respuesta de escenas promedio con 32 imágenes se aproxima a ± 1 NG.

Otro aspecto a tener en cuenta es la respuesta de la cámara (teóricamente, lineal) en relación con la intensidad de iluminación. En la práctica, la variación de la intensidad de la luz con el potenciómetro altera el espectro, por lo cual es preferible trabajar con intensidades constantes y medir la respuesta de la cámara con referencia a patrones de reflectancia conocida. En la secuencia de trabajo se deberá tener en cuenta el recalentamiento de la cámara y considerar la media aritmética de las medidas.

El ensayo se iniciará con la medida a través de una ventana de muestreo (10·10 pixels) del valor medio (NG) de los pixels pertenecientes a una fase homogénea y perfectamente conocida (espectro de reflectancia, totalmente definido). Las medidas sobre cada una de las fases de referencia serán obtenidas de diferentes granos y de diferentes muestras (patrones o probetas) para que tengan un mayor rigor estadístico. A continuación, los valores finales medidos para cada fase se compararán con sus valores internacionalmente reconocidos, medidos independientemente^[19 y 20]. Los resultados obtenidos muestran la linealidad de la respuesta de la CCD y se presentan en la figura 4.

La calibración del color es otro aspecto a considerar, debido a que las señales digitalizadas RGB de la cámara de vídeo CCD no son medidas absolutas de parámetros físicos del color. Si se busca que una señal RGB sea reproducible, la cámara debe estar calibrada con respecto a un blanco de referencia (patrón homologado), entendiéndose por tal el color que presenta, para cada uno de los canales en que es posible descomponer una imagen en color, los valores máximos de la escala (255 NG) para R, G y B. La función de

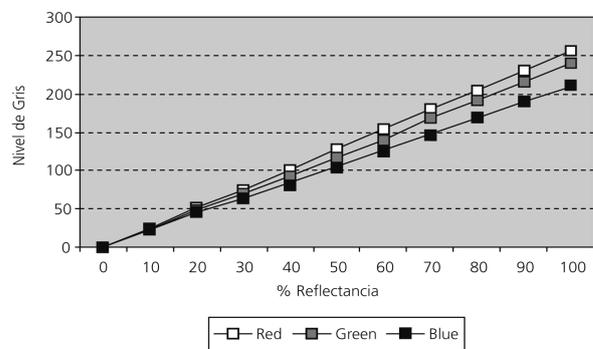


Figura 4. Relación entre reflectancia (% R) y niveles de gris.

Figure 4. Plot of relation between reflectance values and gray level.

calibración de color de la cámara pretende adaptar la señal RGB del sistema digital al campo definido mediante el patrón blanco^[21].

Según la la Commission Internationale de L'eclairage (CIE), si el patrón de reflexión tiene un porcentaje de reflexión igual para luz roja, verde y azul, éste se considera como patrón blanco^[21]. Los patrones utilizados en este trabajo son los habitualmente empleados en la calibración de reflectómetros. Son 4 patrones con porcentajes de reflexión equivalentes a 13 %, 17 %, 21 %. Los primeros de la casa Leitz y el último fabricados (SiC) y calibrado para este estudio por el Zentrales Elektronenmikroskop Labor der Ruhr-Universitaet Bochum.

En la práctica, al ajustar el color del sistema digital en referencia al patrón blanco, el valor definido para cada banda, R, G y B, con respecto a la reflectancia del patrón, deberá tener en cuenta los valores de reflectancia reales de las fases minerales a investigar, a fin de garantizar que todos ellos se sitúen en el rango de medidas instrumental, es decir, entre los umbrales máximo y mínimo del equipo (NG entre 0 y 255). De lo contrario, se perdería la posibilidad de determinar con precisión los valores extremos, por ejemplo, plata, elementos del grupo del platino, a causa de la sobresaturación de la cámara. Antes de la calibración, ya ha sido establecido el valor de intensidad de luz con el que es posible trabajar con el ADI (6,5 V) y la relación aproximada entre nivel de gris y reflectancia (NG ~ 3 · % R).

Al igual que en los casos anteriores, las medidas se realizarán sobre un ventana de 10·10 *pixels*, localizada en el centro de la escena observada al microscopio, en una área homogénea y sin ningún poro o arranque. Teniendo en cuenta cuanto antecede, se han seguido rutinas conocidas^[15 y 16] para ajustar las funciones de *offset* y *gain* de la cámara, en función de las reflectancias mínima y máxima de los objetos a medir (minerales más claros y más oscuros en valores absolutos). En la práctica, la cámara CCD solo permite variar directamente los valores correspondientes a las bandas roja y azul, dejando la banda verde ligada a los valores de las otras dos bandas, pero sin que el operador pueda controlar directamente sus cambios. Los datos de corrección de *gain* y *offset* con los que es posible obtener por ejemplo valores de nivel de gris semejantes (NG = 50 +/- 1, para R, G y B) de imágenes correspondientes al patrón blanco Leitz (reflectancia del 17 %), se presentan en la figura 5.

Aun con unas condiciones de adquisición estables, la respuesta de un objeto puede variar en función de su localización bajo el microscopio. Esta variación –deriva espacial–, debida a defectos de fabricación de las cámaras CCD, iluminantes y óptica, que provocan respuestas heterogéneas en reflectores

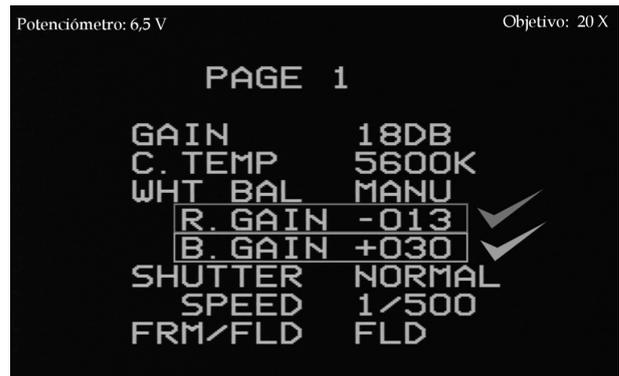


Figura 5. Configuración del *gain* de la cámara de video CCD.

Figure 5. Gain configuration in CCD camera.

homogéneos, se ha minimizado por corrección numérica, en el supuesto de linealidad de la CCD, a partir de escenas del componente aditivo y multiplicativo del ruido, según rutinas ensayadas^[15], mediante la adquisición de: (i), una imagen de ruido negro en condiciones estables; y (ii), una imagen de una perfecta escena homogénea, grabando la deriva espacial generada por factores como el mal centrado de la fuente de luz, posibles defectos de óptica o ganancia heterogénea de los sensores.

Para ilustrar la idea de la corrección numérica, se puede decir que el ruido negro es una aproximación de la situación de oscuridad que será adicionado al *pixel* respuesta, mientras que la deriva espacial representa la variación en intensidad del fotón y actuará como un factor multiplicativo. En otras palabras, la imagen negra actuará como un *offset* mientras que la imagen blanca como un *gain*. La fórmula numérica a aplicar es la siguiente:

$$IR'_{(x,y)} = \left[\frac{(IR_{(x,y)} - NIR_{(x,y)})}{(BIR_{(x,y)} - NIR_{(x,y)})} \right] \cdot [BIR_{(h,l)} - NIR_{(h,l)}] + NIR_{(h,l)}$$

donde:

- $IR_{(x,y)}$: El NG del pixel de coordenada x,y en la imagen ingresada I.
- $NIR_{(x,y)}$: El NG del pixel de coordenada x,y en la imagen de ruido negro (NI).
- $BIR_{(x,y)}$: El NG del pixel de coordenada x,y en la imagen de deriva espacial (BI)
- (h,l) : Coordenadas del pixel central de la imagen.
- $IR'_{(x,y)}$: NG corregido.

En la práctica, el nivel de deriva espacial existente en el equipo de ADI será, en primer lugar, cuantificado a través del cálculo de variación en NG de una misma zona, pero en diferentes posiciones. Para este cálculo se ha localizado alguna referencia, en la probeta o patrón, que permita aplicar una ventana de muestreo de 10·10 pixels, independientemente de su posición dentro del campo de visión y captura.

Los valores medios de los pixels localizados dentro de la ventana de muestreo, variando la posición de una misma escena (Fig. 6) se muestran en la tabla I.

La interpretación de estos valores, aun siendo pocos los datos, muestra que existe una deriva espacial en las medidas. Según sea la localización óptica de la ventana de muestreo de una misma escena, si ésta está más alejada del centro hacia la izquierda, el valor medio de NG para las tres bandas tiende a aumentar; en cambio, si se toman los valores más hacia la derecha, de forma general, los valores medios tienden a disminuir. Como

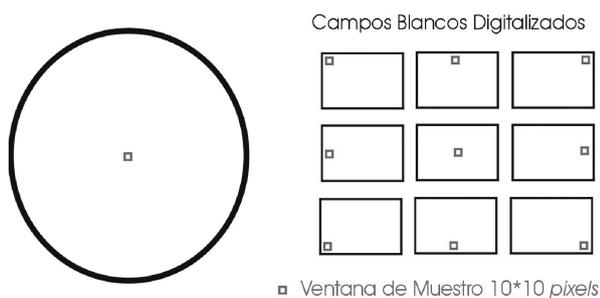


Figura 6. Localización de la ventana de muestreo.

Figure 6. Localization of sampling windows.

Tabla I. Valoración de la deriva espacial sobre imágenes (sin corregir)

Table I. Valuation of spatial drift on images (before correction)

Localización ventana	Banda roja		Banda verde		Banda azul	
	Media	Desviación estándar	Media	Desviación estándar	Media	Desviación estándar
Izq-Sup	203,7	3,2	203,5	2,4	201,6	2,5
Izq-Centro	202,8	4,1	201,9	2,8	203,4	2,2
Izq-Inf	200,1	5,2	201,2	3,6	201,9	2,1
Centro-Sup	200,1	2,1	200,5	2,4	199,6	2,5
Centro-Cen.	201,8	3,2	199,9	2,8	199,4	3,2
Centro-Inf	197,1	3,4	199,6	3,6	198,9	3,1
Der-Sup	198,7	3,1	199,5	2,4	197,6	2,5
Der-Centro	197,8	4,2	198,9	2,8	198,4	3,2
Der-Inf	199,1	4,4	197,2	3,6	199,3	4,1

variables de la fórmula se encuentran: la imagen en color a corregir, la imagen de un patrón blanco y la imagen de un patrón negro. Todas estas imágenes han sido adquiridas, corregidas y tratadas según los procedimientos anteriormente detallados. Es importante destacar que para hacer posible la aplicación de la fórmula de corrección, ha sido necesario cambiar el formato de la imagen en color RGB con 8 bits, a una con 16 bits para, de esta forma, evitar la pérdida de información durante las operaciones. Finalmente, el formato de la imagen en color resultante se reconvertirá a 8 bits.

Debido a la imposibilidad de cambiar la profundidad de las imágenes de 8 a 16 bits con el software empleado durante todo este trabajo, se ha realizado una rutina específica utilizando el software de ADI *Micro Image 4.0* (Olympus Optical Co.), empleado por el IGME en sus aplicaciones e investigaciones. Un ejemplo práctico de su secuencia de aplicación se esboza en la figura 7. Al aplicar la corrección numérica a la escena blanca antes caracterizada (Fig. 6), y calcular los valores de la media y desviación estándar para ventanas de muestreo de 10·10 pixels, se han obtenido los valores de la tabla II.

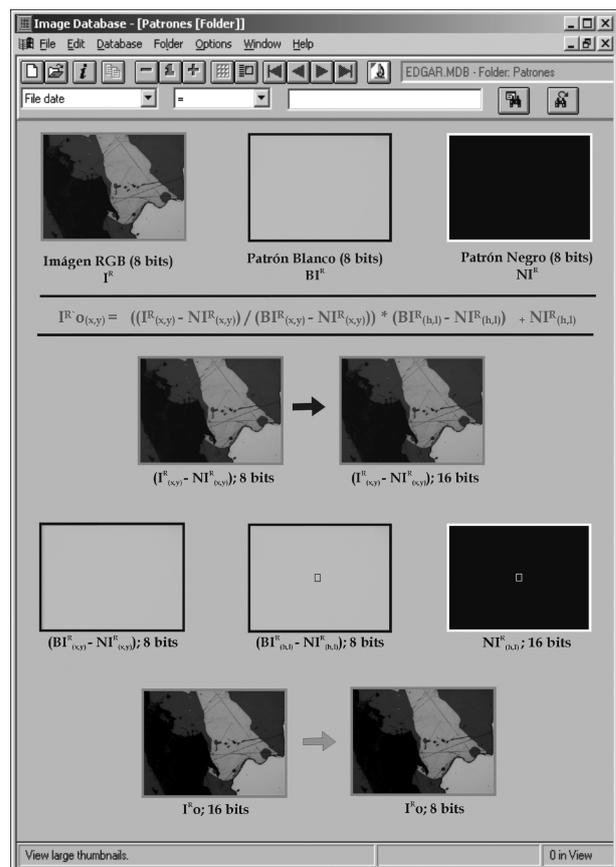


Figura 7. Corrección matemática en procesamiento de imágenes (*Micro Image 4.0*).

Figure 7. Mathematical corrections in image processing (*Micro Image 4.0*).

Los valores medios de NG, calculados sobre la escena blanca corregida numéricamente, presentan mayor semejanza que los determinados sobre la misma escena sin corregir (Tabla I). Esto avala la importancia de realizar esta corrección sobre todas las imágenes a caracterizar mediante ADI.

4.3.3. Software y hardware

Dentro de la infinidad de opciones existentes en el mercado, se ha optado por un equipo de ADI suficientemente flexible para permitir la interacción del usuario, matemáticamente riguroso y controlable y con un perfil adecuado a aplicaciones petrográficas. Está compuesto por un ordenador con tarjeta de digitalización *Meteor Board*, y con el programa *Aphelion 3.1*, que integra un conjunto de aplicaciones y funciones de tratamiento de información digital. Se ha determinado la magnificación que produce el software a la hora de presentar la imagen en pantalla y la relación entre N° pixels / tamaño real del objeto visualizado, por referencia a un micrómetro de precisión (calibración geométrica).

4.4. Adquisición de las imágenes

El proceso de adquisición de las imágenes se ha realizado con independencia de cualquier otro, como el tratamiento y/o segmentación, a fin de ganar tiempo en el proceso total y de lograr un control más preciso de la adquisición. Se trata de un proceso semi-automático, con enfoque de las escenas por el operador de

forma manual (Fig. 8), aunque es concebible el enfoque automático, mediante un microscopio motorizado.

4.5. Tratamiento de las imágenes

Una vez digitalizada y almacenada la información digital de la imagen en color (RGB) como un archivo tipo *tif*, se aplica una secuencia de tratamientos enfocados a mejorar, restaurar y resaltar la información buscada. La figura 9 muestra la evolución que sufre una serie de 8 imágenes digitales (barrido). En la fila superior, aparecen las 8 imágenes sin ningún tratamiento previo. A continuación, se presentan las mismas imágenes, pero adquiridas utilizando un promediado (16 imágenes). La siguiente escena representa las 8 imágenes sometidas a los filtros de mejora (*Median* y *Low Pass*). Finalmente se observan las imágenes sometidas a los filtros morfológicos (*Open* y *Close*). La imagen resultante de todo este proceso se designa genéricamente como "Imagen Tratada". Es evidente

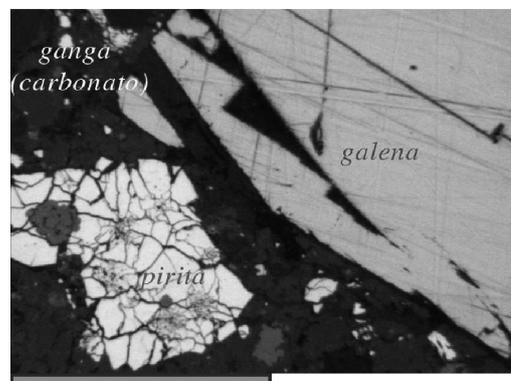
Tabla II. Valoración de la deriva espacial sobre imágenes (corregidas)

Table II. Valuation of spatial drift on images (corrected)

Localización ventana	Banda roja		Banda verde		Banda azul	
	Media	Desviación estándar	Media	Desviación estándar	Media	Desviación estándar
Izq-Sup	200,5	3,1	200,3	2,3	201,3	2,9
Izq-Centro	200,6	4,1	200,7	2,9	200,4	2,5
Izq-Inf	200,2	5,2	201,6	3,3	200,2	2,3
Centro-Sup	200,1	2,1	200,5	2,2	200,3	2,4
Centro-Cen.	200,8	2,9	199,9	2,6	199,2	3,3
Centro-Inf	199,4	3,5	200,5	3,7	199,3	3,4
Der-Sup	199,5	3,1	200,4	2,5	199,4	2,4
Der-Centro	199,8	3,8	200,2	3,2	199,5	3,3
Der-Inf	200,1	4,3	200,1	3,6	199,3	3,9



100 micras



100 micras

Figura 8. Imágenes de minerales en microscopio de reflexión.

Figure 8. Images of ores under the reflection microscope.

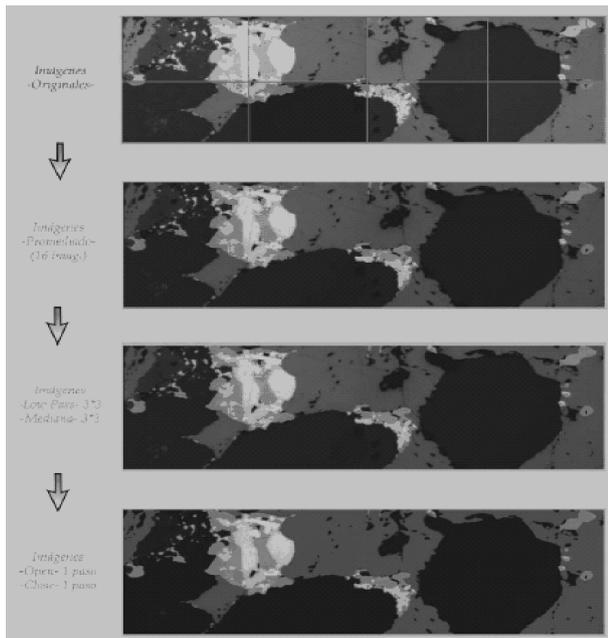


Figura 9. Secuencia de procesamiento de imágenes digitales.

Figure 9. Digital image processing sequence.

que el paso más importante, por lo que respecta a la calidad de las imágenes, se da durante el proceso de adquisición de las mismas (promediado de imágenes). Si se fallara en este punto, ningún filtro podría recuperar la información destruida.

4.6. Caracterización de las fases minerales por ADI y análisis estadístico

4.6.1. Condiciones de muestreo y toma de datos

Adquirida la imagen final de la que se pretende extraer la información, es necesario obtener, a través de un muestreo estadístico, los valores con los cuales es posible segmentar cada una de las fases minerales de interés planteadas en este estudio. A fin de garantizar la representatividad de los datos obtenidos, para cada una de las fases minerales a caracterizar, han sido aplicados los siguientes criterios o condiciones de muestreo^[15 y 22].

- Las fases minerales deberán estar correctamente reconocidas en la probeta pulida de referencia.
- Las imágenes con las fases a caracterizar mediante ADI provendrán de, por lo menos, dos

yacimientos diferentes y/o tres probetas diferentes.

- Para cada fase mineral se tomarán ventanas de muestreo de 10·10 pixels (Fig. 10).
- El número de ventanas de muestreo por mineral será de 100, valor empírico del mejor ajuste experimental, al comparar el área segmentada con rangos obtenidos mediante diferente número de ventanas y el área real total del mineral estudiado. La representación gráfica de los % de acierto, expresados como % de área segmentada con respecto al área total de la fase mineral, para algunos minerales, utilizando diferente número de ventanas se presenta en la figura 11.

La localización de la ventana de muestreo se realiza manualmente por parte del operador. Los valores de NG de las imágenes se obtienen automáticamente

Tamaño de las Muestras

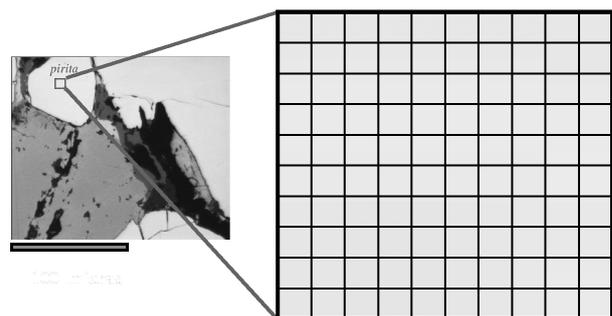


Figura 10. Ventana de muestreo (10 * 10 pixels).

Figure 10. Sample window (10 * 10 pixels).

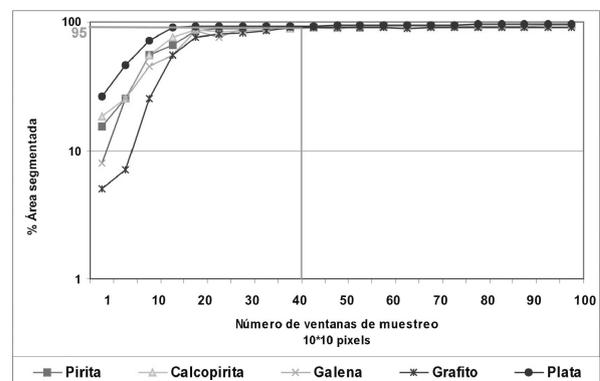


Figura 11. Fracción de área segmentada según la fase mineral y el número de ventanas de muestreo.

Figure 11. Plot of area of segmented image vs. number of windows measured.

a través de la ejecución de una rutina diseñada específicamente para este fin. La rutina, además, permite exportar los valores calculados a programas como *Microsoft Excel* y *Statística 6.0*, que serán las herramientas utilizadas en el tratamiento estadístico de los datos.

4.6.2. Análisis estadístico de los datos medidos

Los valores de NG, obtenidos a través de las ventanas de muestreo para cada fase mineral, han de ser separados en tres grupos (bandas R, G y B) que recibirán un estudio estadístico individualizado. Este estudio estadístico pretende, entre otras cosas, definir el tipo de distribución a la que se ajusta la muestra y delimitar el rango óptimo de segmentación de cada fase con la mayor precisión y fiabilidad posible. El análisis estadístico de las distribuciones de NG obtenidas ha seguido los siguientes pasos:

- Cálculo de los estadísticos característicos de la muestra (media, moda, mediana y desviación estándar).
- Desarrollo de histogramas, diagramas de cajas (*box-plots*) y curvas de distribución.
- Determinación y comprobación del tipo de distribución de frecuencia (pruebas de normalidad mediante el cálculo del Coeficiente de Correlación Lineal de Pearson, empleando una distribución aleatoria normal).
- Obtención de rangos de detección para las fases minerales con diferentes valores de fiabilidad o ajuste.

Los resultados principales del muestreo y estudio estadístico para cada uno de los minerales estudiados y para cada una de las bandas en que se descompone la información se presentan en la tabla III.

4.7 Validación metodológica

Antes de aplicar el proceso de segmentación de las fases minerales y de evaluar si los rangos de segmentación obtenidos del análisis individualizado de las mismas ($m \pm 2\sigma$, para cada banda) presentan resultados satisfactorios, es necesario realizar una verificación previa que permita conocer si los rangos de NG han sido obtenidos en condiciones óptimas. Esto, ha podido comprobarse utilizando el mismo criterio empleado en la verificación de la linealidad de la respuesta de la cámara de video CCD, es decir, la existencia de una proporcionalidad directa entre la Reflectancia de una

Tabla III. Media y desviación estándar de los valores de NG

Table III. Average and standard deviation of gray level values

MINERAL	VALORES ESTADÍSTICOS NG					
	ROJA		VERDE		AZUL	
	Media	Desv. Estand.	Media	Desv. Estand.	Media	Desv. Estand.
GRAFITO	28	7,27	34	6,46	25	7,69
ORO	255	—	240	2,12	116	2,41
PLATA	255	—	255	—	255	—
PLATINO	224	1,71	220	1,36	189	1,45
ARSENOPIRITA	187	2,22	191	2,27	159	2,48
BORNITA	92	2,36	69	2,60	56	2,47
CALCOPIRITA	161	2,28	157	3,17	107	2,52
CINABRIO	80	3,36	89	3,31	93	3,64
COVELLINA	42	6,37	47	5,64	68	5,97
CUBANITA	130	2,35	117	2,56	117	2,40
ESFALERITA	57	1,81	61	1,78	60	1,91
ESTIBINA	119	3,97	127	3,50	134	3,74
GALENA	137	1,77	142	1,92	150	2,18
LINNEITA	145	1,25	127	1,51	92	1,44
MARCASITA	159	3,52	168	3,57	139	4,18
MOLIBDENITA	90	6,53	92	6,41	100	6,35
NIQUELINA	190	3,60	149	3,43	121	4,65
PENTLANDITA	148	1,21	136	1,39	99	2,02
PIRITA	189	2,30	190	2,42	149	3,12
PIRROTINA	143	3,91	141	3,58	119	4,11
TETRAHEDRITA	98	2,25	107	2,06	91	2,34
CASITERITA	36	1,62	38	1,44	38	1,84
CROMITA	42	1,31	43	1,33	44	1,42
HEMATITES	80	4,04	87	3,54	91	3,89
ILMENITA	59	3,47	57	3,25	59	3,60
MAGNETITA	71	1,52	65	1,33	65	1,81
RUTILIO	66	1,75	67	2,22	75	2,96
URANINITA	43	1,35	44	1,26	46	1,41
GOETHITA	48	3,62	50	3,63	61	3,89
WOLFRAMITA	50	2,26	50	2,33	54	2,47
GANGA	19	6,22	14	5,63	11	5,57

fase mineral medida con un reflectómetro independiente y su valor de NG.

4.7.1. Relación reflectancia - NG

Actualmente es posible contar con información detallada del % R (Reflectancia) de minerales para rangos de longitud de onda concretos^[20]. No sucede así con la información obtenida a través de la cámara vídeo 3 CCD, al no especificar ésta los rangos de longitud de

onda que utiliza para separar la información de una imagen en color en las bandas roja, verde y azul. Como primera aproximación empírica, han sido estimados como rangos de longitud de onda equivalentes los siguientes: rojo (600-680 nm), verde (500-580 nm) y azul (400-480 nm).

La validación preliminar de los resultados obtenidos se realiza a partir de la comparación de los valores de NG, encontrados mediante la aplicación de ADI para cada una de las bandas en que ha sido descompuesta la imagen en color, y los valores de reflectancia homologados, correspondientes a cada fase mineral y para cada banda. Este procedimiento permitirá comprobar si alguna medida en NG se sale de la tendencia general de la relación NG y reflectancia, ya comprobada anteriormente en el ajuste de la cámara CCD y garantizar, así, que los procesos de adquisición, tratamiento, muestreo y determinación de los rangos NG que caracterizan a cada fase mineral sean los adecuados. La presencia de un error en esta comparación indicará el posible fallo en alguno o varios de los pasos seguidos durante el proceso experimental.

A fin de facilitar la comparación entre los valores NG medidos y los datos de reflectancia internacionalmente validados de los minerales, se utilizarán los valores promedios. La reflectancia se promedia de los valores validados por la Commission on Ore Mineralogy de la International Mineralogical Association (IMA/ COM), a partir de los estudios oficiales de cuantificación de parámetros de reflectancia para minerales opacos publicados^[20]. El cálculo integra los valores de reflectancia en tres grupos, rojo (600-680 nm), verde (500-580 nm) y azul (400-480 nm), teniendo en cuenta que muchos minerales tienen diferentes valores de R (Ro, Re; R1, R2 y R3), en función de su estructura cristalina y de la orientación. Como ejemplo se presenta el cálculo de la reflectancia promedio de la niquelina (Tabla IV).

La representación numérica de los datos (Tabla V) y la representación gráfica de los valores NG, vs. reflectancia (Fig. 12), permiten validar de forma preliminar el correcto desarrollo del proceso experimental de toma de datos. En los tres casos (Bandas roja, verde y azul), la relación entre los valores encontrados (NG) en la caracterización mediante ADI de los treinta minerales estudiados y los de sus correspondientes cifras de reflectancia (% R) es directamente proporcional y se ajusta a las siguientes funciones:

BANDA ROJA:

VALOR DE NG = 3,101 · (VALOR DE REFLECTANCIA)

Correlación: $R^2 = 0,97$

BANDA VERDE:

VALOR DE NG = 3,071 · (VALOR DE REFLECTANCIA)

Correlación: $R^2 = 0,87$

Tabla IV. Valores de reflectancia de la niquelina^[20]

Table IV. Reflectance values of nickeline^[20]

NIAS	λ de la luz	Aire	Promediado	
Bandas	nm	Ro (%)	Re (%)	R (%)
Azul	400	45,4	39,2	40,9
	420	44,2	38,8	
	440	43,5	36,8	
	460	43,2	36,2	
	480	44,3	37,2	
Verde	500	46,4	39,6	48
	520	48,6	42,3	
	540	50,7	45,3	
	560	52,8	48,2	
	580	54,8	51,0	
Roja	600	56,7	53,7	50,7
	620	58,4	55,9	
	640	59,9	57,8	
	660	61,3	59,4	
	680	62,5	61,0	

BANDA AZUL:

VALOR DE NG = 3,071 · (VALOR DE REFLECTANCIA)

Correlación: $R^2 = 0,92$

Es importante indicar que, a la hora de generar estas funciones de relación entre NG y % R, algunos puntos no han sido considerados debido a que su valor en NG estaba limitado por la capacidad de medida de intensidad del equipo de ADI (máximo: 255). Así, en la banda roja han sido eliminados los puntos que representaban el oro y la plata. En el caso de la banda verde y azul, el punto eliminado es el correspondiente a la plata. No obstante, como estos valores extremos corresponden sólo a estos minerales, su determinación mediante los valores máximos de los rangos empíricos no ofrece riesgos, pues el margen de diferencia de NG con la clase inmediatamente inferior (los sulfuros) es, todavía, elevado.

Otra prueba adicional, ésta cualitativa, de la validez de los valores obtenidos con la cámara 3 CCD, la proporciona la comparación de éstos con el espectro real de cada mineral, traducido en su color al microscopio de reflexión. Por ejemplo, la plata, el más reflectante de los minerales (Tabla V) manifiesta claramente su más elevado rango de NG (Fig. 12), incluso con respecto al oro, en las bandas verde, G, y, sobre todo, azul, B, lo que se explica por el color blanco de la plata. Sin embargo, como se observa en el mismo gráfico, en la banda roja, R, el oro tiene un valor comparable al de la

Tabla V. Valores de reflectancia (%) y NG para las Bandas R, G, y B (datos de [20]).

Table V. Reflectance values (%) and Gray level for RGB channels (data from [20])

MINERAL	VALORES PROMEDIO					
	ROJA		VERDE		AZUL	
	% R	NG	% R	NG	% R	NG
GRAFITO	12	28	14	34	11	25
ORO	90	256	75	240	37	116
PLATA	94	256	93	256	86	256
PLATINO	71	224	69	220	63	189
ARSENOPIRITA	53	187	53	191	48	159
BORNITA	28,8	92	21,3	69	17,9	56
CALCOPIRITA	48,7	161	46,4	157	32	107
CINABRIO	25	80	27,5	89	30	93
COVELLINA	13,5	42	14,5	47	22	68
CUBANITA	40,5	130	36,9	117	45,35	117
ESFALERITA	16	57	16,5	61	18,3	60
ESTIBINA	37	119	40	127	43	134
GALENA	42,9	137	43,1	142	49,1	150
LINNEITA	45	145	40	127	30	92
MARCASITA	51,7	159	53,5	168	45,35	139
MOLIBDENITA	29	90	28,5	92	32,5	100
NIQUELINA	59	190	47	149	39	121
PENTLANDITA	46	148	43	136	33	99
PIRITA	56	189	54,6	190	42,6	149
PIRROTINA	41,5	143	38,5	141	33	119
TETRAHEDRITA	31	98	32,4	107	31,7	91
CASITERITA	11,25	36	11,95	38	12	38
CROMITA	13,1	42	13,5	43	14,2	44
HEMATITES	26,2	80	28,3	87	30,6	91
ILMENITA	18,4	59	17,8	57	19,1	59
MAGNETITA	20	71	19,9	65	20,2	65
RUTILO	20,5	66	21	67	24,5	75
URANINITA	13,5	43	13,7	44	14,8	46
GOETHITA	15,6	48	16,2	50	21,7	61
WOLFRAMITA	15,5	50	15,8	50	17,5	54
GANGA	7,2	19	5,4	14	4,3	11

plata,, mientras que en la banda B su nivel es mucho más bajo, 116, comparable a los de cubanita y pirrotina, minerales con los que nunca se confundiría al microscopio. Este comportamiento, aparentemente sorprendente, es en realidad el que corresponde a su intenso color amarillo, frente al pardo a crema de los sulfuros citados.

4.8. Segmentación. Discusión y validación de resultados

La identificación de minerales se logra de forma automática al incluir los rangos de segmentación (para

las tres bandas) en una rutina especialmente diseñada. Aunque es posible el trabajo multiespectral con monocromador^[23], en este caso se ha optado por un análisis multibanda^[24], basado en la información presentada en los gráficos de correlación (Fig. 12), en los que se compara el NG de los minerales con los valores medios en NG encontrados en la etapa de caracterización mediante ADI de los minerales de referencia estudiados. El paso siguiente es clasificar automáticamente (para cada una de las bandas: R, G y B) todos los pixels que pertenecen a una fase en concreto y generar sendas imágenes binarias (valor 1, a los pixels que representan fase a identificar; valor 0, para los pixels diferentes). Estas tres imágenes

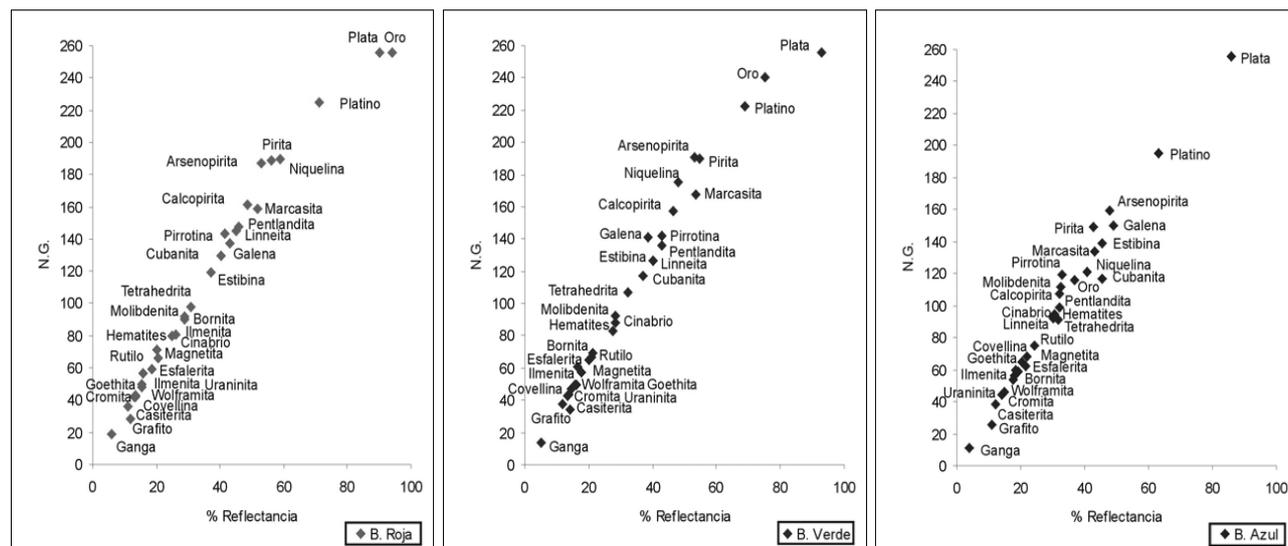


Figura 12. Gráfico de comparación de NG Vs. % Reflectancia. Bandas R, G y B.

Figure 12. Plot of relation between Gray level and Reflectance values (%) of RGB channels.

binarias posteriormente se interceptarán, generando una imagen binaria final que representa la fase de interés.

La correcta segmentación de fases minerales presentes en imágenes digitales es el aspecto a evaluar como parte del proceso de validación del trabajo desarrollado. La validación ha de verificar si los rangos de segmentación definidos, fruto del análisis individualizado de las fases minerales estudiadas, tienen posibilidad de ser aplicados con éxito sobre imágenes digitales de minerales, independientemente de su procedencia^[25].

La observación directa de los resultados de segmentación sobre la imagen digital por parte del microscopista, comparando con la imagen real, es la forma más inmediata de verificar si la segmentación es correcta o no. Además de la observación directa, es posible extraer de las curvas de distribución de NG de las imágenes estudiadas los parámetros estadísticos (rangos de NG, valores medios, etc.) de las fases presentes en las imágenes. Estos valores serán comparados con los obtenidos del análisis individualizado de los minerales de referencia y así se valorará su semejanza o no^[26]. Otro criterio para evaluar el resultado de la segmentación es el de determinar la relación entre el área total de las imágenes estudiadas y la suma de las áreas segmentadas. El proceso se ha contrastado mediante continuos ensayos (segmentación de varias fases minerales en imágenes digitales), como el que se presenta a continuación, en los que se han aplicado los criterios descritos anteriormente para validar los rangos de segmentación definidos en el proceso experimental.

4.8.1. Ensayo de validación

Las imágenes digitales sobre las que se trabaja proceden de muestras diferentes a las utilizadas como referencia y, en este caso, se trata de muestras pertenecientes a colecciones del Instituto Geológico y Minero de España (indicio de sulfuros polimetálicos de Pb-Zn en Extremadura). Las fases minerales presentes en la probeta como componentes principales son: cuarzo, arsenopirita, wolframita y esfalerita; como componentes accesorios: galena, pirita, calcopirita, pirrotina, marcasita, bournonita y carbonato. Las fases minerales presentes en las imágenes y a segmentar son: arsenopirita, calcopirita, esfalerita, galena, ganga (cuarzo y carbonato), pirrotina y wolframita.

4.8.2. Condiciones de muestreo

Para este estudio, la adquisición de las imágenes, se ha realizado siguiendo, también, un muestreo secuencial, limitado a 24 imágenes y con un objetivo de 20 X. La localización de las zonas a muestrear ha sido decidida por el operador, intentando que aparezca en las imágenes (mosaicos) el mayor número posible de las fases minerales presentes en la probeta. Esto, no se debe hacer si lo que se pretende es extraer información representativa de la probeta, desde un punto de vista de la cuantificación mineralógica (por ejemplo, análisis modal y ponderal de las fases minerales). Pero, en este caso, el objetivo es poner a prueba el método, en las condiciones más exigentes, es decir, ante la presencia simultánea de la mayor

cantidad de fases minerales diferentes. Adquiridas y tratadas las imágenes (Fig. 13), se ha procedido a aplicar los rangos de segmentación, a fin de identificar las siete fases minerales presentes. La rutina diseñada asignará a cada fase mineral segmentada una máscara identificativa (mosaico segmentado). Los resultados cuantitativos (curvas de frecuencia y diagramas de pastel) de la secuencia desarrollada se sintetizan en la figura 13.

4.8.3. Interpretación de resultados

La observación del mosaico segmentado (Fig. 13) evidencia que la segmentación de las siete fases minerales presentes en las 24 imágenes, en términos generales, se ajusta a la realidad. En detalle, es posible apreciar los siguientes aspectos:

- Las zonas con rayas de pulido en la esfalerita y galena, han sido identificadas como tales, a pesar de estos defectos.

- Los granos más pequeños de arsenopirita incluidos dentro de la wolframita, sí aparecen en la segmentación.
- Los bordes de los granos de arsenopirita no siempre se segmentan correctamente debido a que los pixels disminuyen sus valores de NG al acercarse a fases menos reflectantes (ganga).

Los rangos de NG de las fases presentes en las imágenes caracterizadas (histogramas de la figura 13) se encuentran totalmente comprendidos dentro de los rangos utilizados como referencia en este trabajo. Otro aspecto a destacar de la observación de estas curvas es el solapamiento de los NG de wolframita y esfalerita en las bandas roja y azul. Esta circunstancia no ha dificultado el proceso de segmentación de estas dos fases minerales. El área de las fases minerales segmentadas resulta ligeramente inferior al área total de las imágenes estudiadas (área segmentada = 98,09 % área total).

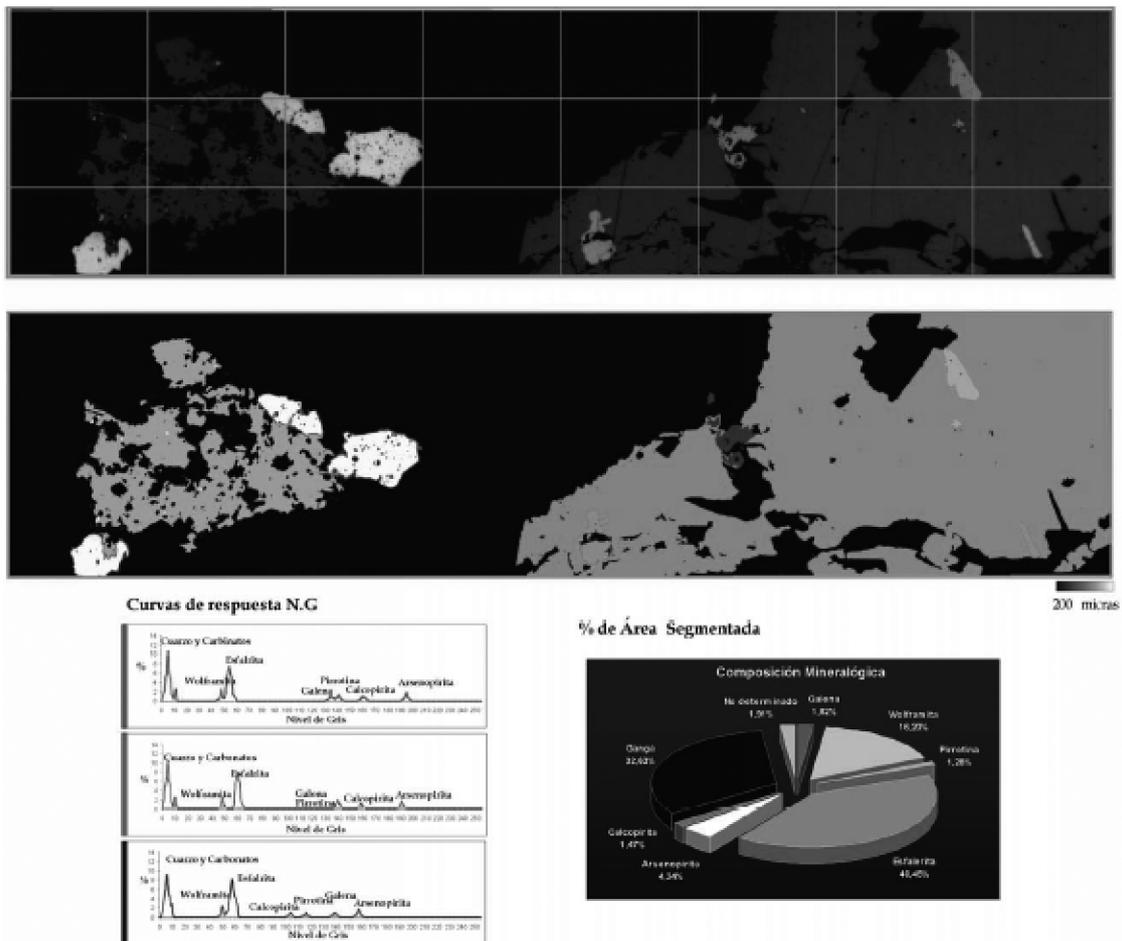


Figura 13. Mosaico con 24 imágenes y resultados de la segmentación.

Figure 13. Image mosaic (24 images) and segmentation results.

5. CONCLUSIONES

La metodología presentada da respuesta a la necesidad de un proceso eficaz y de aplicación general, para el reconocimiento y cuantificación automatizados, por ADI, de las menas metálicas de interés industrial. Y muestra su viabilidad. El sistema desarrollado se basa en rutinas automatizadas que combinan medidas multibanda sobre secciones pulidas de las menas, a través de cámara vídeo 3CCD sobre microscopio óptico de reflexión, con criterios de tipo mineralógico o metalogenético.

La validez de la metodología planteada queda avallada, en primer lugar, por la reproducibilidad de los datos de segmentación. Es decir, la capacidad de obtener iguales valores de NG (rangos de segmentación) de una fase mineral, independientemente de cuándo y dónde haya sido tomada la imagen en color (R, G y B) correspondiente. La verificación del proceso de medida mediante cámara de vídeo 3 CCD se ha llevado a cabo utilizando valores de referencia de la reflectancia de los minerales objeto de estudio, internacionalmente acreditados.

Un proceso riguroso de adquisición de imágenes es un eslabón crítico para todo el sistema. Implica la investigación y control de todos aquellos factores, físicos o electrónicos (porosidad, calidad del pulido, derivas, estabilidad, intensidad y calidad de la fuente luminosa, etc.), que de una u otra forma pueden producir variaciones en la respuesta NG de una misma escena. Se desprenden unos requisitos, sintetizados en el apartado de proceso experimental, imperativos para la puesta a punto del sistema automatizado.

Una ventaja adicional de la metodología propuesta es que la digitalización de los datos, una vez garantizada su reproductibilidad, permite una gran versatilidad, ya que puede archivar la información para nuevas aplicaciones y tratamientos matemáticos no previstos inicialmente. De esta manera, se podrá atender al re-planteamiento continuo de diversos procesos, por ejemplo, mineralúrgicos, y a la investigación de variadas soluciones alternativas, sin necesidad de una nueva adquisición de datos (una de las fases más delicadas y exigentes del proceso), simplemente procesando la información de partida con arreglo a los nuevos criterios, para obtener las funciones o parámetros correspondientes (área, perímetro, tamaños de grano, superficie específica, grado de liberación de cada fase mineral, etc.), mediante la aplicación de los algoritmos oportunos.

Es necesario el examen previo (cualitativo) de las muestras por un experto microscopista, para sentar los criterios de aplicación del método y formular en

los términos adecuados los problemas a investigar (de análisis modal, granulométricos, morfológicos, texturales, etc.), según los planteamientos (mineralúrgicos, mineralógicos, ambientales, etc.) que interesen en cada caso. Es este experto el que decide la eventual introducción de posibles criterios identificativos de tipo mineralógico o metalogenético (paragénesis y asociaciones minerales) necesarios en aquellos casos en que puedan coexistir minerales con valores de reflectancia equivalentes.

Agradecimientos

El trabajo experimental, desarrollado en el contexto de la tesis doctoral de E. R. Berrezueta Alvarado, se realizó en el Laboratorio de Microscopía Aplicada de la Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Minas (ETSIM) de la Universidad Politécnica de Madrid (UPM). La instrumentación fue cofinanciada con ayuda de los proyectos GR-92-0135, UE95-007 y UE98-0027 del Ministerio de Educación y Ciencia. Se agradece al Prof. G..C. Amstutz (†) el acceso a la Colección Rehwald, utilizada como referencia; a J. Locutura (IGME) y al Dr. H. J. Bernhardt (Ruhruniversität, Bochum, Alemania), la cesión y calibrado de patrones de blanco; al Prof. E. Pirard (Univ. Lieja, Bélgica), la discusión de diversos aspectos relacionados con el ADI.

REFERENCIAS

- [1] R. CASTROVIEJO, E. CHACON, C. MÚZQUIZ Y S. TARQUINI, *Int. Symp. Imaging Applications in Geology. Vol I*, Lieja, Bélgica, Geovision., 1999, pp. 37-40.
- [2] E. COZ, R. CASTROVIEJO, D. BONILLA, F. GARCÍA-FRUTOS, *Fuel Sci. Direc.* (2003), 45-55.
- [3] E. BERREZUETA, R. CASTROVIEJO, F. ORTIZ, M.J. DOMÍNGUEZ Y J.M. RAMOS, *XXV Reunión SEM. Vol I*, Alicante, España, Macla, 2005, pp. 47-50.
- [4] R. LASTRA, J.M.D. WILSON Y L.J. CABRI, *Trans. Inst. Min. Metall. (Sect. C: Mineral Process. Extr. Metall.)*, Canada, 1999, pp. 75-84.
- [5] R. CASTROVIEJO, E. BERREZUETA Y R. LASTRA. *Miner. Metall. Process. J.* 19 (2002.)102-109.
- [6] E. BERREZUETA. Tesis Doctoral, Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Minas, Universidad Politécnica de Madrid, 2004.
- [7] W. PETRUK, *Applied Mineralogy in the Mining Industry*, First Edition, ELSEIVER. Ottawa, Canada, 2000, pp. 268.

- [8] A.J. CRIDDLE, *Ore microscopy and photometry*, L. Cabri & D.J. Vaughan (Eds.), Modern Approaches to Ore and Environmental Mineralogy, MAC Short Course v. 27, Ottawa, Canada, 1998, pp. 1-74.
- [9] S.H.U BOWIE Y P.R. SIMPSON, *The Bowie-Simpson System for the Microscopic Determination of Ore Minerals*. First Students Issue. Appl. Mineralogy Group of the Mineralogical Society, McCrone Research Associates, London, UK, 1980, pp. 10.
- [10] R. CASTROVIEJO, A. LÓPEZ, C. MÚZQUIZ Y E. PIRARD, *Int. Symp. Imaging Applications in Geology. Vol I*, Lieja, Bélgica, Geovision, 1999, pp. 41-44.
- [11] P. RAMDOHR, *Die Erzminerale und ihre Verwachsungen*. 4te. Aufl., Akademie Verlag, Berlin, 1975, pp. 1.277.
- [12] P. RAMDOHR, *The ore minerals and their intergrowths*, 2nd Ed., Pergamon, Oxford, UK, 2 vols., 1980, pp. 1.205.
- [13] E. BERREZUETA. Tesis Master, Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Minas, Universidad Politécnica de Madrid, 2000.
- [14] J.C. RUSS, *Computer-Assisted Microscopy. The measurement and analysis of images*, Plenum Press, New York, 1990, pp 450.
- [15] E. PIRARD, V. LEBRUN Y J.F NIVART. *Eur. Microscopy Anal.* 60 (1999) 9-12.
- [16] E. PIRARD. Short Course COM-IMA. *Int. Mineralogical Association-Commission on Ore Mineralogy*, IMA-COM (Ed), Porto, Portugal, 1999, pp. 1-15.
- [17] E. PIRARD, *Sem. Int. de Minería, Metalurgia y Medioambiente*, Escuela Politécnica Nacional y Universidad Católica de Lovaina (Eds.), Quito, Ecuador, 2003, pp. 85-97.
- [18] C. MÚZQUIZ, Proyecto Fin de Carrera, Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Minas de Madrid, Universidad Politécnica de Madrid, 1997.
- [19] P. PICOT Y Z. JOHAN, *Atlas des minéraux métalliques*, Bureau des Reserches Geologiques et Minères, BRGM, ELSEVIER, Paris, Francia, 1977, pp. 408.
- [20] A.J. CRIDDLE Y C. STANLEY, *Quantitative data file for ore minerals*, Third Edition, Chapman & Hall Brithish Museum, London, 1993, pp. 635.
- [21] Y. CHANG Y J.F. REID, *IEEE J.* 5 (1996) 1.414-1.422.
- [22] E. BERREZUETA Y R. CASTROVIEJO. XI Cong. *Int. Industria, Minería y Metalurgia. Vol I*, Zaragoza, España, 2002, pp. 74-77.
- [23] E. PIRARD, *Mineral. Mag.* 447 (2004) 323-334.
- [24] A. MARTÍNEZ-NISTAL, Tesis Doctoral, Facultad de Geología, Universidad de Oviedo, 1993.
- [25] R. CASTROVIEJO Y E. BERREZUETA, *Reconocimiento automatizado de menas metálicas mediante análisis digital de imagen: un apoyo al proceso mineralúrgico. II: Criterios metalogenéticos discriminantes* (en prep.).
- [26] M. TEJERA, A. MAVILIO, M. FERNÁNDEZ, G. MUÑIZ, Y R. VARELA, *Rev. Metal. Madrid* 41 (2005) 169-174.