

## Microscopía de reflectancia multispectral: Aplicación al reconocimiento automatizado de menas metálicas

Juan Carlos Catalina<sup>a,✉</sup>, Ricardo Castroviejo<sup>b</sup>

<sup>a</sup>Laboratorio de Microscopía Aplicada y Análisis de Imagen, ETSI Minas y Energía (UPM), C/ de Ríos Rosas 21, 28003 Madrid, España

<sup>b</sup> ETSI Minas y Energía (Universidad Politécnica de Madrid, UPM), C/ de Ríos Rosas 21, 28003 Madrid, España  
✉ Autor para la correspondencia: [jc.catalina@upm.es](mailto:jc.catalina@upm.es)

Enviado: 29 Julio 2016; Aceptado: 30 Mayo 2017; Publicado on-Line: 27 Noviembre 2017

**RESUMEN:** El artículo presenta el sistema CAMEVA, un sistema de microscopía de reflectancia multispectral especialmente concebido para facilitar la identificación y caracterización de las fases minerales presentes en preparaciones pulidas de menas metálicas, así como para automatizar la realización de distintos tipos de análisis cuantitativos sobre ellas. El sistema CAMEVA permite obtener resultados similares a los de un sistema MEB (microscopía electrónica de barrido), superando algunas de sus limitaciones, como sus rígidas y costosas exigencias de infraestructura y especialización o la dificultad de distinguir especies polimorfas, pero a un coste notablemente inferior. Los ensayos realizados muestran que el sistema permite la identificación automatizada y fiable de las menas de interés industrial, a partir de la información multispectral en el rango VNIR (visible e infrarrojo cercano, entre 400 y 1000 nm) recogida en una base de datos específica; esta base de datos, que incluye los 70 minerales de mayor interés, es fácilmente ampliable.

**PALABRAS CLAVE:** Análisis de imagen; Geometalurgia; Menas metálicas; Microscopía óptica; Reflectancia multispectral

**Citar como/Citation:** Catalina, J.C.; Castroviejo, R. (2017) "Microscopía de reflectancia multispectral: Aplicación al reconocimiento automatizado de menas metálicas". *Rev. Metal.* 53(4): e107. <http://dx.doi.org/10.3989/revmetalm.107>

**ABSTRACT:** *Multispectral reflectance microscopy: Application to automated recognition of metallic ores.* The paper introduces the CAMEVA system, a multispectral reflectance microscopy system specially conceived to facilitate the identification and characterization of the mineral phases present in a polished block of metallic ores, as well as to automate the realization of different types of quantitative analyses on them. The CAMEVA system provides results similar to those of a SEM (scanning electron microscopy) system, surpassing some of its limitations, such as its rigid and costly infrastructure requirements and specialization or the difficulty of distinguishing polymorph species, but at a significantly lower cost. The tests carried out show that the system allows for automated and reliable identification of the ores of industrial interest from the multispectral information in the VNIR range (visible and near infrared, between 400 and 1000 nm) gathered in a specific database. This database, which includes 70 minerals of interest, is easily expandable.

**KEYWORDS:** Geometallurgy; Image analysis; Metallic ores; Multispectral reflectance; Optical microscopy

**ORCID ID:** Juan Carlos Catalina (<http://orcid.org/0000-0002-6071-633X>); Ricardo Castroviejo (<http://orcid.org/0000-0003-2371-309X>)

**Copyright:** © 2017 CSIC. Este es un artículo de acceso abierto distribuido bajo los términos de la licencia Creative Commons Attribution (CC BY) España 3.0.

## 1. INTRODUCCIÓN

El presente artículo presenta las características y capacidades de un sistema de microscopía de reflectancia multiespectral especialmente concebido para facilitar la identificación y caracterización de las fases minerales presentes en preparaciones pulidas de menas metálicas y automatizar la realización de distintos tipos de análisis cuantitativos sobre ellas.

Los beneficios que un sistema de estas características proporciona no se limitan al control y mejora de la eficiencia de los procesos mineralúrgicos, con la consiguiente optimización de la recuperación y del consumo de energía y reactivos, sino que también puede constituir una herramienta muy eficaz para la investigación mineralógica y para la reducción de la contaminación del medio natural por efluentes y residuos mineros. Hoy en día, estas aplicaciones se han vuelto tan indispensables que ya no se concibe un proceso mineralúrgico sin caracterización mineralógica, que queda integrada en el nuevo concepto de Geometalurgia.

## 2. ANTECEDENTES

Un microscopio óptico de reflexión es un instrumento específicamente diseñado para la observación microscópica de materiales ópticamente absorbentes u opacos. Para solventar la opacidad del material observado, que impide su observación con luz transmitida, se emplea luz incidente -sistema también denominado epi-iluminación.

El diseño básico del microscopio de reflexión no ha experimentado cambios significativos desde hace más de 30 años. En un microscopio de reflexión convencional (ver Fig. 1), la luz procedente del iluminador, tras pasar por los diafragmas de apertura y de campo, se refleja en un espejo semitransparente inclinado a 45° que la dirige a través del objetivo para incidir perpendicularmente sobre la superficie observada. La luz reflejada por ésta es recogida por el objetivo, atraviesa el espejo semitransparente, y continúa por el tubo óptico del microscopio hasta el ocular y/o hasta una cámara. La observación puede efectuarse con luz sin polarizar o polarizada. En este último caso, suele emplearse una platina rotativa y puede intercalarse un segundo polarizador (llamado analizador) en el tubo óptico para definir ciertas propiedades ópticas. Para evitar que las diferencias de acabado superficial influyan en la observación, las muestras se embuten en resina y la preparación resultante se pule cuidadosamente.

Tradicionalmente, la identificación de minerales opacos al microscopio de reflexión se ha basado en la observación de características visuales tales como el color, el pleocroísmo, la anisotropía, la reflectancia especular, la birreflectancia, las reflexiones internas, la forma de los granos, su estructura y textura, etc. La mayoría de estas propiedades son

cuantitativas y su determinación requiere la intervención de un observador con cierta experiencia, por lo que los procedimientos de identificación tradicionales tienen una fuerte componente subjetiva y resultan difícilmente automatizables.

Bowie y Taylor (1958) propusieron el primer método de identificación totalmente cuantitativo, basado únicamente en dos propiedades: la reflectancia especular ( $R$ ) y la microdureza (VHN, Vickers Hardness Number). Prepararon un diagrama en el que cada mineral se representaba mediante un punto, cuya posición venía dada por la reflectancia media en luz blanca y la microdureza media. Sin embargo, la utilidad de dicho diagrama para la identificación objetiva de menas era muy limitada, puesto que los valores de reflectancia y microdureza que muestran muchos minerales dependen de la orientación de la sección y de la composición. Por ello Gray y Millman (1962) propusieron un diagrama mejorado, en el que cada mineral se representaba mediante una línea que recorría el rango de valores de reflectancia que podía mostrar, y más adelante McLeod y Chamberlain (1969) propusieron otro más completo en el que cada mineral se representaba por dos líneas ortogonales: la vertical indicaba el rango de valores de reflectancia y la horizontal el rango de valores de microdureza.

Pero ni siquiera estos diagramas mejorados resultaron suficientemente resolutivos, porque muchos minerales presentan considerables solapamientos en los rangos de reflectancia medida con luz blanca, y la medida de la microdureza era difícilmente automatizable. Por este motivo se decidió utilizar otra propiedad cuantitativa de los minerales que puede llegar a ser muy distintiva: la variación de la reflectancia especular con la longitud de onda de la luz, que se caracteriza efectuando medidas multiespectrales (es decir, a varias longitudes de onda) o incluso espectrales (obteniendo un espectro continuo de reflectancia).

La IMA/COM (Commission on Ore Microscopy of the International Mineralogical Association), constituida en 1962 por un grupo internacional de científicos y diseñadores de instrumentos, consideró que las propiedades anteriores eran las más prometedoras para conseguir la identificación objetiva de menas, y en su reunión de 1964 adoptó como objetivos la preparación de una serie de patrones de reflectancia calibrados en el National Physical Laboratory del Reino Unido para su uso por todos los miembros y la compilación de una tabla de datos cuantitativos de minerales que incluyera al menos la microdureza Vickers y la reflectancia especular ( $R$ ,  $R_o$ ,  $R_e$ ,  $R_c$ ,  $R_1$ ,  $R_2$ ,  $R_a$ ,  $R_b$ ,  $R_c$  ... según el tipo de simetría del mineral) medida a cuatro longitudes de onda: 470 nm (azul), 546 nm (verde), 589 nm (amarillo) y 650 nm (rojo).

A raíz de la decisión de la COM, a mediados de los años 60 los principales fabricantes de

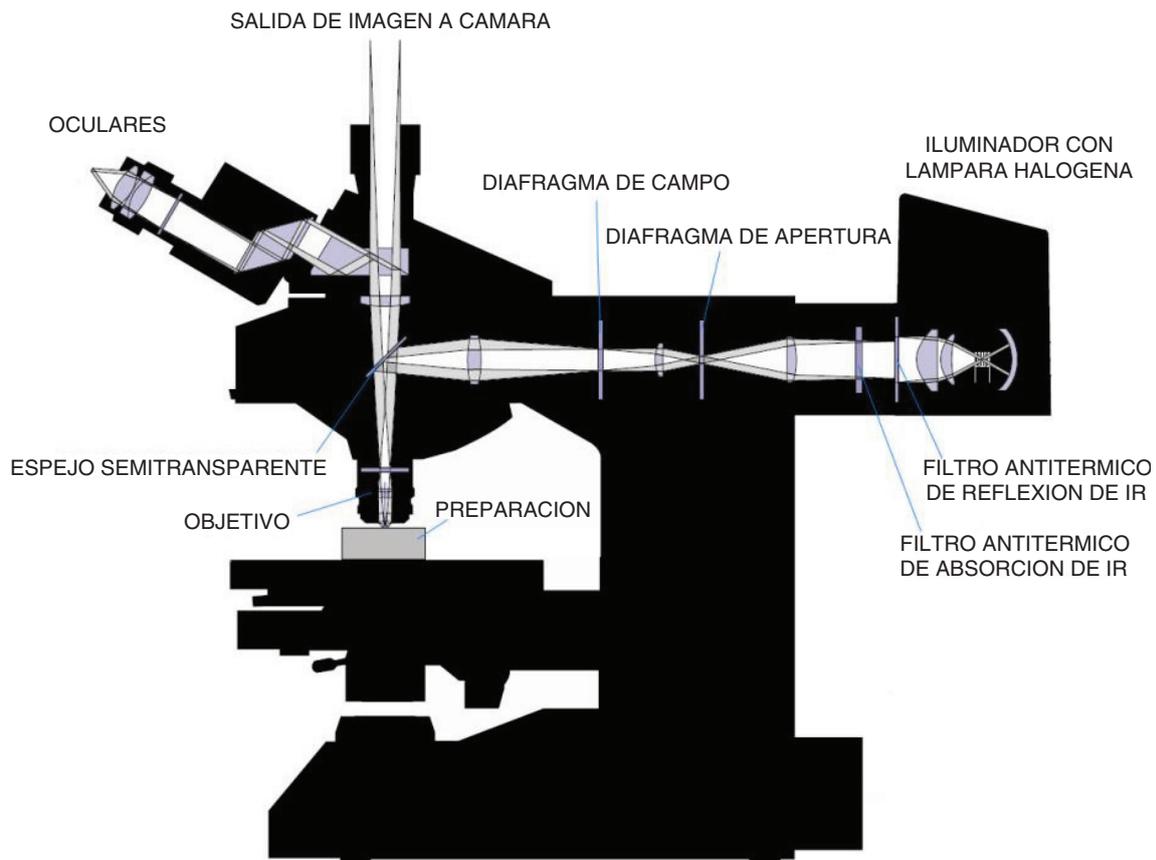


FIGURA 1. Esquema de un microscopio de reflexión convencional.

microscopios comenzaron a ofrecer sofisticados microfotómetros (Leitz MPV, Zeiss MPM) dotados de tubos fotomultiplicadores muy sensibles capaces de realizar medidas precisas en una pequeña región de unos pocos  $\mu\text{m}$  de diámetro a través de filtros de interferencia de banda de paso muy estrecha, lo que facilitó tanto la adquisición de datos de reflectancia para las tablas como la aplicación de métodos cuantitativos para la identificación de menas a partir de medidas de reflectancia o color.

En 1970 la COM publicó una tabla provisional de datos cuantitativos editada por el Departamento de Cristalografía y Mineralogía de la Universidad de Barcelona (Font-Altava, 1970) que recogía los rangos de microdureza Vickers y de reflectancia especular en aire en las cuatro longitudes de onda COM para poco más de cien minerales.

La primera edición del Quantitative Data File (QDF) de la COM (Henry, 1977) representó un avance considerable sobre la versión provisional de 1970 al aportar datos de composición y de rayos X, así como valores de color cuantitativo y de reflectancia espectral en la banda visible (16 medidas entre 400 nm y 700 nm, a intervalos de 20 nm, en aire y en aceite), aunque únicamente para una parte de los minerales. Una compilación de medidas de

reflectancia espectral más completa fue recogida por Picot y Johan (1977) y Picot y Johan (1982) en su Atlas of Ore Minerals, que aporta medidas originales de reflectancia entre 420 nm y 700 nm (también a intervalos de 20 nm) para todos los minerales, además de novedades importantes como información sobre asociaciones minerales frecuentes y sus localizaciones, y láminas en color.

La segunda edición del Quantitative Data File (QDF2) de la COM (Criddle y Stanley, 1986) contenía ya 420 fichas (327 correspondientes a especies minerales individuales y 93 a diversas variantes composicionales y estructurales), aunque no todas estaban completas debido a que el pequeño tamaño de los granos de algunos minerales impedía realizar ciertas medidas.

Finalmente, la tercera y última edición del Quantitative Data File (QDF3) de la COM (Criddle y Stanley 1993) contiene 635 fichas, prácticamente todas completas, de las que 510 corresponden a especies minerales y 125 a variantes composicionales y estructurales. Como novedad, cada ficha incluye una representación gráfica de los valores de reflectancia multispectral, que permite hacerse una idea de la forma de los espectros de reflectancia del mineral para las distintas orientaciones cristalográficas.

En los años 80 comenzaron a aparecer diversos métodos de identificación automática basados en el uso de ordenadores personales que comparaban los valores de reflectancia medidos en un punto del campo microscópico con los datos de las distintas ediciones del Quantitative Data File. Gerlitz *et al.* (1989) publican un programa informático para PC basado en una versión digital de la base de datos QDF2 de IMA/COM. Bernhardt (1987) desarrolla un sistema para identificación automatizada basado precisamente en medidas espectrales puntuales en las 16 bandas (entre 400 y 700 nm, con 20 nm de separación) del QDF2.

### 3. ESTADO DEL ARTE

En síntesis, a pesar de los numerosos intentos realizados para automatizar la identificación de fases minerales mediante el uso de propiedades ópticas cuantitativas, el proceso no pudo ser culminado con éxito. La razón estriba en que en numerosas ocasiones resulta difícil identificar una fase mediante la simple medida de su reflectancia o de su color, siendo necesaria la intervención del especialista para tener en cuenta criterios adicionales (microdureza Vickers, observación bajo luz polarizada, conocimiento de las asociaciones minerales habituales, etc.) que permitan asegurar la exactitud de la identificación. La dificultad para utilizar dichos criterios adicionales de forma automatizada ha impedido la aplicación sistemática de la microscopía óptica de reflexión al análisis cuantitativo de fases en la industria, restringiendo su utilización a los pocos laboratorios dotados de personal especializado existentes en la actualidad. Dado el coste laboral de dichos especialistas y el tiempo necesario para su realización, los análisis manuales mediante contaje de puntos sólo resultan abordables en estudios aislados, y no es factible su aplicación generalizada en la industria.

En esta situación, resultaba lógico abordar el análisis cuantitativo de fases mediante técnicas de microscopía electrónica y, efectivamente, sobre esta base se pusieron a punto diversos sistemas. En el mercado se encuentran con distintos nombres comerciales (QEMSEM, QEMSCAN, MLA, etc., como acrónimos de Quantitative Evaluation of Mineralogy by Scanning Electron Microscope, Mineral Liberation Analyzer, etc.), pero para los fines de este trabajo se designan colectivamente, en lo que sigue, como sistemas MEB (Microscopía Electrónica de Barrido), basados en información de tipo químico, independientemente de la estrategia analítica específica de cada uno de ellos, para identificar y medir automáticamente las distintas fases presentes en una muestra. No obstante, estas técnicas no han resuelto definitivamente el problema, dado que presentan una serie de limitaciones que impiden su uso generalizado:

- La técnica MEB permite determinar la composición elemental de la muestra en un cierto número de puntos de su superficie, pero esto no es suficiente para discriminar entre fases que, teniendo composiciones similares, presentan estructuras diferentes, cosa relativamente frecuente en ciertas aplicaciones (mineralogía, por ejemplo).
- El coste de los equipos MEB es muy elevado (en principio, del orden del millón de dólares USA, aunque tiende a bajar), y no está al alcance de la mayor parte de las empresas (ni de las instituciones públicas), por lo que el número de unidades en uso en el mundo –poco más de 200- es muy inferior a la potencial demanda y a la magnitud de los problemas a resolver.
- El manejo de estos equipos exige personal altamente capacitado, y un entorno especialmente acondicionado con elevados requisitos de estabilidad ambiental.
- La preparación de las muestras para MEB precisa de un equipamiento y un personal especializado que suponen un considerable coste por análisis.

Por todo ello, las técnicas MEB no son la solución ideal al problema del análisis mineralógico en materiales multifase, salvo para grandes empresas que puedan permitirse invertir grandes cantidades de dinero en laboratorios de última generación, y que puedan recurrir a la realización de análisis microscópicos manuales en caso de duda.

Teniendo en cuenta todo lo anterior, resulta razonable el intento de desarrollar nuevas metodologías de análisis que permitan aplicar la microscopía óptica de reflexión al reconocimiento automatizado de minerales, a pesar de la tendencia actual a ignorarla. La que parece contar con más posibilidades de éxito es el análisis de imagen, ya que proporciona una gran cantidad de información por cada campo que se adquiere, lo que permite caracterizar una preparación procesando un número de campos mucho menor que el número de puntos necesarios con un contador de puntos.

A finales de los 70 se intentó aplicar los primeros sistemas de análisis de imagen, como el QTM720 de Cambridge Instruments, a la identificación de minerales en imágenes obtenidas con una cámara acoplada a un microscopio, pero los resultados no fueron buenos por múltiples motivos (baja sensibilidad y resolución de las cámaras de tubo, alimentación poco estabilizada, ausencia de calibración, opacidad de las aplicaciones, poca información al usuario sobre las limitaciones del sistema, etc.). Hacia 1985 se había abandonado, por su difícil reproducibilidad, el análisis automático de menas metálicas basado en imágenes ópticas (Sutherland y Gottlieb, 1991), aunque la técnica siguió siendo útil en otros campos en los que la segmentación era más fácil (metalografía, medicina, biología, etc.).

Durante los años 90 el análisis de imágenes fue aplicado con éxito en otros tipos de análisis microscópico automatizado, como el análisis petrográfico de carbones de capa (Catalina *et al.*, 1995) o el análisis petrográfico de mezclas de carbones (Catalina *et al.*, 2003), que se realizan con luz reflejada monocromática de 546 nm. Estos sistemas son precedentes casi inmediatos del sistema CAMEVA porque usaban dos patrones de reflectancia (alta y baja) para su calibración, y empleaban una cámara CCD monocroma y una rueda de filtros para adquirir varias imágenes de cada campo (una por cada ángulo de polarización de la iluminación).

Las características básicas de un sistema de adquisición de imágenes microscópicas multispectrales mediante cámara CCD en color RGB fueron analizadas por Pirard *et al.* (1999) y el sistema RGB fue ensayado por Berrezueta y Castroviejo (2007). Pirard (2004) profundiza en las ventajas que presenta el uso de una cámara CCD monocroma y una rueda de filtros de interferencia para la obtención de imágenes multispectrales de menas en el espectro visible. Esta opción, ampliada al espectro infrarrojo cercano, es la elegida para el sistema CAMEVA (Pirard *et al.*, 2008).

#### 4. OBJETIVOS

Teniendo en cuenta estos antecedentes y el estado del arte, los autores abordaron en el marco del proyecto CAMEVA (Caracterización Automatizada de Menas Metálicas por Visión Artificial, financiado por el Ministerio de Educación y Ciencia a través del Plan Nacional de I+D+i) el desarrollo de un innovador sistema, actualmente patentado (Castroviejo *et al.*, 2013), para el reconocimiento automatizado de menas metálicas que permitiera superar las limitaciones que presentaba la microscopía óptica para el análisis cuantitativo de fases, mediante la puesta a punto de unos procedimientos avanzados para la calibración y la operación de un microscopio óptico de reflexión especialmente modificado para adquirir imágenes multispectrales en una porción del espectro más extensa que la banda visible. La información adicional aportada por la reflectancia de la muestra en el infrarrojo cercano (*Near Infrared* o *NIR*, en inglés) y/o en el ultravioleta cercano (*Near Ultraviolet* o *NUV*, en inglés) permite identificar las distintas fases con mayor certeza que únicamente a partir de la reflectancia en la banda visible (*Vis*).

El objetivo final era poner a punto un sistema de adquisición y proceso digital de imágenes que debía reunir las siguientes capacidades:

- Reconocimiento automático de minerales comunes de interés industrial
- Proporcionar medidas cuantitativas aplicables al control de procesos industriales

- Permitir la incorporación de nuevos minerales en la base de datos
- Asistir al microscopista proporcionándole información objetiva sobre la muestra

#### 5. MATERIALES Y MÉTODOS

La metodología seguida para desarrollar el sistema aborda las dos vertientes del problema: por un lado, se integra un equipo que permite adquirir imágenes microscópicas de reflectancia especular en distintas bandas del espectro, y por otro se desarrolla un método operativo para calibrar y manejar dicho equipo, asegurando la obtención de medidas cuantitativas precisas y reproducibles de la reflectancia multispectral sobre la superficie de una sección pulida.

##### 5.1. Equipo

El equipo está constituido por dos elementos principales: el instrumento y la unidad de control y proceso. El instrumento consiste en un microscopio óptico de reflexión dotado al menos de platina y enfoque motorizados, al que se realiza una serie de modificaciones (Fig. 2) con el fin de permitir la adquisición de imágenes multispectrales más allá de la banda visible. La unidad de control y proceso consiste en un ordenador que ejecuta el programa que controla los distintos elementos del instrumento y que aplica el método operativo avanzado para calibración y operación del sistema.

En el proyecto CAMEVA se han construido dos prototipos del equipo, basados en sendos microscopios de los dos principales fabricantes. El del LMAAI (Laboratorio de Microscopía Aplicada y Análisis de Imagen, *redlab 207* de la CM, ubicado en la ETSI Minas y Energía, Universidad Politécnica de Madrid) está basado en un microscopio Leica de gama alta totalmente motorizado, mientras que el de AITEMIN emplea un microscopio Zeiss de gama media que sólo tiene motorizados el enfoque y la platina.

El equipo del LMAAI está integrado por los siguientes elementos:

- El instrumento es un microscopio de luz reflejada modelo Leica DM6000M, con objetivos PL FLUOTAR de 2.5x, 5x, 10x y 20x e iluminador 106 con lámpara halógena de 100W a 12V, al que se le han realizado las siguientes modificaciones:
  - i. Sustitución del filtro antitérmico “*hot mirror*” estándar del iluminador por uno fabricado expresamente para el sistema, que permite el paso de luz con longitudes de onda entre 300 y 1300 nm y refleja el resto, incluyendo el calor, hacia el interior del iluminador (Fig. 3).

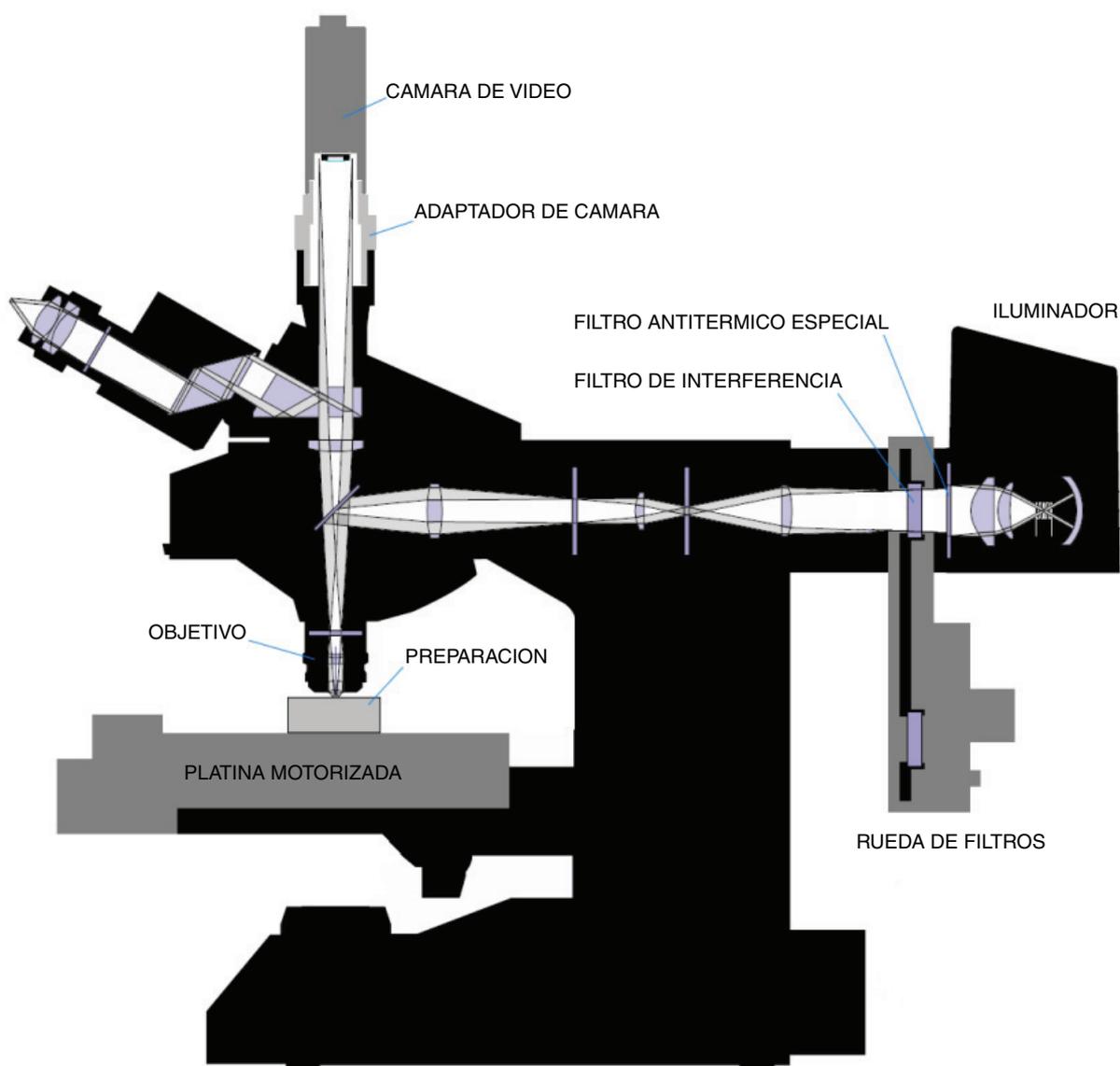


FIGURA 2. Esquema del microscopio modificado para integrar el sistema CAMEVA.

- ii. Retirada del filtro polarizador existente a la entrada del cubo reflector estándar, para trabajar con luz no polarizada.
- iii. Incorporación de un adaptador para cámaras de rosca C, con factor de aumento 1x (sin lentes).
- iv. Incorporación de una cámara de vídeo B&N Basler scA1400-17fm, con sensor CCD de 2/3" SONY ICX-285AL de 1392 x 1040 píxeles, interfaz digital IEEE 1394 (FireWire) y montura de rosca C. Su gran tamaño de píxel (6,45 x 6,45  $\mu\text{m}$ ) proporciona un rango dinámico real de 11,2 bits. La curva de respuesta del sensor (Fig. 4) revela que es especialmente adecuado para adquirir imágenes en el infrarrojo cercano hasta 1000 nm.
- v. Incorporación de una rueda de filtros DTA RPF Max-16, intercalada entre el iluminador y el microscopio, en la que se han montado 13 filtros de interferencia Melles Griot de  $\text{Ø}25$  mm, con longitudes de onda nominales de 400, 450, 500, 550, 600, 650, 700, 750, 800, 850, 900, 950 y 1000 nm, paso de banda de 40 nm y transmitancia mínima del 50% (Fig. 5). También se ha montado una combinación pancromática, compuesta por un filtro KG3 y otro ND, para que el operador pueda observar la muestra por los oculares sin deslumbrarse.
- vi. Incorporación de un tramo de tubo de 60 mm para separar el iluminador de la rueda de filtros, con la que interfería por limitaciones de espacio.

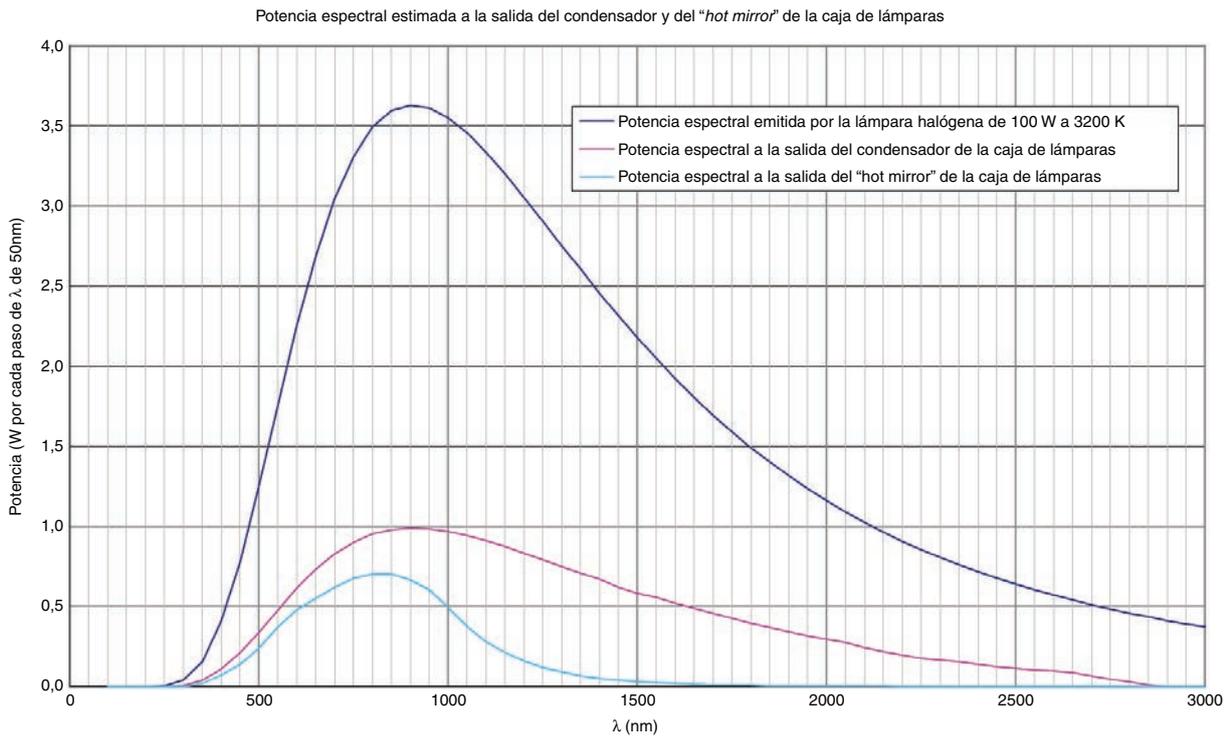


FIGURA 3. Estimación de potencia espectral a la salida del iluminador modificado.

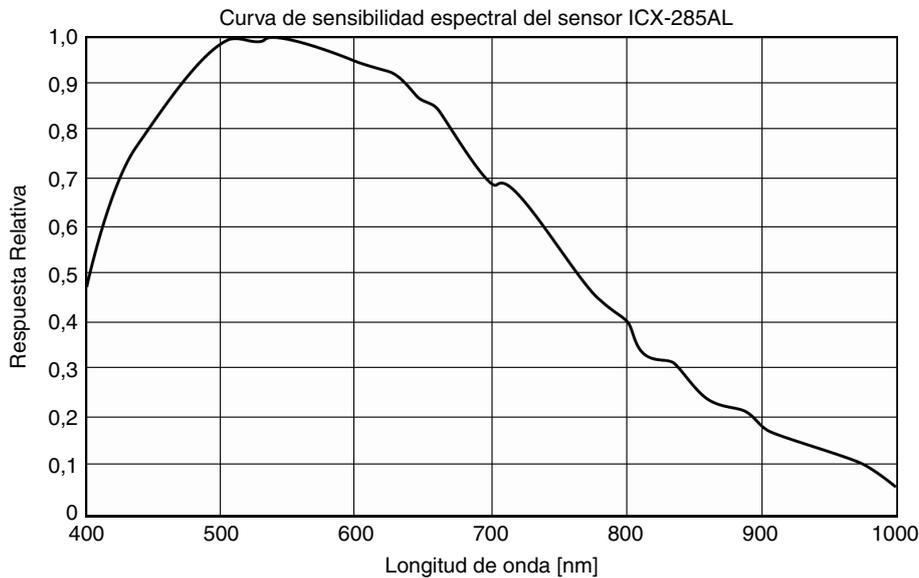


FIGURA 4. Curva de respuesta del sensor CCD monocromo SONY ICX-285AL.

- vii. Sustitución de la platina original por una platina motorizada de precisión Märzhäuser SCANplus con un rango de desplazamiento de 100 x 100 mm, 0,05 μm de resolución y repetibilidad <1 μm. Esta platina se controla desde una tarjeta Tango PCI-S montada en la unidad de control y proceso.
  - Otros elementos auxiliares de gran importancia para el correcto funcionamiento del sistema son:
    - i. Patrones de reflectancia. Para la calibración se emplean dos patrones de reflectancia especular de la firma Ocean Optics, uno de alta reflectancia

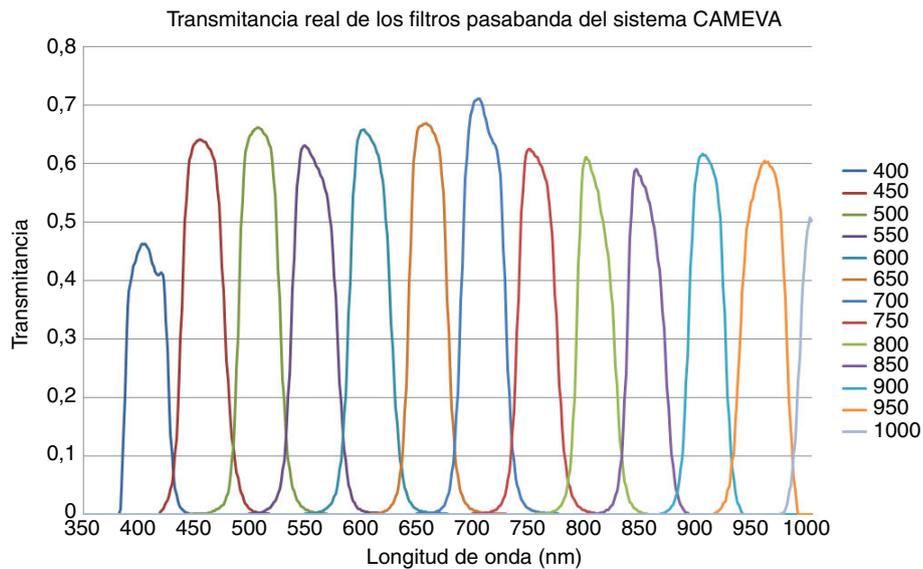


FIGURA 5. Curvas de transmisividad real de los filtros pasabanda empleados.

(referencia STAN-SSH, fabricado en sílice con recubrimiento de aluminio, con  $R \approx 89\%$ ) y otro de baja reflectancia (referencia STAN-SSL, fabricado en vidrio negro, con  $R \approx 4,5\%$ ). Ambos venían con su correspondiente curva de calibración, lo que ha permitido calcular con exactitud la reflectancia promedio en cada una de las bandas.

- ii. Patrón geométrico. Se emplea un divisor de haz del tipo “polka-dot” (referencia NT46-461 de Edmund Optics) que por sus características resulta adecuado para realizar la calibración geométrica del sistema con objetivos de 5x a 20x.

La unidad de control y proceso consiste en un ordenador Dell Precision 390 al que están conectados los elementos del instrumento (microscopio, cámara, rueda de filtros y platina) y que ejecuta una aplicación de software especialmente desarrollada para operar el sistema de acuerdo con el método operativo descrito a continuación. El ordenador dispone de una gran pantalla de 24 pulgadas que permite visualizar con todo detalle las imágenes adquiridas por el sistema.

## 5.2. Método

El método operativo integra diversos procedimientos: cuatro de ellos están concebidos para calibrar el instrumento y optimizar su funcionamiento, mientras que el quinto hace uso de dicha calibración para adquirir y corregir las imágenes, asegurando la calidad, exactitud, repetibilidad y correcto registro de las imágenes de reflectancia multispectral resultantes.

Los procedimientos desarrollados realizan las siguientes operaciones:

### 5.2.1. Determinación del tiempo de exposición óptimo de cada banda

Tanto la potencia luminosa suministrada por el iluminador (Fig. 3) como la sensibilidad de la cámara (Fig. 4) varían considerablemente con la longitud de onda. Si bien el proceso de calibración de la respuesta del instrumento permitiría compensar estas diferencias, la calidad de la imagen final inevitablemente se resiente cuando la imagen de partida es demasiado oscura, por lo que es recomendable partir de un nivel de señal adecuado en todas las bandas. La mejor forma de conseguirlo es fijar un tiempo de exposición diferente para cada banda, aprovechando que la cámara dispone de interfaz digital. Por esta razón se ha desarrollado un procedimiento para establecer el tiempo de exposición óptimo en cada banda mediante un algoritmo de aproximaciones sucesivas que toma imágenes de un patrón de reflectancia conocida. El objetivo final de esta operación es que las imágenes adquiridas por el instrumento aprovechen al máximo el rango dinámico de la cámara sin sufrir saturación, por lo que debe realizarse periódicamente con cada uno de los objetivos utilizados, con el fin de ir compensando el envejecimiento de la lámpara del iluminador.

### 5.2.2. Determinación del plano de enfoque óptimo de cada banda

En un microscopio, el enfoque de la imagen se efectúa mediante el ajuste de la separación entre el objetivo y la muestra, que se controla a través del desplazamiento vertical de la platina (movimiento en el eje Z). La mayoría de los objetivos de microscopio están concebidos para su uso por un

observador humano, por lo que su diseño combina lentes de distintos materiales para conseguir que la luz de los tres colores primarios (rojo, verde y azul) se enfoque aproximadamente en el mismo plano, de forma que las imágenes en color se vean totalmente nítidas desde una misma posición del eje Z. Sin embargo, para longitudes de onda inferiores a 450 nm o superiores a 650 nm la luz se enfoca en planos crecientemente alejados, lo que obliga en la práctica a enfocar independientemente cada banda de la imagen multispectral, para conseguir un enfoque óptimo en todas ellas. Afortunadamente, las distancias entre los planos de enfoque óptimo de las distintas bandas son fijas para cada objetivo, por lo que, una vez enfocada una banda, las demás pueden enfocarse “a ciegas”, simplemente sumando los correspondientes ajustes a la posición del plano de enfoque de esa banda. Para determinar dichos ajustes se ha desarrollado un procedimiento que enfoca automáticamente una preparación que presente buen contraste en todas las bandas, determinando el valor de la coordenada Z del microscopio en el punto de enfoque óptimo de cada una de ellas. Seguidamente, se calculan las diferencias entre el valor de Z en una de las bandas, que será considerada como banda de referencia para el enfoque, y los valores de Z en el resto de las bandas (Fig. 6), y se guardan en un archivo para su uso ulterior. Esta

operación debe realizarse una sola vez con cada uno de los objetivos utilizados.

### 5.2.3. Calibración de la respuesta del instrumento

La calibración de la respuesta del instrumento es una operación esencial para asegurar la exactitud de las medidas de reflectancia y garantizar la reproducibilidad de los resultados, tanto a lo largo del tiempo como entre distintos laboratorios. El procedimiento está basado en la adquisición de imágenes de patrones de reflectancia conocida en cada una de las bandas, con el fin de caracterizar las imperfecciones del instrumento para poder compensarlas posteriormente mediante el procedimiento desarrollado para la adquisición de una imagen multispectral. Para evitar que los defectos superficiales y las partículas de suciedad del patrón puedan falsear la calibración, el procedimiento desarrollado realiza un pequeño barrido en X e Y sobre el patrón y promedia las imágenes de los campos recorridos aplicando un novedoso algoritmo que filtra tanto las zonas excesivamente oscuras como las excesivamente claras para impedir que intervengan en el cálculo. El proceso está diseñado de forma que las imágenes promedio obtenidas tengan una resolución efectiva de 16 bits por píxel. La Fig. 7 muestra una imagen típica del patrón de alta reflectancia con

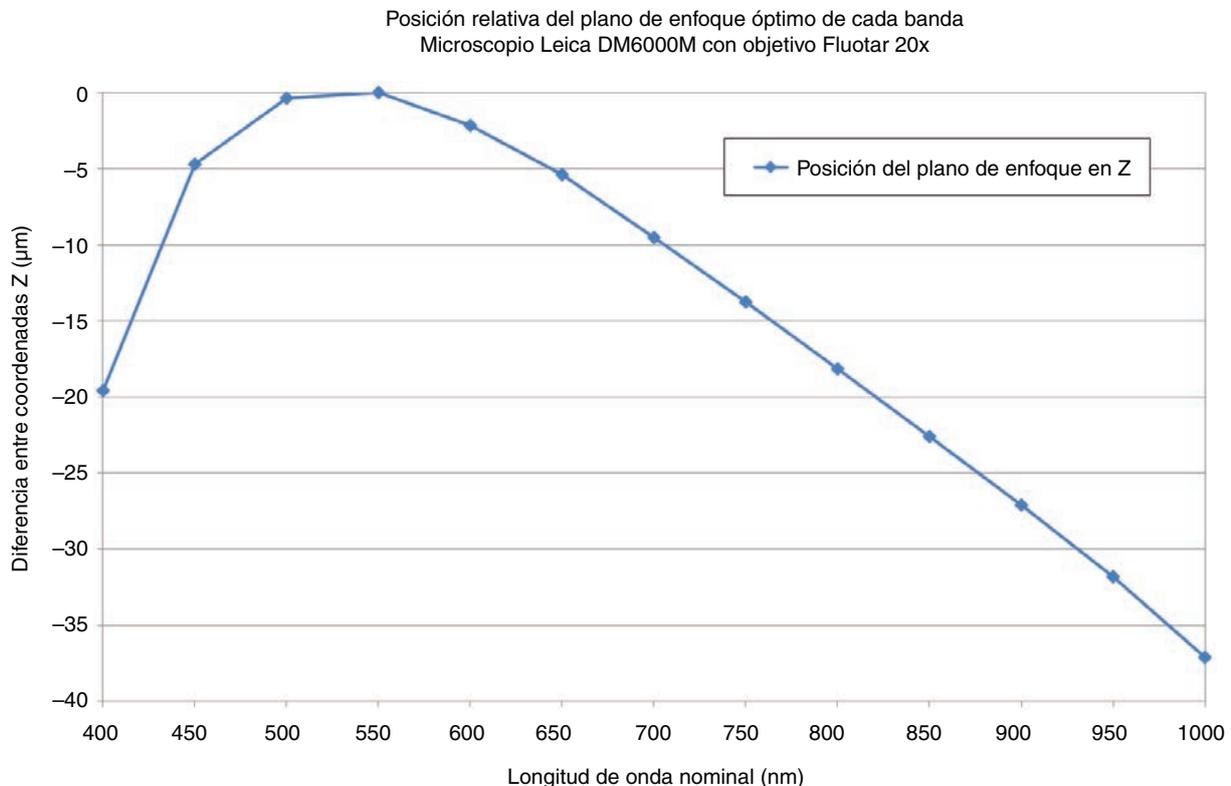


FIGURA 6. Curva que recoge la variación del plano de enfoque óptimo entre las distintas bandas.

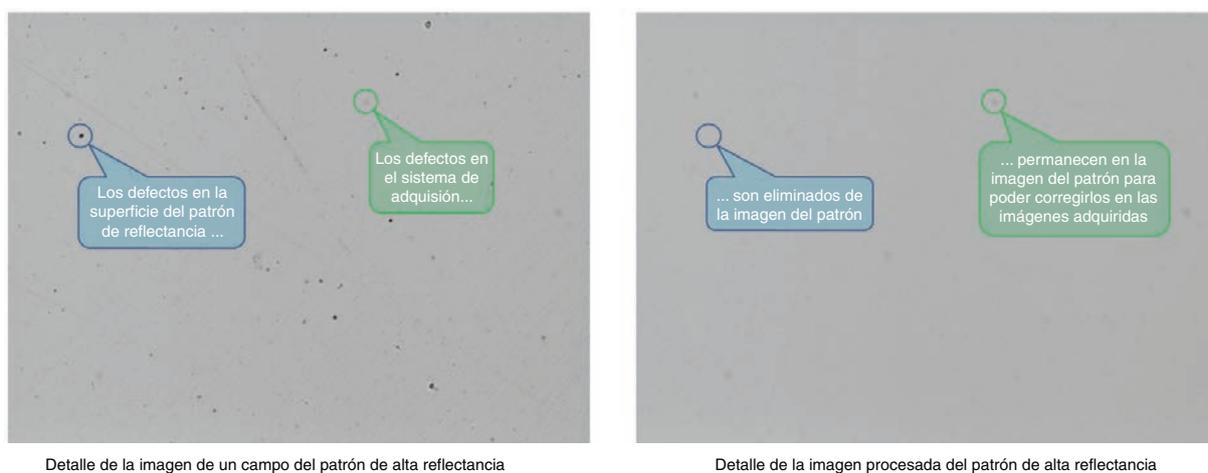


FIGURA 7. Eliminación de defectos del patrón en el proceso de filtrado y promediado.

sus defectos, así como la imagen resultante del proceso de filtrado y promediado en un barrido de 4 x 4 campos sobre dicho patrón.

Para calibrar el instrumento adecuadamente es necesario emplear al menos dos patrones, que idealmente deberían tener reflectancias nominales próximas a los límites superior e inferior de la franja de reflectancias en la que se va a trabajar. Esta operación debe realizarse frecuentemente con cada uno de los objetivos utilizados, con el fin de mantener el instrumento perfectamente calibrado a pesar de la evolución de la intensidad y distribución de la luz en el iluminador.

#### 5.2.4. Calibración geométrica del instrumento

Al analizar el comportamiento real de los objetivos de dos de las principales marcas de microscopios (Leica y Zeiss), se ha comprobado que tanto la posición del centro óptico de la imagen como la escala efectiva de ésta varían con la longitud de onda de la luz (ver Fig. 8 y Fig. 9), lo que hace que las imágenes de las distintas bandas presenten un registro incorrecto. Por este motivo, se ha desarrollado un procedimiento de calibración geométrica del instrumento que determina automáticamente las correcciones que hay que aplicar a cada banda para conseguir un registro perfecto. El procedimiento está basado en el uso de un patrón que contiene una disposición reticular de puntos reflectantes de tamaño y separación conocidos, que debe ser colocado, enfocado y centrado en el campo visual del instrumento por el operador del sistema. Una vez hecho esto, el operador arranca el proceso de calibración propiamente dicho, que localiza los cuatro puntos más próximos a las esquinas de la imagen, y extrae las coordenadas de imagen de sus respectivos centros de gravedad ( $X_{CGi}$ ,  $Y_{CGi}$ ). A partir de ellas se determinan los parámetros finales de la calibración geométrica, que

serán utilizados en el procedimiento para la adquisición de una imagen multiespectral: el centro óptico y la escala efectiva de cada banda. Esta operación debe realizarse una sola vez con cada uno de los objetivos, por lo que el momento ideal para llevarla a cabo es durante la instalación del sistema, o tras el montaje de un objetivo nuevo.

Otro problema de tipo geométrico, aunque completamente diferente, es la existencia de un pequeño error de orientación entre los ejes del sensor de la cámara y los ejes de la platina motorizada, cuyas consecuencias se hacen patentes al componer un mosaico con imágenes adquiridas en el barrido automático de una preparación. Su calibración debe realizarse cada vez que se monte o se altere la posición de la cámara.

#### 5.2.5. Adquisición y corrección de una imagen multiespectral

Se ha desarrollado un procedimiento para obtener imágenes multiespectrales de una preparación microscópica en las que los valores de gris de cada píxel representan exactamente la reflectancia del correspondiente punto de la muestra en las distintas bandas consideradas. El procedimiento consiste en la adquisición de una imagen multiespectral “en bruto” empleando los tiempos de exposición y ajustes de posición de enfoque determinados previamente mediante los procedimientos i y ii, seguida de la aplicación sucesiva de dos correcciones: una corrección de la respuesta del instrumento, basada en las imágenes de los patrones de reflectancia adquiridas según el procedimiento iii, y una corrección geométrica, basada en los parámetros determinados en el procedimiento iv.

La adquisición de la imagen multiespectral “en bruto” se lleva a cabo mediante un proceso en el que se van obteniendo sucesivamente imágenes de 16

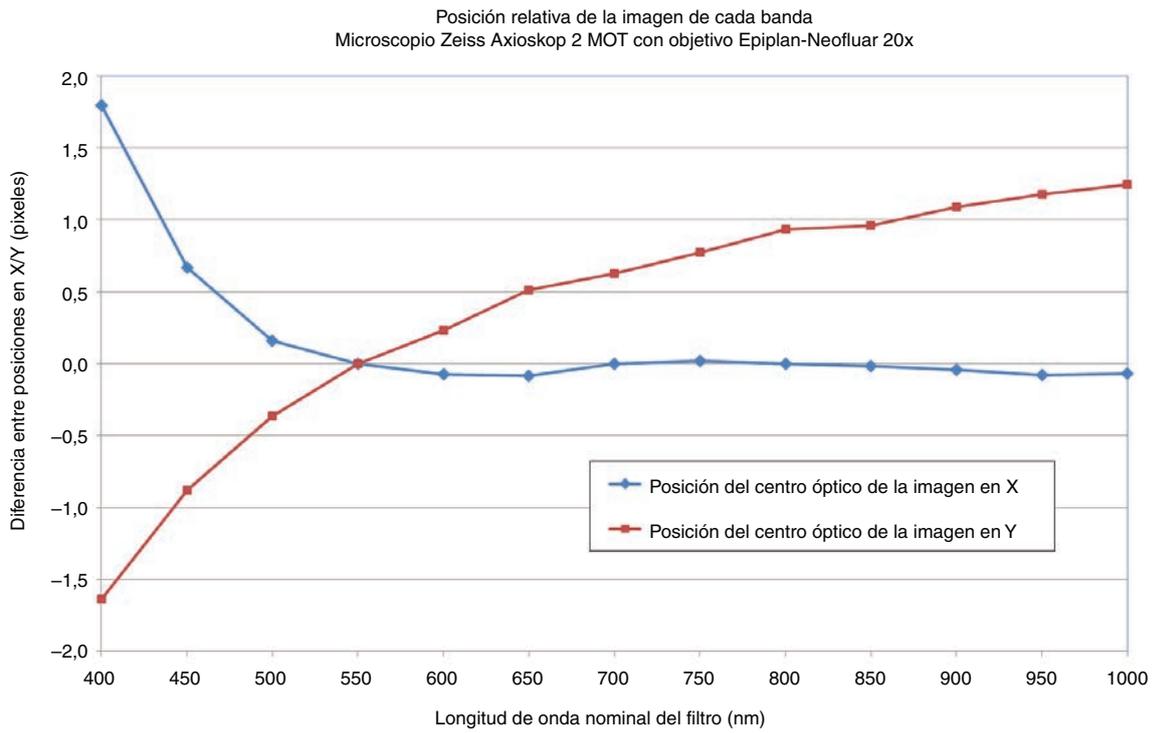


FIGURA 8. Curvas que recogen el desplazamiento del centro óptico entre las distintas bandas.

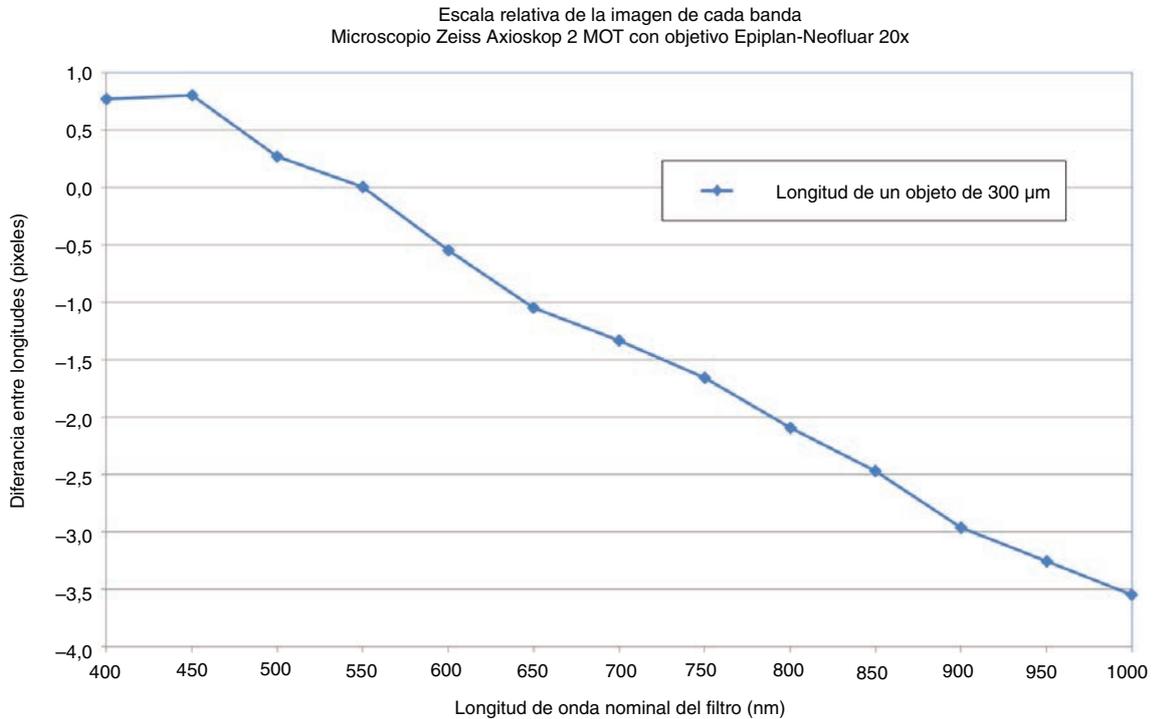


FIGURA 9. Curva que recoge la variación de la escala de la imagen entre las distintas bandas.

bits por píxel de cada una de las bandas consideradas, tras fijar el tiempo de exposición de la cámara, aplicar el ajuste de posición de enfoque y seleccionar el filtro de la rueda que corresponden a cada una de ellas. Dado que la cámara ya proporciona imágenes de 12 bits por píxel, para conseguir imágenes de 16 bits por píxel se puede optar por acumular 16 cuadros consecutivos de la cámara o por acumular menos cuadros y desplazar el acumulador a la izquierda, en función de las necesidades de velocidad de adquisición y precisión del resultado.

A continuación, se efectúa la corrección de la respuesta del instrumento, en la que se determina la reflectancia correspondiente a cada uno de los píxeles mediante la interpolación (o incluso extrapolación) de su nivel de gris entre los niveles de gris que presente dicho píxel en las imágenes de dos patrones, según la fórmula siguiente (1):

$$G_i(j,k) = \frac{1}{f_R} \left( R_{Li} + \frac{F_i(j,k) - P_{Li}(j,k)}{P_{Hi}(j,k) - P_{Li}(j,k)} (R_{Hi} - R_{Li}) \right) \quad (1)$$

Donde:

$G_i(j,k)$  es el nivel de gris del píxel (j,k) de la banda i de la imagen corregida del campo

$f_R$  es el factor de conversión de nivel de gris a reflectancia

$F_i(j,k)$  es el nivel de gris del píxel (j,k) de la banda i de la imagen "en bruto" del campo

$P_{Hi}(j,k)$  es el nivel de gris del píxel (j,k) de la banda i del patrón de alta reflectancia

$P_{Li}(j,k)$  es el nivel de gris del píxel (j,k) de la banda i del patrón de baja reflectancia

$R_{Hi}$  es la reflectancia del patrón de alta reflectancia en la banda i

$R_{Li}$  es la reflectancia del patrón de baja reflectancia en la banda i

Esta fórmula puede reordenarse de forma que sólo sea necesario realizar dos operaciones aritméticas de imagen (una resta y una división) con imágenes constantes que pueden ser calculadas con antelación, lo que acelera sensiblemente el cálculo.

De esta forma, la imagen "en bruto" se transforma eficientemente en una nueva imagen, en la que el nivel de gris de cada píxel representa directamente la reflectancia de la muestra (aplicando el factor de conversión deseado), con lo que se corrigen de forma efectiva la falta de uniformidad de la iluminación del campo microscópico y los posibles defectos del sistema óptico en las distintas bandas espectrales. La imagen corregida mantiene la resolución original de 16 bits por píxel, pero puede truncarse a 8 bits para reducir el espacio ocupado en disco, si no se requiere una alta resolución en la medida de reflectancia.

Finalmente se aplica a esta imagen una corrección geométrica derivada de la calibración geométrica del instrumento que se realizó tras la instalación

del sistema. Esta corrección consiste básicamente en la aplicación sucesiva de un desplazamiento, un escalado y otro desplazamiento a cada banda de la imagen, de forma que todas ellas pasen a tener el mismo centro que la banda seleccionada como referencia y la escala física prefijada para la imagen final (especificada en  $\mu\text{m}/\text{píxel}$ ). Además, se corrige el error de orientación entre los ejes de la cámara y los ejes de la platina mediante la rotación de la imagen un ángulo igual y de sentido opuesto al medido en la calibración. Todas estas transformaciones pueden ser realizadas en un único paso mediante una operación de proceso digital de imagen denominada "warping".

La aplicación de este novedoso procedimiento permite obtener imágenes microscópicas multiespectrales de alta calidad expresadas en unidades de reflectancia absoluta, con un perfecto registro de las distintas bandas, que además presentan una escala geométrica prefijada y cuyos ejes son paralelos a los ejes de la platina, por lo que resulta muy fácil referenciar puntos y construir mosaicos a partir de ellas. Estas imágenes podrán ser luego utilizadas para identificar la fase correspondiente a cada píxel, y establecer la composición, distribución, granulometría, etc. de las distintas fases.

Las imágenes obtenidas pueden ser también convertidas a coordenadas de color, con el fin de reproducir el color real de cada fase observada al microscopio para aplicaciones de documentación fotomicrográfica, evitando las desviaciones ligadas a la subjetividad del observador o a variaciones instrumentales introducidas por las cámaras en color convencionales. Por ejemplo, combinando las bandas de 400 y 450 nm para obtener la banda azul, las bandas de 500 y 550 nm para obtener la banda verde, y las bandas de 600 y 650 nm para obtener la banda roja se consiguen imágenes RGB con un color muy natural.

La Fig. 10 muestra las 13 bandas de la imagen multiespectral de un campo microscópico, así como la banda pancromática y la conversión a imagen en color RGB.

## 6. RESULTADOS

Los dos prototipos del sistema CAMEVA han sido sometidos a numerosas pruebas, en particular el situado en el LMAAI de la UPM, que ha sido empleado para recopilar una base de datos de reflectancia especular multiespectral en el rango VNIR de una selección de 38 minerales, elegidos por ser los más comunes y constituir las principales menas metálicas de interés económico e industrial (Tabla 1). La lista se amplió a 70 minerales en una segunda fase de adquisición, y los datos obtenidos han sido incorporados a las bases de datos de IMA/COM, accesibles en Internet (Castroviejo *et al.*, 2014).

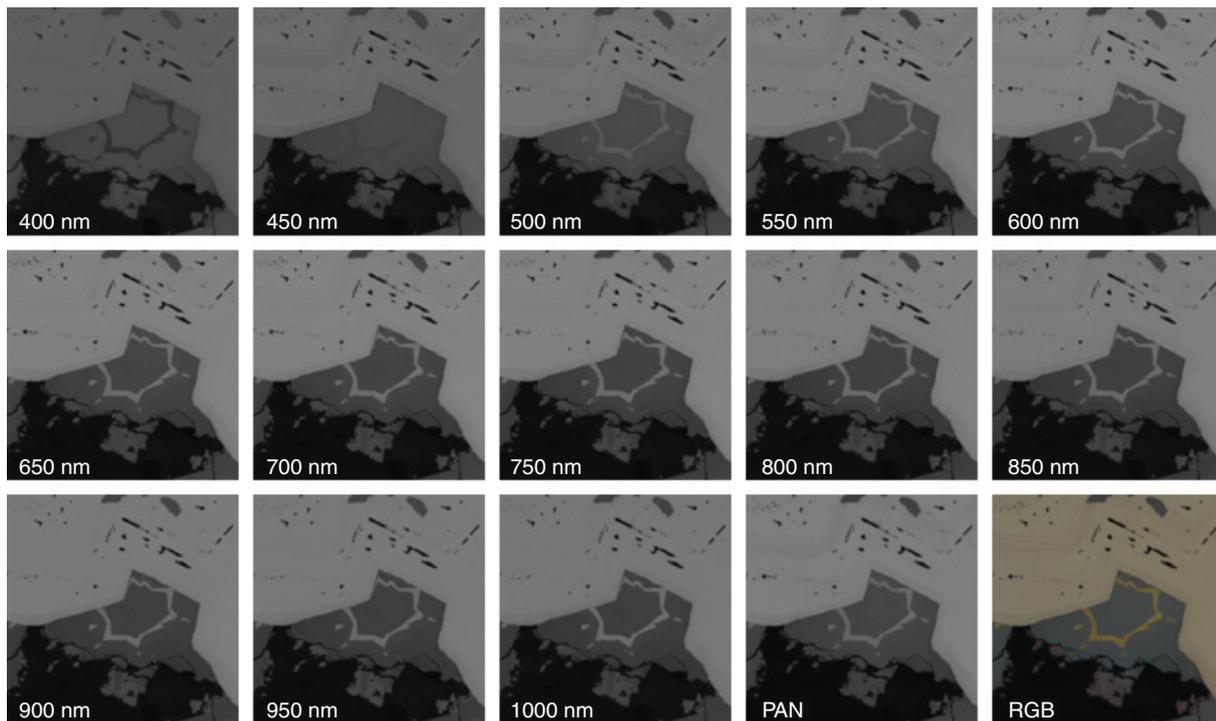


FIGURA 10. Ejemplo de imagen multispectral adquirida por el sistema CAMEVA, formada por 13 bandas adquiridas a intervalos de 50 nm entre 400 y 1000 nm. Se incluye la banda pancromática y una vista en color RGB obtenida combinando las bandas de 400 a 650 nm.

La Fig. 11 muestra curvas promedio de reflectancia VNIR obtenidas por el sistema sobre varios minerales (pirita, calcopirita, pirrotita, cubanita, covellina, hematites, magnetita y esfalerita), y las compara con las curvas publicadas en el rango visible (Criddle y Stanley, 1993). Se observa claramente que la información adicional en el IR permite apreciar cambios de tendencia muy acusados –compárese, p. ej., pirrotita con pirita o calcopirita- o que facilitan la diferenciación, p. ej. entre pirrotita y cubanita, cuyas curvas se solapan bastante en el visible.

La base de datos se ha elaborado a partir de una colección de muestras cuidadosamente seleccionadas por su representatividad y calidad de pulido. Sobre estas muestras se ha realizado la adquisición de una gran cantidad de imágenes multispectrales características de las distintas menas consideradas, que han sido almacenadas en disco. Un programa especialmente diseñado para asistir al operador permite al especialista en mineralogía examinar las imágenes almacenadas y delimitar en ellas zonas rectangulares de tamaño discrecional sobre regiones libres de defectos de las diversas fases minerales, asignándoles la etiqueta del mineral correspondiente (Fig. 12). Esto genera automáticamente archivos de datos con los valores de reflectancia multispectral de todos los píxeles de las zonas seleccionadas, que pueden así ser procesados o incluso incorporados a la base de datos.

Esta información puede ser aprovechada posteriormente para desarrollar procedimientos de identificación de minerales que puedan ser aplicados en el análisis automático de las imágenes. En una primera aproximación al problema, tras ensayar el comportamiento de cuatro técnicas de clasificación clásicas -mínima distancia euclídea, mínima distancia de Mahalanobis, Spectral Angle Mapper (SAM) y MOMI (Bernhardt, 1987)- se comprobó que la que mejores resultados daba era la basada en la distancia de Mahalanobis. Dicha técnica asigna una muestra desconocida a la clase más próxima según la métrica de distancia de Mahalanobis, basada en el cálculo del vector medio y la inversa de la matriz de covarianzas de los vectores de muestra que definen cada clase. En el caso concreto del sistema CAMEVA, una muestra está constituida por el vector de los 13 valores de reflectancia especular medida en las 13 bandas de interés (centradas cada 50 nm entre 400 y 1000 nm).

Para validar la calidad de la clasificación se reparte el conjunto de las zonas rectangulares seleccionadas y clasificadas por los especialistas en dos grupos: uno, al que se asigna aleatoriamente una parte de las zonas, se utiliza para entrenar el clasificador, y el otro, con el resto de las zonas, se utiliza para ponerlo a prueba. Para la clasificación de las zonas se ha usado la moda de los valores de reflectancia de cada banda, con el fin de reducir la influencia de los pequeños defectos superficiales.

TABLA 1. Valores de reflectancia multispectral de las principales menas metálicas

Abreviatura	Mineral	Longitud de onda central de la banda (nm)												
		400	450	500	550	600	650	700	750	800	850	900	950	1000
Ag	Plata nativa	84,9	88,7	90,5	91,8	92,5	92,8	93,4	93,6	93,3	93,0	93,4	93,4	93,5
arg	Argentita	33,5	34,3	33,8	31,5	30,3	29,6	29,3	29,2	28,9	28,5	28,5	28,4	28,6
asp	Arsenopirita	50,2	51,0	52,2	52,9	53,0	52,7	52,5	52,0	51,2	50,3	49,9	49,4	49,2
Au	Oro nativo	32,9	34,9	55,5	77,2	83,8	86,8	88,4	88,9	88,7	88,2	88,3	87,9	87,7
bm	Bismutina	46,0	45,7	45,2	44,7	43,9	42,9	42,1	41,1	39,7	38,4	37,7	36,8	36,1
bn	Bornita	21,5	17,5	17,2	20,0	23,3	26,8	30,6	33,2	35,0	36,2	37,2	37,7	38,2
cin	Cinabrio	31,5	28,3	26,9	26,0	25,8	27,6	27,7	27,4	26,9	26,5	26,4	26,2	26,0
cn	Cubanita	24,1	31,9	36,7	39,4	40,8	42,2	43,3	43,9	43,6	43,3	43,3	43,1	42,9
ccp	Calcopirita	19,1	32,4	42,4	47,4	48,6	48,5	48,1	47,3	46,0	44,9	44,5	44,6	45,4
chr	Cromita	12,4	12,0	11,8	11,6	11,5	11,3	11,2	11,1	11,1	11,0	11,0	11,0	11,3
cs	Casiterita	12,7	12,3	12,1	11,9	11,7	11,6	11,5	11,4	11,4	11,2	11,3	11,2	11,6
cc	Calcosina	38,2	37,8	35,6	33,5	32,1	30,8	30,0	29,3	28,7	28,1	28,0	27,9	27,9
cup	Cuprita	33,2	31,7	29,7	26,9	25,2	24,1	23,2	22,6	22,0	21,5	21,3	21,0	21,1
cv	Covellina	20,7	18,8	15,1	10,8	8,3	10,1	25,0	38,9	47,2	51,9	55,5	58,0	60,4
dg	Digenita	29,0	27,2	25,2	22,4	20,1	17,8	15,5	13,7	12,2	11,2	11,0	11,7	14,0
en	Enargita	28,8	28,0	27,4	26,9	27,0	27,5	27,7	27,6	27,9	28,2	27,9	27,0	26,8
gn	Galena	49,4	46,1	43,8	42,4	42,0	42,0	41,9	41,2	40,4	39,5	39,2	38,7	38,7
gth	Goethita	17,7	15,8	14,8	14,0	13,4	12,9	12,6	12,4	12,2	11,9	11,8	11,7	11,9
ht	Hematites	29,0	29,4	28,6	27,9	26,3	24,6	23,4	22,6	22,0	21,4	21,1	20,8	20,9
il	Ilmenita	21,6	19,6	18,6	18,5	18,5	18,6	18,7	18,5	18,3	17,9	17,8	17,5	17,6
ln-pm	Linneita_polydimita	41,4	43,4	44,2	44,3	44,9	47,5	52,2	55,9	58,7	60,5	62,3	63,5	64,7
ln-vl	Linneita_violarita	40,1	41,9	43,6	45,8	48,1	50,9	54,2	56,3	57,7	58,5	59,7	60,4	61,4
mc	Marcasita	44,0	47,4	50,7	51,7	50,9	49,7	48,5	47,4	46,2	45,5	45,8	46,1	47,0
mg	Magnetita	21,7	20,7	20,5	20,5	20,6	20,7	20,3	19,6	18,6	17,7	17,3	17,0	17,3
mo	Molibdenita	32,5	34,6	32,3	30,1	29,8	29,7	29,8	28,5	27,7	27,0	26,8	26,5	26,7
nc	Niquelina	41,8	40,5	44,2	51,0	56,0	59,7	62,8	65,0	66,5	67,5	68,5	68,8	69,3
pn	Pentlandita	34,5	40,0	44,2	47,9	50,3	52,4	54,5	55,7	56,5	57,3	58,4	59,1	60,0
po	Pirrotita	32,2	34,9	37,7	40,4	42,5	44,4	46,5	47,9	49,0	49,8	51,1	52,0	53,1
pri	Pirolusita	30,4	31,6	31,8	31,4	30,9	30,3	29,8	29,4	28,8	28,2	27,8	27,4	27,2
psi	Psilomelana	27,0	26,8	25,9	24,7	23,7	22,9	22,3	21,8	21,4	21,0	20,9	20,7	20,9
Pt	Platino nativo	57,8	61,1	63,5	65,5	66,9	67,9	69,3	70,2	70,7	71,1	72,1	72,7	73,7
py	Pirita	39,0	45,4	50,8	53,5	54,4	55,1	55,4	54,2	52,2	50,4	49,4	48,3	47,4
rt	Rutilo	25,0	23,4	22,5	21,9	21,6	21,5	21,4	21,3	21,5	21,4	21,5	21,5	21,7
sp	Esfalerita	20,0	18,8	18,2	17,7	17,4	17,1	16,9	16,7	16,6	16,5	16,5	16,6	16,9
stb	Estibina	39,7	38,3	37,3	37,0	36,8	36,3	35,7	35,0	34,1	33,3	32,9	32,3	32,1
td	Tetrahedrita	30,9	30,7	30,8	31,2	30,8	29,6	28,4	27,5	26,6	25,8	25,5	25,2	25,2
urn	Uraninita	15,6	14,6	14,2	14,1	14,0	14,0	14,2	14,2	14,3	14,1	14,2	14,1	14,4
wf	Wolframita	18,1	17,2	17,0	17,0	16,8	16,4	16,0	15,7	15,5	15,4	15,5	15,4	15,4

La Fig. 13 muestra cómo se distribuyen los resultados de la clasificación de las zonas en función de los valores obtenidos para la mínima distancia de Mahalanobis y el índice de confiabilidad (definido como el cociente entre la segunda menor distancia y la distancia mínima). Las zonas mal clasificadas se representan en rojo, y las bien clasificadas en azul.

Se puede observar que las zonas mal clasificadas muestran valores bajos del índice de confiabilidad.

Desafortunadamente, no resulta sencillo extender los buenos resultados de la clasificación de zonas al conjunto de una imagen cualquiera, ya que para ello sería necesario proceder a la previa segmentación de las zonas uniformes de la imagen,

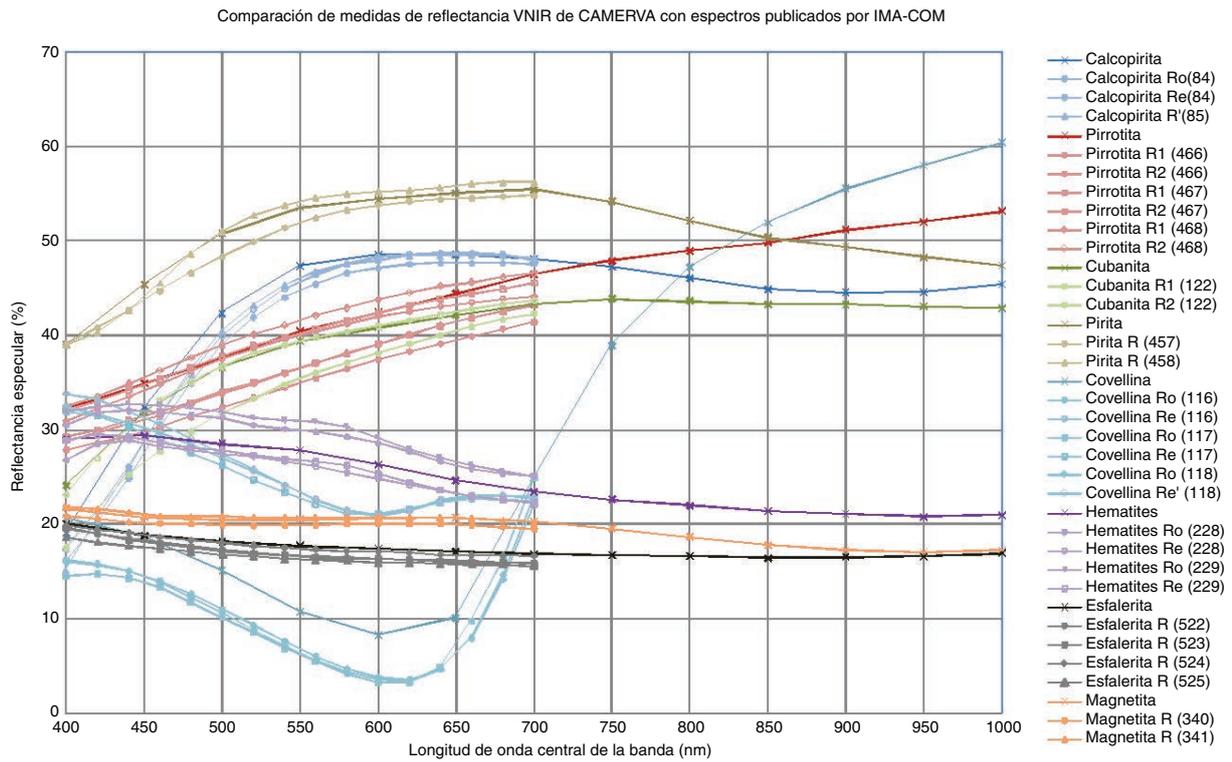


FIGURA 11. Comparación de medidas de reflectancia multispectral VNIR del sistema CAMEVA con espectros publicados por IMA-COM en su QDF III (los limitados al tramo 400-700 nm).

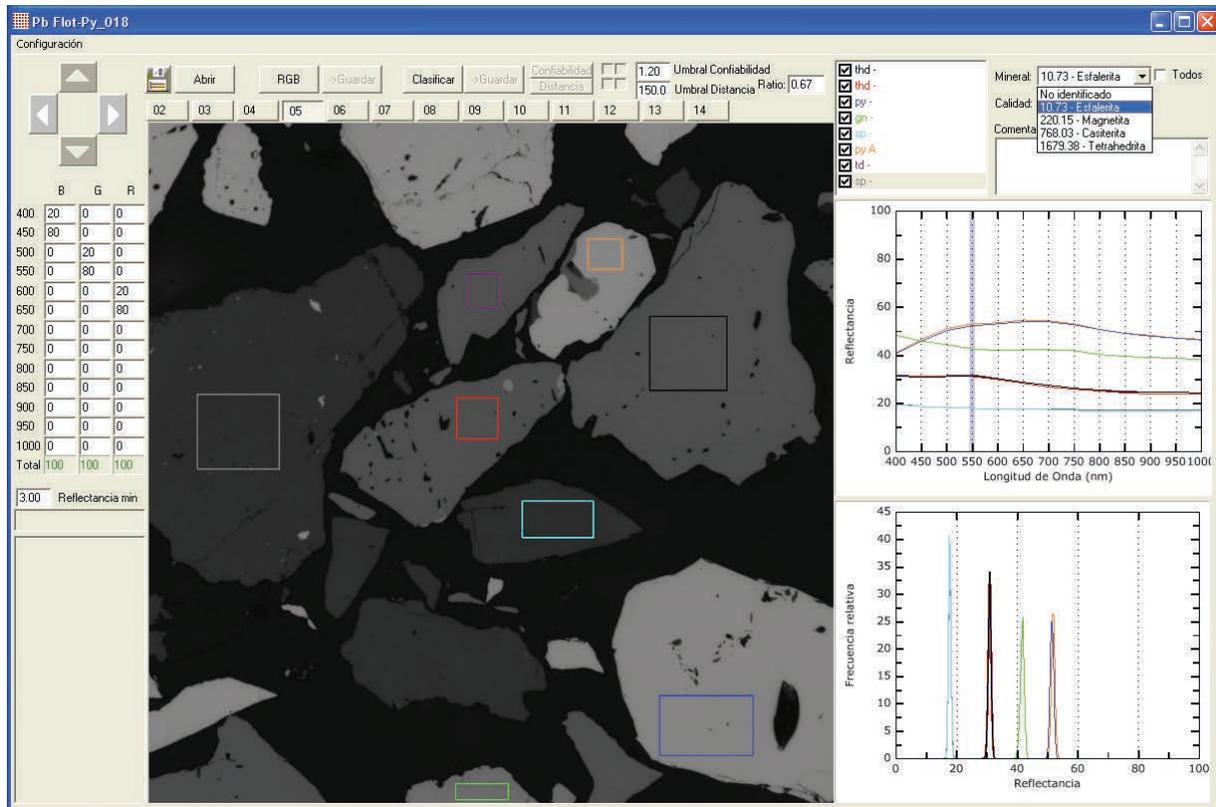


FIGURA 12. Programa de asistencia al análisis manual. Permite recorrer las imágenes almacenadas y marcar en ellas zonas rectangulares, asignándoles la etiqueta del mineral correspondiente.

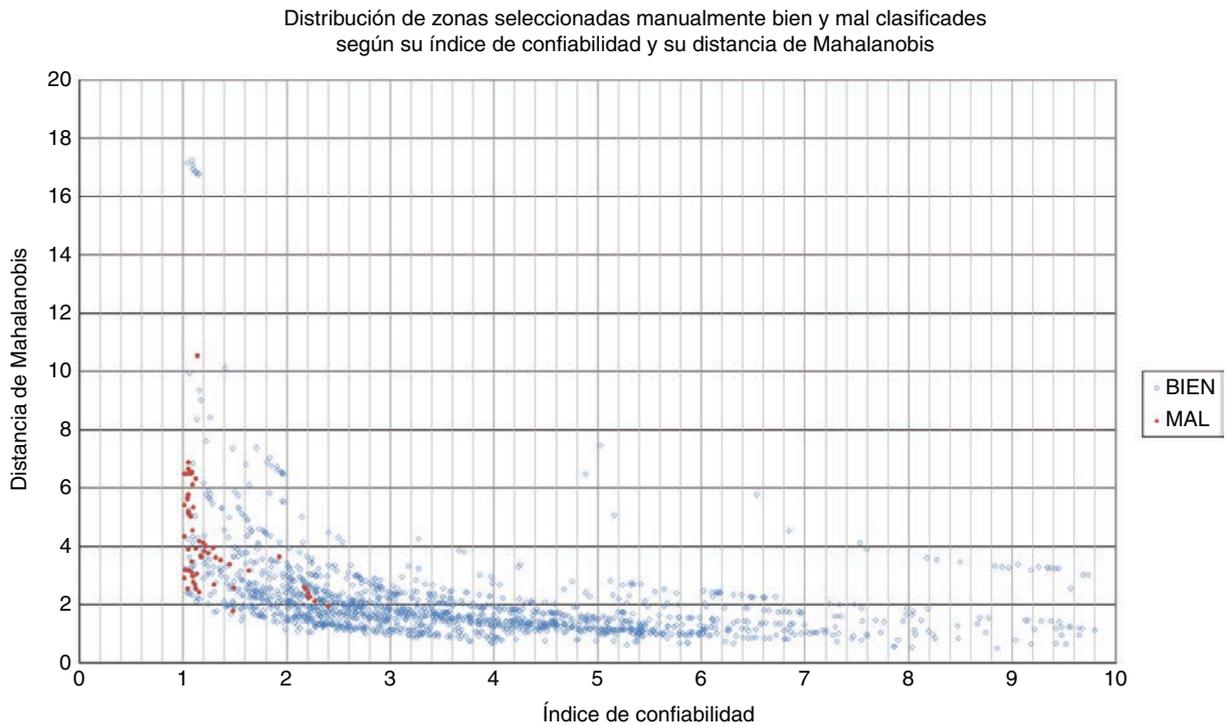


FIGURA 13. Distribución de las zonas seleccionadas por los especialistas en función de los valores de distancia e índice de confiabilidad obtenidos en su clasificación por la técnica de la mínima distancia de Mahalanobis. Las zonas mal clasificadas se representan en rojo.

que no es una tarea fácilmente automatizable. Por ello, la versión actual del programa de identificación de minerales procesa individualmente cada uno de los píxeles de una imagen multispectral, generando una imagen de paleta de colores que identifica la especie mineral a la que ha sido asignado cada píxel. Si un píxel presenta una reflectancia más baja que un valor mínimo o no cumple unas condiciones dadas de fiabilidad en la clasificación (distancia máxima a la clase y coeficiente de confiabilidad mínimo), se le asigna la etiqueta “no clasificado”. Posteriormente, se contabiliza el número de píxeles asignado a cada número de etiqueta, y con dichos datos se obtienen los resultados del análisis modal.

## 7. DISCUSIÓN

El análisis de los resultados precedentes muestra claramente que el sistema desarrollado permite, en general, la identificación automatizada de las menas metálicas con un elevado nivel de confianza. Esta identificación se ha controlado sistemáticamente en las menas comunes, cuantificando el nivel de confianza por medio de la distancia de Mahalanobis, con el resultado de tasas de acierto habitualmente próximas al 100%. La Tabla 2 presenta los resultados de una de estas pruebas, en las que se ha entrenado el sistema con los píxeles del 70% de las zonas

seleccionadas y se clasifican los píxeles del 30% restante de las zonas.

Las menas de interés industrial son sólo una pequeña fracción de las alrededor de 1500 especies de menas conocidas: se estima su número en poco más de una treintena de especies (Criddle, 1998). Aunque este número puede variar ligeramente según los autores y las épocas, se puede aceptar la selección de 37 especies minerales elaborada por Bowie y Simpson (1980) como representativa. Todas ellas están comprendidas en la selección de 70 “menas comunes” investigadas y medidas para la puesta a punto del sistema CAMEVA. Para las restantes menas, en general carentes de interés industrial, escasas o muy poco frecuentes, cabe aplicar el mismo método, ampliando previamente la base de datos espectrales mediante la medida de las correspondientes muestras como patrones de referencia. El sistema está programado para ello.

En general, la incorporación sistemática del rango IR cercano –espectros VNIR- refuerza la fiabilidad de la identificación, en comparación con el espectro visible tradicionalmente medido: por ejemplo, la pirrotita muestra una tendencia IR muy peculiar, mejorando claramente el contraste visible con cubanita o calcopirita (*cf.* Fig. 11). No obstante, se ha detectado en casos excepcionales, incluso en el rango VNIR, una similitud en los espectros de ciertas menas, como p. ej. casiterita y

TABLA 2. Resultados de la clasificación de píxeles de zonas seleccionadas manualmente (entrenamiento con todos los píxeles del 70% de las zonas, clasificación de todos los píxeles del 30% restante de las zonas)

Abreviatura	Mineral	Total zonas clasifi-cadas	Total píxeles	% píxeles correctos	Distan. media correctos	Distan. media incorrectos	Confiabil. media correctos	Confiabil. media incorrectos
Ag	Plata nativa	12	5654	100,00	13,86	-	61,11	-
arg	Argentita	6	8748	96,71	13,14	28,42	2,93	1,35
asp	Arsenopirita	10	333275	99,55	13,24	357,66	28,40	1,32
Au	Oro nativo	6	1444	100,00	14,25	-	76,97	-
bm	Bismutina	11	6092	99,47	32,96	134,11	7,86	1,09
bn	Bornita	9	77145	100,00	13,21	-	11,37	-
cin	Cinabrio	5	13433	92,67	12,43	16,25	2,62	1,24
cn	Cubanita	14	346304	99,96	12,72	112,32	30,50	1,63
ccp	Calcopirita	4	205300	97,39	14,45	132,76	2,18	4,90
chr	Cromita	5	549479	99,09	19,72	73,84	4,36	1,31
cs	Casiterita	14	127921	99,97	15,18	89,05	9,28	1,16
cc	Calcosina	3	780656	94,83	12,19	211,95	2,24	6,60
cup	Cuprita	3	103188	99,71	13,57	61,25	6,48	1,27
cv	Covellina	4	171559	99,99	17,48	3306,14	141,91	1,05
dg	Digenita	3	70	100,00	39,40	-	12,30	-
en	Enargita	5	105903	97,22	13,15	31,18	2,74	1,28
gn	Galena	10	110782	99,96	13,62	46,36	13,08	1,55
gth	Goethita	4	82968	97,09	6,17	114,53	1,12	3,05
ht	Hematites	4	18326	99,83	13,47	46,26	5,57	1,50
il	Ilmenita	4	306553	98,97	12,89	26,43	2,80	1,23
ln	Linneita	10	22167	99,96	15,22	69,39	12,93	1,18
mc	Marcasita	15	121610	99,96	17,22	98,80	12,11	1,15
mg	Magnetita	5	336262	99,32	12,01	26,96	3,15	1,16
mo	Molibdenita	6	61484	99,87	13,34	25,91	5,68	1,18
nc	Niquelina	7	44112	100,00	12,85	-	22,36	-
pn	Pentlandita	8	47917	91,87	14,97	20,70	10,70	1,27
po	Pirrotita	12	304686	99,73	17,31	41,00	3,55	1,10
prl	Pirolusita	3	2302	99,74	12,28	22,29	4,36	1,24
psi	Psilomelana	12	245086	99,66	12,75	22,32	3,27	1,29
Pt	Platino nativo	11	17189	99,01	15,66	-	58,53	-
py	Pirita	7	482269	100,00	14,39	80,32	13,16	1,52
rt	Rutilo	11	481618	88,51	13,86	19,87	1,85	1,18
sp	Esfalerita	10	279350	99,63	14,21	161,84	2,78	5,48
stb	Estibina	9	117978	97,39	20,72	29,15	2,73	1,21
td	Tetrahedrita	8	46626	99,95	12,07	41,99	6,18	1,30
urn	Uraninita	5	26217	99,69	14,20	55,69	2,88	2,40
wf	Wolframita	4	128685	98,69	13,16	150,71	2,56	7,70
	<b>Totales</b>	<b>279</b>	<b>6120358</b>	<b>97,84</b>				

cromita, que podría inducir a confusión o indeterminación al identificarlas. Este problema se puede superar introduciendo en la base de datos la opción “asociación mineral”, ligada a la tipología del yacimiento investigado, ya que dichos minerales se ubican en tipologías muy diferentes. El “software” del sistema es suficientemente abierto como para poder

incorporar (opcionalmente) esta información, digitalizada a partir de la sistematización metalogénica conocida (Castroviejo y Berrezueta, 2009).

Demostrada la viabilidad de la identificación automatizada, cabe interrogarse sobre el interés práctico e industrial de la innovación (Sistema CAMEVA), lo que requiere compararla tanto

con las técnicas tradicionales de reconocimiento por microscopía (óptica) de reflexión como con los recientes sistemas automatizados basados en microscopía electrónica.

La Tabla 3 resume una comparación de las tres principales técnicas en uso actualmente, recogiendo criterios como precio, rendimiento, movilidad (capacidad de traslado a mina o a localidades con escasa infraestructura, p.ej. para campañas de exploración), etc. Se concluye, en las dos últimas filas, con un análisis de las principales fortalezas y limitaciones metodológicas de cada técnica y, en la columna derecha, con la indicación del equipo que podría considerarse mejor elección según cada uno de los criterios empleados. Se trata, evidentemente, sólo de una orientación muy general, que luego habría de matizarse con los diferentes precios y prestaciones de cada uno de los equipos existentes, en un mercado en continua evolución.

Frente a las técnicas manuales con contador de puntos (CP) y desde un punto de vista práctico, funcional, el sistema CAMEVA al prescindir de la polarización renuncia a una parte importante de la información visible, pero compensa esta limitación con el acopio de datos espectrales objetivos y precisos que superan ampliamente las capacidades del ojo humano. Su rendimiento es también muy superior, al introducir mejoras como el enfoque automatizado (compensado para cada tramo espectral) y la platina motorizada que permiten la adquisición automatizada de las imágenes. Al no depender del ojo humano, se eliminan los problemas relacionados

con la fatiga del observador y se alcanzan cotas de producción impensables para un operador humano (por ejemplo, la cuantificación de millones de partículas minerales). Otra importante ventaja adicional es la versatilidad, ya que la adquisición de la información mineralógica (imagen) se hace una sola vez, se archiva y luego se puede procesar matemáticamente tantas veces como se desee para responder a diferentes demandas (análisis modal, granulometría, grado de liberación, análisis textural, etc.), mientras que un operador manual tiene que repetir el proceso de adquisición para cada nueva demanda.

Frente a los recientes sistemas basados en microscopía electrónica, MEB, el rendimiento es similar pero el precio del sistema CAMEVA es mucho más asequible (en torno al 15 %) y sus requerimientos de infraestructura y mantenimiento, mucho menos exigentes. Además, el *software* CAMEVA es flexible y abierto a los diversos tipos de asociaciones minerales, mientras que habitualmente la programación de los sistemas MEB está prevista para una asociación determinada y debe cambiarse al variar ésta, lo que puede ocurrir en distintas zonas de un mismo yacimiento.

Por otra parte, el análisis comparativo de las prestaciones analíticas permite constatar algunas fortalezas y limitaciones específicas de cada una de las técnicas empleadas. En primer lugar, el tipo de información utilizada para el reconocimiento de las partículas minerales (química u óptica en los sistemas MEB o CAMEVA, respectivamente) permite suponer, en principio, cierta superioridad en caso de

TABLA 3. Comparación de las tres principales técnicas para caracterización de menas

	CP (Contador de Puntos)	CAMEVA	MEB	Selección
PRECIO (estimación, k€)	25	100-120	600-1000	CP CAMEVA
Exigencias de INFRAESTRUCTURA	Bajas	Bajas	Altas	CP CAMEVA
MOVILIDAD	Alta	Alta	Imposible	CP CAMEVA
ESPECIALIZACIÓN del operario	Alta	Media	Alta	CAMEVA
VERSATILIDAD	Muy baja	Alta	Alta	CAMEVA SEM
RENDIMIENTO	Bajo (lento y limitado)	Alto (rápido y eficiente)	Alto (rápido y eficiente)	CAMEVA SEM
ASEQUIBILIDAD para PYMES y consultores	Asequible	Asequible	Inasequible	CP CAMEVA
FORTALEZAS METODOLÓGICAS	Observación directa (permite interpretación cualitativa)	Medida de reflectancia multiespectral (COM) Polimorfos Menas de Fe Grafito Muy útil para docencia	Composición química Series isomorfas Minerales transpa-rentes (ganga)	Según tarea
LIMITACIONES METODOLÓGICAS	Fatiga visual Subjetividad Lentitud No info voluminosa	Composición química Series isomorfas Minerales transpa-rentes (ganga)	Polimorfos Menas de Fe Fases no detectables por SEM (grafito...)	Según tarea

fases isomorfas o polimorfas a los sistemas MEB o CAMEVA, respectivamente, ya que los minerales de series isomorfas admiten variación composicional sin cambiar necesariamente las propiedades ópticas y los polimorfos tienen la misma composición, aun variando las propiedades ópticas. Esto debe, no obstante, matizarse, porque los sistemas MEB determinan sólo con aproximación las composiciones químicas y no pueden discriminar entre fases minerales de composiciones próximas. No obstante, cabe pensar en mayores prestaciones de los sistemas MEB, en general, en la caracterización de minerales de TR (Tierras Raras), que frecuentemente tienen variaciones composicionales amplias, no siempre reflejadas en diferencias de parámetros ópticos.

En cambio, el sistema CAMEVA es netamente superior para la investigación de menas de Fe, de gran importancia industrial, ya que las composiciones de los principales óxidos (hematites, magnetita, goethita, limonita) son parecidas y, a pesar de recientes avances (Figuroa *et al.*, 2011), no se discriminan fácilmente con MEB, mientras que sus propiedades ópticas, por el contrario, son diagnósticas (Fig. 11).

Finalmente, debe indicarse que los sistemas automatizados precisan que las preparaciones tengan una calidad de pulido superior a la que sería aceptable para las técnicas manuales. El motivo es que un defecto de pulido (relieve, rayadura, arranque de grano, etc.) puede originar una estimación incorrecta de la reflectancia e inducir un error de identificación en la zona afectada, que habría sido obviado por un operador manual. En el caso de los sistemas MEB, esta exigencia de calidad del pulido es aún más alta.

## 8. CONCLUSIONES

- El análisis mineralógico automatizado es una poderosa herramienta de apoyo para la optimización del proceso mineralúrgico. La magnitud y rendimiento de los procesos modernos de concentración de menas requieren la automatización de estas aplicaciones y el recurso a técnicas de análisis digital de imagen, las cuales se han ido decantando por métodos basados en microscopía electrónica (MEB) en los últimos años, dadas las limitaciones de la microscopía (óptica) de menas clásica. No obstante, los avances recientes en electrónica y en informática posibilitan el desarrollo de sistemas ópticos competitivos como CAMEVA, el cual supera algunas de las limitaciones de los sistemas MEB, como su elevado precio, sus rígidas y costosas exigencias de infraestructura y especialización o la dificultad de distinguir especies polimorfas, manteniendo prestaciones similares en cuanto a rendimiento y calidad de información.

- Los ensayos realizados muestran que el sistema CAMEVA permite la identificación automatizada y fiable de las menas de interés industrial, a partir de la información espectral VNIR disponible en una base de datos específica; y sugieren prestaciones similares para otras menas, a partir de las medidas de reflectancia espectral VNIR que se pueden obtener con el mismo equipo. Por otra parte, su programación flexible y abierta permite el archivo y tratamiento matemático de toda la información digital para responder a cualquiera de los requerimientos de planta (análisis modal, grado de liberación, caracterización textural, etc.).

## AGRADECIMIENTOS

El desarrollo del sistema descrito en este artículo ha sido financiado por el Ministerio de Educación y Ciencia (posteriormente Ciencia e Innovación) de España a través del proyecto coordinado CAMEVA, integrado a su vez por los Proyectos SEICAMIN (Ref. CGL2006\_13688\_C02\_01) y AMAMET (Ref. CGL2006\_13688\_C02\_02).

## REFERENCIAS

- Bernhardt, H.-J., (1987). A simple, fully-automated system for ore mineral identification. *Miner. Petrol.* 36 (3-4), 241-245. <http://dx.doi.org/10.1007/BF01163262>.
- Berrezueta, E., Castroviejo, R. (2007). Reconocimiento automatizado de menas metálicas mediante análisis digital de imagen: un apoyo al proceso mineralúrgico. I: ensayo metodológico. *Rev. Metal.* 43 (4), 294-309. <http://dx.doi.org/10.3989/revmetalm.2007.v43.i4.75>.
- Bowie, S.H.U., Taylor, K. (1958). *A system of ore mineral identification*. The Mining Magazine, Published at Salisbury House, London, pp. 99, 265-277, 337-345.
- Bowie, S.H.U., Simpson, P.R. (1980). *The Bowie-Simpson System for the Microscopic Determination of Ore Minerals*. Applied Mineralogy Group of the Mineralogical Society. McCrone Research Associates, London, p. 10
- Castroviejo, R., Berrezueta, E. (2009). Reconocimiento automatizado de menas metálicas mediante análisis digital de imagen: un apoyo al proceso mineralúrgico. II: criterios metalogenéticos discriminantes. *Rev. Metal.* 45 (6), 439-456. <http://dx.doi.org/10.3989/revmetalm.0923>.
- Castroviejo, R., Espí, J.A., Brea, C., Pérez-Barnuevo, L., Catalina, J.C., Segundo, F. (2013). Método para obtener imágenes multiespectrales de reflectancia absoluta. Patente N° 201130499.
- Castroviejo, R., Catalina, J.C., Bernhardt, H.-J., Pirard, E., Brea, C., Pérez-Barnuevo, L., Segundo, F., Espí, J.A. (2014). Report: Multispectral (visible and near infra-red, 400-1000 nm range) reflectance data file from common ore minerals. LMAAI, Madrid. Link IMA/COM site: [http://projects.gtk.fi/com/results/reflectance\\_data.html](http://projects.gtk.fi/com/results/reflectance_data.html).
- Catalina, J.C., Alarcón, D., Prado, J.G. (1995). Automatic maceral and reflectance analysis in single seam bituminous coals. *Eighth International Conference on Coal Science*, Oviedo.
- Catalina, J.C., Llamas, B., Prado, J.G., Borrego, A.G. (2003). An Automated Petrographic Analysis System for Coal Blends. *Proceedings of the 12th International Conference on Coal Science*. Cairns, Australia.
- Criddle, A.J. (1998). *Ore Microscopy and Photometry* (1890-1998). In *Modern Approaches to Ore and Environmental Mineralogy*. Ed. Cabri, L.J. and Vaughan, D.J., COM/IMA Short Course Series, Vol. 27, Ottawa, Ontario, p. 421.

- Criddle, A.J., Stanley, C.J. (1986). *The Quantitative Data File for Ore Minerals of the Commission on Ore Microscopy of the International Mineralogical Association*. 2<sup>nd</sup> Edition, British Museum (Natural History), London.
- Criddle, A.J., Stanley, C.J. (1993). *Quantitative Data File for Ore Minerals*, 3<sup>rd</sup> Ed., Chapman & Hall, London.
- Figueroa, G., Moeller, K., Buhot, M., Gloy, G., Haberlah, D. (2011) Advanced discrimination of hematite and magnetite by automated mineralogy. Broekmans, M. (Ed.) *Proc. 10<sup>th</sup> Int. Congress Applied Mineralogy (ICAM)*, Trondheim, Norway, pp. 197–204.
- Font-Altaba, M. (1970). *International Tables for the microscopic determination of crystalline substances absorbing in visible light*. Provisional Issue IMA/COM, Dpto. de Cristalografía y Mineralogía de la Universidad de Barcelona, Spain.
- Gerlitz, C.N., Leonard, B.F., Criddle, A.J. (1989). *QDF database system, version 1.0: reflectance of ore minerals – a search-and-match identification system for IBM and compatible microcomputers using the IMA/COM Quantitative Data File for Ore minerals*. 2<sup>nd</sup> Edition, U.S. Geological Survey, USA.
- Gray, I.M., Millman, A.P. (1962). Reflection characteristics of ore minerals. *Econ. Geol.* 57 (3), 325–349. <http://dx.doi.org/10.2113/gsecongeo.57.3.325>.
- Henry, N.F.M. (1977). *IMA/COM Quantitative Data File, first issue*. International Mineralogical Association – Commission on Ore Microscopy. Distributed by Mc Crone Research Associates Ltd., London.
- McLeod, C.R., Chamberlain, J.A. (1969). *Reflectivity and Vickers Microhardness of Ore Minerals – Chart and Tables*. Vol. 68 (Nº 64), Editor Department of Energy, Mines and Resources, Canada.
- Picot, P., Johan, Z. (1977). *Atlas des Mineraux Metalliques*. Vol. 90, Editor Bureau de Recherches Geologiques et Minières, France.
- Picot, P., Johan, Z. (1982). *Atlas of Ore Minerals*. Elsevier, Amsterdam.
- Pirard, E. (2004). Multispectral imaging of ore minerals in optical microscopy. *Mineral. Mag.* 68 (2), 323–333. <http://dx.doi.org/10.1180/0026461046820189>.
- Pirard, E., Lebrun, V., Nivart, J.F. (1999). Optimal Acquisition of Video Images in Reflected Light Microscopy. *European Microscopy and Analysis* 60 (9), 9–11.
- Pirard, E., Bernhardt, H.J., Catalina, J.C., Brea, C., Segundo, F., Castroviejo, R. (2008). From Spectrophotometry to Multispectral Imaging of Ore Minerals in Visible and Near Infrared (VNIR) Microscopy. *9<sup>th</sup> International Congress for Applied Mineralogy*, Brisbane, Australia, pp. 1–6.
- Sutherland, D.N., Gottlieb, P. (1991). Application of automated quantitative mineralogy in mineral processing. *Miner. Eng.* 4 (7–11), 753–762. [https://doi.org/10.1016/0892-6875\(91\)90063-2](https://doi.org/10.1016/0892-6875(91)90063-2).