

CARACTERIZACIÓN Y CUANTIFICACIÓN AUTOMATIZADAS DE MENAS METÁLICAS MEDIANTE VISIÓN ARTIFICIAL : PROYECTO CAMEVA

Ricardo Castroviejo ⁽¹⁾, Juan Carlos Catalina ⁽²⁾, Heinz-Juergen Bernhardt ⁽³⁾, José A. Espí ⁽¹⁾, Eric Pirard ⁽⁴⁾, Josefina Samper ⁽¹⁾, Carolina Brea ⁽¹⁾, Fernando Segundo ⁽²⁾, Juan Locutura ⁽⁵⁾, Laura Pérez-Barnuevo ⁽¹⁾, Lázaro Sánchez ⁽¹⁾, Ángel Fidalgo ⁽¹⁾.

⁽¹⁾ Universidad Politécnica de Madrid, ETSI Minas, c/Ríos Rosas 21, 28003Madrid, ⁽²⁾ AITEMÍN, Madrid, ⁽³⁾ Ruhr-Universitaet Bochum, Alemania, ⁽⁴⁾ Lab. Microscopie Appliquée, Univ. Liège, Bélgica, ⁽⁵⁾ IGME, Madrid.

SUMARIO. El proyecto CAMEVA (Caracterización Automatizada de Menas metálicas mediante Visión Artificial) pretende desarrollar un sistema automatizado capaz de llevar a cabo la identificación y cuantificación de los minerales presentes en muestras de menas metálicas para facilitar su posible aprovechamiento industrial. El sistema integra un microscopio óptico de reflexión motorizado, una rueda de filtros monocromadores situada ante la fuente luminosa, una cámara B/N de investigación y un ordenador, en el que un programa de análisis digital de imagen asociado a un sistema experto especialmente desarrollado para esta aplicación controlarán el proceso.

Se mide la reflectancia multiespectral y se ha optado por trabajar habitualmente sin polarizador, con el fin de reducir la variabilidad arbitraria de medidas ligada a la anisotropía de los minerales. Para la identificación se compararán las reflectancias medidas con las bases de datos de reflectancia espectral existentes (p. ej. IMA-COM). Las experiencias previas del equipo indican que es posible diferenciar las menas más comunes mediante el análisis de la imagen microscópica en color con cámara RGB y construyendo las opciones de busca con información adicional, tal como la tipología del yacimiento y la asociación mineral real. El proyecto actual va más allá, y pretende identificar las menas a partir de imágenes multiespectrales, que incorporan valores espectrales entre 350 y 1000 nm (es decir, no sólo el espectro visible, sino el UV e IR cercanos), y recurriendo a un sistema experto construido específicamente para tener en cuenta los diversos tipos de información disponible (reflectancia espectral, origen de la muestra, asociaciones minerales, morfología, etc).

La validación del método se efectúa mediante el análisis comparativo de muestras y patrones intercambiados entre laboratorios. El desarrollo previsto busca la automatización total del proceso (incluida la calibración) y la capacidad de auto-aprendizaje del sistema. Una vez terminado, el sistema será puesto a prueba en problemas industriales reales (mineralúrgicos o de protección ambiental), gracias a los contactos establecidos con entidades nacionales e internacionales del sector. En el futuro, cabe plantear la extensión del campo de aplicación del sistema a otros tipos de minerales, materiales o productos

SUMMARY. The CAMEVA project (Automated system for the identification and quantitative measurement of ore minerals) aims to develop an automated system able to perform the identification and quantification of the different minerals present in a sample of metallic ores, in order to facilitate their industrial use. The system comprises a motorised reflected light microscope, a filter wheel (monochromator), a research BW camera, and a computer running a digital image analysis software associated to an expert system specially developed for this application.

Multispectral reflectance values are measured for visible light and near IR and UV (350-1000 nm), and no polarisation is usually employed in order to reduce measurement variability due to mineral anisotropy. Mineral identification is carried out by comparison of measured reflectances with spectral reflectance databases (e.g. IMA-COM). Previous experiences showed that the most common ores can be differentiated through the analysis of a microscopic RGB colour image, by constraining the search with additional information such as the type of deposit and the corresponding mineral association. The project goes further, and intends to identify most of the ores from multi-spectral images, including non-visible bands, resorting to an expert system specifically built to deal with the different types of information available (spectral reflectance, sample origin, mineral associations, morphology, etc).

Validation of the method will be carried out by comparative análisis of standards and samples exchanged between the laboratories.

Development pays special attention to the total automation of the process (including calibration) and to the self-learning capabilities of the system. Contacts with research institutions and with the industry will allow to apply the system to real problems. The system can be used to control the processing of ores as well as to prevent pollution for the protection of the environment (e.g. sulphides in coal or in industrial tailings). Further applications can be envisaged in the future: e.g. other minerals, coal or materials, particles, etc.

RESUMEN EXTENDIDO

El proyecto, desarrollado por el Grupo de Investigación *Recursos Minerales* de la Universidad Politécnica de Madrid (*GIRMI_UPM*), en el *Laboratorio de Microscopía Aplicada y Análisis de Imagen* (Red de Laboratorios de la Comunidad de Madrid, *rla207*) y por AITEMÍN con la colaboración de las Universidades de Bochum (Alemania) y Lieja (Bélgica), tiene por objeto, en primer lugar, la identificación automática de menas metálicas mediante microscopio óptico de reflexión, a partir de preparaciones pulidas representativas. La automatización ofrecerá a la industria una información objetiva muy valiosa y potente, con un rendimiento muy superior al de los estudios tradicionales. Se aspira por otra parte, mediante la puesta a punto de esta metodología alternativa, a mitigar el problema cierto que ya representa la paulatina desaparición de los expertos en microscopía de menas en todo el mundo, ya que esta disciplina encuentra cada vez menos sitio en los planes de estudios de las Ciencias de la Tierra, por efecto de la progresiva reducción impuesta a los programas docentes universitarios.

El diseño de un sistema automatizado ha tropezado siempre en este campo con numerosas dificultades, entre las que cabe destacar la similitud de las propiedades ópticas y del aspecto microscópico de muchos minerales. Este problema se resuelve habitualmente por estudios cualitativos que recurren a las propiedades de polarización relacionadas con la anisotropía de los minerales, lo que permite clasificarlos correctamente y posibilita la cuantificación directa (no automatizada) por el observador, mediante platina integradora o contador de puntos. Sin embargo, para un sistema automatizado de alto rendimiento, como requiere la industria, lo ideal es trabajar en condiciones de aparente isotropía, es decir, recurriendo a propiedades que no dependan de la orientación, para limitar las variables a un número manejable. Además, el uso de una platina motorizada X-Y hace imposible la rotación que exige la determinación rutinaria de las propiedades que dependen de la orientación, como pleocroísmo, birreflexión, anisotropismo, etc.

METODOLOGÍA. A nivel internacional, se han ensayado diversas metodologías para afrontar el problema, obteniéndose en general soluciones específicas para problemas concretos; no obstante, lo que aquí se plantea es crear una metodología de aplicación general.

Para ello, se ha elaborado una base de datos con la siguiente información: los parámetros de reflexión de los distintos minerales, según las últimas determinaciones publicadas (IMA / COM: Criddle and Stanley, 1993); la selección de las menas más frecuentes e importantes desde el punto de vista industrial y de la contaminación ambiental; la identificación de sus paragénesis, que permite limitar el campo de busca para cada tipo de yacimiento y ajustar la discriminación a la mineralogía real; la determinación de cocientes o combinaciones de parámetros (en principio, reflectancia en las distintas bandas, a partir de niveles de gris medidos) que permitan la distinción de cada mineral (o familia de minerales) dentro del conjunto de la asociación mineral correspondiente.

Esta información permite, según trabajos previos (Berrezueta, 2004; Berrezueta y Castroviejo, 2007), la segmentación y correcta identificación de los principales minerales, por medio de una cámara de vídeo color 3CCD (*SONY XC-003P*), instalada en un microscopio de reflexión (*Leica DMRXP*) y conectada por tarjeta digitalizadora (*Matrox Meteor*) a un ordenador con programa de análisis digital de imagen (*Aphelion*). La hipótesis de partida para este proyecto implicaba pues trabajar con luz blanca y una cámara de vídeo en color 3CCD, tratando separadamente los tres canales RGB, para ganar en flexibilidad, rapidez y economía. No obstante, las innovaciones tecnológicas más recientes permiten contemplar la posibilidad de adquirir imágenes multispectrales mediante una cámara monocroma y un juego de filtros ópticos, que es finalmente el recurso elegido por su mayor precisión y capacidad de diagnóstico (Pirard, 2004). La instrumentación utilizada (fig.1) comprende: un

microscopio motorizado *Leica DM6000M* adaptado (sin polarizadores en el trabajo rutinario, aunque para requerimientos específicos se han introducido cuatro polarizadores rotados en distintas posiciones en la rueda de diaphragmas) y con una rueda de filtros *DTA RPF16* intercalada entre la fuente luminosa y el estativo, la cual aloja 13 filtros *Melles Griot* que permiten medir por separado los correspondientes tramos del espectro (13 tramos de 40 nm, entre 400 y 1000 nm); una cámara matricial monocroma *BASLER SCA1400-17FM*, con salida digital; patrones *Ocean Optics SSH* y *SSL* y otros de diseño propio, así como la imprescindible infraestructura de apoyo básico (equipamiento para pulido y control de calidad de muestras, eventual análisis de éstas por microsonda electrónica, fuentes de alimentación estabilizadas para el equipo de análisis de imagen) e informática.

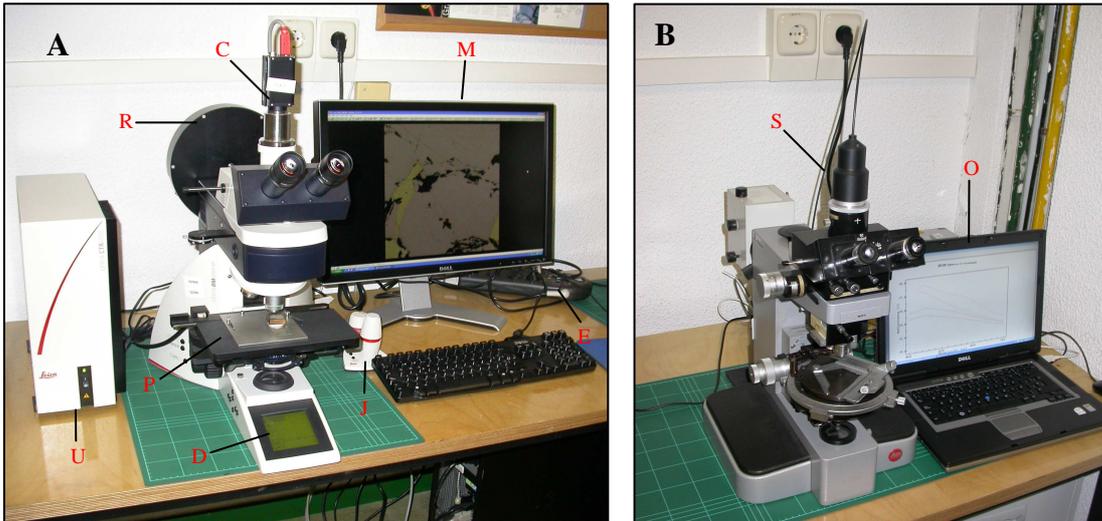


Figura 1. A: Microscopio motorizado adaptado para análisis de imagen, con: rueda de filtros (R), cámara digital B/N (C), monitor (M), estabilizador de tensión UPS (E), mando automatizado (J), panel de control (D), platina automatizada XYZ (P) y unidad de control (U). B: Fotografía del Microfotómetro de Reflexión Espectral, en la que se aprecian el sensor del espectrómetro Hamamatsu (S) y el ordenador de control (O).

Paralelamente, se define un proceso de validación para controlar la fiabilidad de las medidas y, en su caso, establecer márgenes estadísticos y causas de error. A este efecto, se contrastan las medidas reales obtenidas a través de la cámara de vídeo, usando como referencia los valores determinados sobre las mismas muestras con el microfotómetro de reflexión espectral diseñado para el proyecto, que dispone de un espectrómetro *Hamamatsu* instalado sobre microscopio *Leitz Orthoplan* y actualiza precursores ya ensayados (Bernhardt, 1987), instrumento suficientemente contrastado como para ofrecer datos precisos y reproducibles.

Para transferir los resultados a la industria, se han de abordar y definir los problemas desde un doble punto de vista: el del análisis digital de imagen y el de la inteligencia artificial (en concreto, los sistemas expertos), con el objetivo de lograr una automatización completa. El primero establece los algoritmos que permiten obtener las medidas cuantitativas (valores y ratios de bandas espectrales) y morfológicas (distribución y diversos parámetros texturales de las fases minerales) relacionadas con los problemas industriales (p.ej. mineralúrgicos o de contaminación ambiental), el segundo ha de integrar todos los pasos, desde el movimiento y monitorización de las medidas sobre la muestra, hasta el tratamiento de la información para obtener resultados útiles y estadísticamente representativos, así como el auto-aprendizaje del sistema para mejorarlo con la propia información que se genera en cada aplicación. Todo este proceso exige (Castroviejo, 1999) una puesta a punto rigurosa del sistema (Pirard, 1999 a y b) y una continua retroalimentación para la detección de posibles fallos. Implica también la programación combinada de los medios instrumentales para la adquisición automatizada de imágenes (microscopio y rueda de filtros), a fin de hacer realidad un método con un rendimiento suficiente para que sea útil (transferible) a la industria.

APLICACIONES. Entre las aplicaciones previstas, se cuenta el ensayo sobre problemas reales de la industria y de protección ambiental. Así como el planteamiento de otras aplicaciones no investigadas en el presente proyecto, ya sea a minerales diferentes (áridos, rocas ornamentales, carbones : Catalina et al., 2003...), ya a partículas (contaminación), ya con técnicas no ópticas (tratamiento de imágenes digitales obtenidas por microscopía electrónica), las cuales podrían ser objeto de un proyecto ulterior. Se ha de precisar, no obstante, que el objetivo esencial del presente proyecto se sitúa en el campo de la microscopía óptica. Las técnicas más sofisticadas, como la microscopía electrónica, tienen sus ventajas y sus inconvenientes –se ha hecho un estudio comparativo al respecto, Castroviejo et al., 2002-, pero exigen una inversión muy superior a la planteada en el proyecto y además situarían su aplicación fuera del alcance de la mayor parte de las empresas consideradas. Esto pondría en peligro la esperada transferencia a la industria, aparte de exigir para el proyecto un presupuesto muy elevado. Por esta razón, se centra la investigación en una técnica asequible en la mayor parte de los casos, como es la microscopía óptica.

INNOVACIONES. La innovación diseñada aspira a contribuir a una optimización de las *decisiones de inversión* (conocimiento de la calidad y comportamiento previsible de las menas) y del *proceso de producción* (mayor eficiencia mineralúrgica), así como a la *evitación de daños ambientales* (eliminación de minerales nocivos), mediante los siguientes resultados transferibles:

- nueva sistemática para reconocimiento microscópico de menas metálicas, extensible con adaptaciones a otros tipos de minerales
- aplicación general y no diseñada exclusivamente para un problema único
- automatización del proceso de reconocimiento, mediante análisis digital de imagen y diseño de un sistema experto
- cuantificación inmediata de los contenidos modales y de los parámetros morfológicos necesarios para la solución de problemas industriales
- inmenso incremento del rendimiento frente a los procedimientos no automáticos actualmente en uso, al ofrecer unos resultados no sólo más rápidos sino aptos para su tratamiento matemático directo, por estar digitalizados desde el principio;
- este incremento del rendimiento posibilita además el abordar problemas más complejos, implicando millones de medidas, que serían irrealizables por métodos manuales, como se ha confirmado ya en los trabajos realizados para la cuantificación del contenido de sulfuros en carbones (Coz et al., 2003);
- validación mediante la referencia a medidas externas (Microfotómetro de reflexión espectral y Bases de datos IMA/COM, Criddle and Stanley, 1993) y control estadístico del diseño experimental;
- automatización del proceso de medición, mediante microscopio motorizado y autoenfoco
- posibilidad de definición rápida y versátil de: problemas ligados a la mineralogía, con los consiguientes beneficios para la industria (materiales, mineralurgia: Castroviejo et al., 1999 a, b), problemas ambientales (efecto de escombreras abandonadas, contaminación: Pantoja, 1999; Berrezueta et al., 2002, 2004) o científicos (cuantificación de asociaciones minerales, de sus texturas y distribución, etc., vbgr. Berrezueta et al, 2005);
- posibilidad de transferencia a corto plazo, con la ventaja añadida de que el equipamiento es de coste relativamente reducido; se espera que pueda ser de utilidad no sólo en Europa (eliminación de pirita en carbones, mineralurgia, medio ambiente...), sino particularmente en Iberoamérica, donde se registra una intensa actividad minera, la cual no siempre dispone de técnicas adecuadas para ser a un tiempo eficiente y respetuosa con el medio ambiente (pequeña minería, Castroviejo y Berrezueta, 2003), a pesar del enorme peso que dicho sector tiene en la economía;
- en el futuro podría abordarse con ventaja la extensión de la metodología a distintos problemas industriales, entre los que se cuentan no solamente los de concentración e impacto ambiental de menas metálicas, sino otros muchos no contemplados directamente en la primera fase, como el tratamiento de minerales transparentes o ganga (aspecto en el que cada vez se insiste más para lograr un buen proceso mineralúrgico), la discriminación y cuantificación de factores de fragmentación natural en éstos (exfoliación, defectos cristalinos, orientación y

heterogeneidades en agregados, microfisuras), el control y actuación sobre los problemas de molienda y la evitación de finos, el difícil reconocimiento automatizado de silicatos y minerales formadores de rocas, la cuantificación modal, textural y granulométrica de áridos, etc. La nueva situación creada con los fuertes incrementos recientes del precio del petróleo y su repercusión en la economía de los procesos mineralúrgicos, particularmente en la molienda, junto con el fuerte incremento actual de la demanda mundial de metales y minerales, aumenta la importancia de estas técnicas que permiten predecir el comportamiento de los minerales e incrementar la eficiencia del proceso o incluso poner a punto tecnologías alternativas.

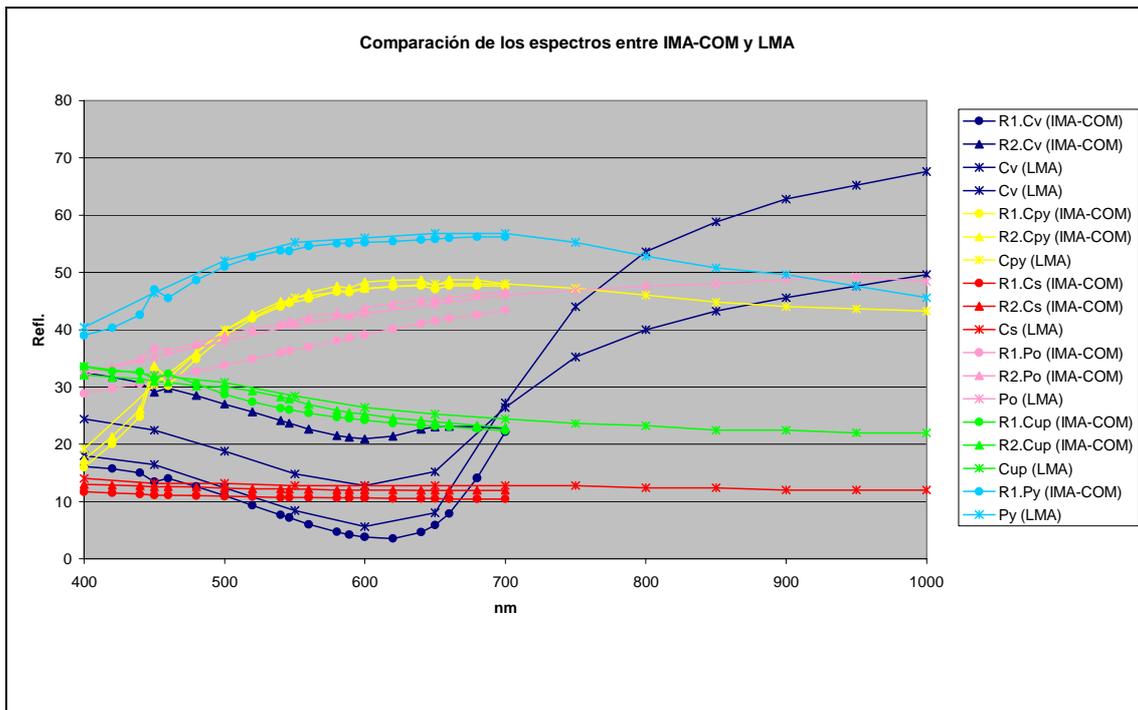


Figura 2. Valores de reflectancia medidos en el Laboratorio de Microscopía Aplicada (LMA), para el rango espectral 400 a 1000 nm (símbolo *), comparados con los publicados por IMA-COM (rango visible: 400 a 700 nm, símbolos ● para R1 y ▲ para R2). Los minerales comparados son Covellina (Cv), Calcopirita (Cpy), Casiterita (Cs), Pirrotita (Po), Cuprita (Cup) y Piritita (Py). Hay una clara coincidencia de las curvas de ambas series en el rango visible y se evidencia por primera vez el cambio de comportamiento de minerales como Covelina, Calcopirita, Pirrotita y Piritita en el rango infrarrojo cercano (700 – 1000 nm).

RESULTADOS Y CONCLUSIONES. Los trabajos en curso permiten avanzar algunas conclusiones a partir de los actuales resultados preliminares:

- 1) la segmentación de las principales menas metálicas es posible con un margen de confianza suficiente, si la puesta a punto del equipo es adecuada (estabilización, control de ruidos, corrección de derivas...), aplicando criterios no sólo físicos sino también geológicos, como la tipología / asociación mineral del yacimiento;
- 2) el trabajo en color mediante cámara 3CCD queda mejorado si se la sustituye por cámara B/N de investigación combinada con una rueda de filtros monocromadores (fig. 2): se obtienen valores más precisos y la tecnología actual permite una gran rapidez (microscopio automatizado);
- 3) los resultados son reproducibles y objetivos, como lo prueba la comparación entre los obtenidos con el equipo descrito y con el microfotómetro de reflexión espectral desarrollado para el Proyecto;
- 4) la ampliación del espectro medido al UV e IR cercanos (350 a 1000 nm) abre posibilidades inéditas para la identificación automatizada, como lo prueba por ejemplo la inversión de la relación de reflectancias entre calcopirita y pirrotita a partir de los 700 nm (los valores R de pirrotita son

superiores a los de calcopirita en los tramos IR medidos). Se está trabajando, en estos momentos, en la construcción de una base de datos que haga aprovechable esta información, ya que no se dispone en la literatura internacional de los valores de reflectancia fuera del espectro visible.

AGRADECIMIENTOS. Se reconocen los apoyos del Ministerio de Educación y Ciencia (Proyecto CGL2006_13688_C02_01) y de la Comunidad de Madrid (Ayuda Red de Laboratorios, rla207).

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Bernhardt, H.J. (1987). A Simple, Fully-Automated System for Ore Mineral Identification. *Mineralogy and Petrology*. Vol 36: Pag 241-245.
- Berrezueta E. (2004) Caracterización de Menas Metálicas mediante Análisis Digital de Imagen: investigación de un sistema experto aplicable a problemas mineros, Tesis Doctoral, Universidad Politécnica de Madrid, Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Minas de Madrid. 14-05-2004.
- Berrezueta, E., Castroviejo, R., Pantoja, F. y Álvarez, R. (2002). Estudio mineralógico y cuantificación por análisis digital de imagen de las menas auríferas de Nariño (Colombia). Aplicación a la mejora del proceso mineralúrgico. *Boletín Geológico y Minero*. (IGME). Vol. 113 (4). Pag 369 - 379.
- Berrezueta E., Castroviejo R. (2004). A low cost and widely applicable methodology of digital imagen analysis of ores for mineral and envirommental engineering. *Proceedings 32nd International Geological Congress*, Florence, Italy. Abstract Vol. Part I, pp 533-534.
- Berrezueta E., Castroviejo R., Ortiz F., Domínguez M.J., Ramos J.M. (2005) Aplicación del análisis de imagen a la caracterización de la Marmatita l.t. (Marmato, Colombia). *Res. XXV Reunion SEM*, Alicante, 4-7 julio 2005. *SEM Macla*, Nº 3, p. 47-50.
- Berrezueta E. y Castroviejo R. (2007) Reconocimiento automatizado de menas metálicas mediante análisis digital de imagen: un apoyo al proceso mineralúrgico. I: ensayo metodológico. *Rev. Metal*. Madrid, 43 (4), p. 294-309.
- Castroviejo, R. (1999). El Análisis Digital de Imagen en Mineralogía: ¿Útil o Quimera? Una crítica metodológica. *Bol. Soc. Esp. Mineralogía*, 22 A, pp. 31-32.
- Castroviejo, R., Chacón, E., Múzquiz, C. y Tarquini S. (1999) (a). A preliminary Image Analysis characterization of massive sulphide ores from the SW Iberian Pyrite Belt (Spain). *Geovision 99*, Int. Symp. on Imaging Appl. in Geology, Univ. Liège, Belgium, Pag 37-40.
- Castroviejo, R., López, A., Múzquiz, C. y Pirard, E. (1999) (b). Modal Image Analysis of metallic sulphide ores from the SW Iberian Pirite Belt (Spain). *Geovision 99*, Int. Symp. on Imaging Appl. in Geology, Univ. Liège, Belgium, Pag 41-44.
- Castroviejo, R., Berrezueta, E. & Lastra, R. (2002). Microscopic digital image analyses of gold ores. A critical test of the methodology, comparing Reflected Light and Electron Microscopy. *2002 Mineral & Metallurgical Processing Journal*. VOL. 19 NO. 2. Pag 102-109. Denver, Colorado.
- Castroviejo, R y Berrezueta, E. (2003). Mineralogía aplicada para la pequeña minería. XI Reunión de AIESMIN. San Juan - Argentina. 12 pp.
- 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).
- Coz E., Castroviejo R., Bonilla D., García Frutos F.J. (2003) Quantitative determination of modal content and morphological properties of coal sulphides by digital image analysis as a tool to check their flotation behaviour. *Fuel*, 82, pp. 1921-1929.
- Criddle, A.J. & Stanley, C. (1993). *Quantitative data file for ore minerals*. Third Edition. Chapman & Hall British Museum, Londres.
- Pantoja, F. (1999). Optimización del proceso de amalgamación en la pequeña minería del oro: mejora de la recuperación y disminución de las perdidas de mercurio. Tesis Doctoral. Facultad de Ciencias Geológicas, Universidad Autónoma de Madrid.
- Pirard E., Lebrun V., Nivart J.F. (1999 a). Optimal Acquisition of Video Images in Reflected Light Microscopy. *Microscopy and Analysis*, July 1999, pp. 9-11.
- Pirard, E. (1999, b). Colour image analysis in mineralogy. COM-IMA Short Course, Univ. Porto, Portugal, 1999.
- Pirard, E. (2004). Multispectral imaging of ore minerals in optical microscopy. *Mineralogical Magazine*, 68, pp. 323-333.