

APLICACIÓN DE LA VISIÓN ARTIFICIAL AL DESARROLLO DE SISTEMAS DE ANÁLISIS MICROSCÓPICO AUTOMATIZADO

Juan Carlos Catalina, Fernando Segundo, Gonzalo Fernández y David Alarcón

AITEMÍN, c/ Margarita Salas, 14 - Parque Leganés Tecnológico - 28919 Leganés (Madrid) - España

RESUMEN

Existen diversas técnicas de análisis microscópico cuya aplicación rutinaria en la industria resultaría muy beneficiosa para el control de suministros o de procesos. Sin embargo, la mayoría de estos análisis requieren disponer de personal altamente capacitado para su realización, lo que difícilmente está al alcance de la mayoría de las empresas. Por ello, AITEMIN acometió hace varios años una línea de trabajo cuyo objetivo es el desarrollo de sistemas de análisis microscópico automatizado que no precisen la intervención de personal especializado, y que sean fácilmente transferibles a la industria.

Este tipo de sistemas suelen estar integrados por un microscopio motorizado dotado de una cámara y por un programa informático especializado que controla ambos. El modo de funcionamiento es el siguiente: el operador introduce la preparación en el microscopio e indica al programa cuál es la zona que se desea analizar. A partir de ese instante, el programa toma el control del microscopio, y comienza a enfocar y adquirir automáticamente imágenes de dicha zona, que son procesadas mediante técnicas de visión artificial para extraer la información requerida para llevar a cabo el análisis.

Para que un sistema de análisis microscópico automatizado sea útil en aplicaciones industriales es necesario que sus resultados cumplan una serie de requisitos, entre los que destacan, además de la exactitud, la repetibilidad y la reproducibilidad. Es decir, el sistema debe garantizar la obtención de los mismos resultados a partir de una misma muestra, independientemente del operador, del equipo, y del emplazamiento donde esté situado. Sólo así podrán obtenerse medidas comparables, tanto en el tiempo como entre distintos centros. Si, además, el sistema automatizado reproduce el procedimiento de análisis manual empleado por los especialistas humanos y realiza las mismas medidas, sus resultados podrán ser fácilmente contrastados, lo que incrementará la confianza de los usuarios potenciales y contribuirá a extender su uso.

ABSTRACT

There are several microscopic analysis techniques whose routine application in the industry would be highly beneficial for supplies or processes control. However, most of these analyses require highly skilled personnel that is rarely available to most companies. Therefore, AITEMIN has been working in the past years on the development of automated microscopic analysis systems that would not require the participation of specialised staff and would be easily transferrable to industry.

This type of systems are typically composed of a motorised microscope coupled to a camera, which are controlled by a specialised computer programme. Operation is as follows: the operator places the slide on the microscope stage, and selects the zone to be analysed. Then, the programme takes control of the microscope and starts grabbing images within the zone, which are then processed by computer vision techniques in order to extract relevant information to carry out the analysis.

For an automated microscopic analysis system to be useful in industrial applications it is necessary that its results meet a series of requisites, of which repeatability and reproducibility are, besides accuracy, of paramount importance. That is, the system must provide always the same results for a given sample, independently of operator, equipment and location. Only in this way would measurements become comparable, both along time and between different centres. If the system also mimics the manual analysis procedure used by human specialists and carries out the same measurements, its results could be easily double-checked, increasing the confidence of potential users and contributing to extend its use.

INTRODUCCIÓN

El desarrollo de un sistema de análisis microscópico automático comprende dos actividades claramente diferenciadas:

- Por una parte se debe estudiar, diseñar, adquirir, integrar y poner a punto el **sistema de adquisición de imágenes**, que comprende tanto el hardware del sistema (microscopio motorizado, iluminación, cámara, ruedas de filtros, filtros, patrones, ordenador, etc) como el software necesario para manejarlo (programas para calibración del sistema, programas para adquisición manual y automática de imágenes calibradas de una preparación). Las imágenes de la cámara deben ser sometidas a un proceso de corrección para compensar el efecto de la falta de uniformidad de la iluminación, de los defectos del camino óptico, y de las diferencias de respuesta de los píxeles del sensor, de forma que estén referidas a una escala absoluta y sean independientes del sistema con el que se hizo la adquisición.
- Por otra se debe desarrollar el **programa de análisis** propiamente dicho, que en algunos casos trata de reproducir el procedimiento de análisis manual seguido por los especialistas, pero que en otros casos deberá ser desarrollado prácticamente desde cero cuando la técnica desarrollada sea innovadora. Esta actividad es la que normalmente presenta mayor dificultad, puesto que será preciso desarrollar algoritmos de proceso de imágenes específicamente concebidos para efectuar las distintas medidas, así como encontrar la forma de formalizar e incorporar al proceso de análisis el conocimiento y la experiencia de los especialistas.

La división del trabajo de desarrollo en estas dos actividades permite componer equipos de especialistas separados que pueden trabajar en paralelo con bastante autonomía. Por este motivo, no se suele emplear una versión unificada del software del sistema, sino que el proceso de análisis se lleva a cabo en dos fases: primero se ejecuta el programa de adquisición de imágenes para crear un directorio que contenga el conjunto de imágenes de una preparación y a continuación se ejecuta el programa de análisis que procesa las imágenes de dicho directorio.

La disponibilidad temprana de un sistema de adquisición de imágenes permite ir creando una "biblioteca" de imágenes de distintas muestras características que pueden ser aprovechadas para ensayar y poner a punto los algoritmos de análisis que vayan siendo desarrollados, sin necesidad de repetir una y otra vez el proceso de captura de imágenes de una preparación, que es la fase que más tiempo requiere. Asimismo, la posibilidad de repetir el análisis sobre exactamente las mismas series de imágenes permite comparar con precisión los resultados de distintos algoritmos de proceso para seleccionar el que presente mayores ventajas.

DESARROLLO DEL SISTEMA DE ADQUISICIÓN DE IMÁGENES

Los sistemas de análisis microscópico automatizado desarrollados por AITEMIN hasta la fecha están basados en el análisis de la reflectancia de la muestra mediante un microscopio óptico de reflexión. Esta reflectancia puede ser medida en unas condiciones de iluminación, polarización y banda espectral determinadas, dando lugar a una única imagen por campo, o en una serie de condiciones prefijadas, dando lugar a múltiples imágenes por campo. El uso de una sola imagen simplifica el proceso de adquisición y permite realizar el análisis de forma más rápida, mientras que el uso de múltiples imágenes aporta más información (medidas por píxel) para identificar los componentes de la muestra.

La selección del tipo de imágenes más adecuado vendrá dictada por las necesidades de cada aplicación concreta. Por ejemplo, un sistema de análisis de macerales y reflectancia de carbones unitarios sólo precisa una imagen monocroma centrada en 546 nm por campo (Catalina et al., 1995; O'Brien et al., 2003), mientras que el sistema de análisis petrográfico de mezclas de carbones requiere al menos tres imágenes por campo, cada una obtenida con un ángulo de polarización distinto, a partir de las cuales se calculaban dos imágenes sintéticas (Catalina et al., 2002; Catalina et al., 2003). En el otro extremo, el sistema de análisis de menas metálicas actualmente en desarrollo en el proyecto CAMEVA adquiere una imagen multiespectral VIS-NIR compuesta por 13 bandas equiespaciadas entre 400 y 1000 nm.

El rango de reflectancias en el que opera el sistema también viene determinado por la aplicación. En general se usan imágenes de 8 bits, que permiten representar 256 niveles de reflectancia, y la escala empleada se ajusta para cubrir el rango de reflectancias de interés. Por ejemplo, el sistema de análisis

de carbones unitarios emplea una escala de 0,02 % de reflectancia por cada nivel de gris, por lo que el fondo de escala corresponde al 5,1% ($255 \times 0,02\%$). Al adaptar el sistema para el análisis de mezclas de carbones industriales, se vió que los suministros de algunas centrales térmicas contenían antracitas con reflectancias superiores al 7 %, por lo que se fijó una escala de 0,033333 %, que dejó el fondo de escala en el 8,5 %. En el sistema de análisis de menas, dado que hay minerales con reflectancias muy altas, se ha decidido establecer una escala de 0,4 % para cubrir la totalidad de la banda de reflectancia.



Figura 1 - Aspecto del sistema de análisis de menas metálicas basado en un microscopio Zeiss. En la parte trasera se pueden ver la fuente luminosa y las ruedas de filtros, y en lo alto la cámara.

La figura 1 muestra el aspecto del sistema de análisis de menas metálicas, que está integrado por:

- Un microscopio Zeiss Axioskop 2 MOT para observación en luz reflejada dotado de platina y enfoque motorizados, que ha sido adaptado para permitir la toma de imágenes multispectrales tanto en el visible (VIS: 400-700 nm) como en el infrarrojo próximo (NIR: 700-1000 nm). Incorpora un adaptador 1.0x para cámara de vídeo de rosca C de 1", sin lentes.
- Una rueda de 16 filtros DTA, para intercalar filtros monocromadores entre la fuente luminosa y el microscopio bajo control del ordenador. En dicha rueda se han montado 13 filtros de interferencia con longitudes de onda nominales entre 400 y 1000 nm, con un espaciado de 50 nm y un paso de banda (FWHM) de 40 nm. Además, en la primera posición se ha colocado una combinación pancromática, compuesta por un filtro KG3 y un filtro de densidad neutra, que permite al operador observar la muestra normalmente sin deslumbrarse.
- Una rueda de 8 filtros Zeiss, para intercalar polarizadores orientados a distintos ángulos bajo control del ordenador. En esta rueda hay 4 polarizadores orientados a 0°, 45°, 90° y 135°, así como un filtro de densidad neutra que presenta una transmisividad similar. Ello permite adquirir imágenes tanto con luz no polarizada como con luz polarizada en distintos planos.
- Una cámara CCD monocroma de alta resolución con salida digital IEEE-1394 (FireWire). La cámara está dotada de un chip Sony ICX285AL (1392 x 1040 píxeles de 6,45 x 6,45 μm) cuya alta relación señal/ruido permite trabajar con una profundidad de 12 bits por píxel. La interfaz digital permite adaptar la exposición al nivel de señal disponible con cada filtro, lo que resulta necesario dada la composición espectral de la luz emitida por la lámpara halógena.
- Un ordenador con procesador Pentium 4 a 3 GHz, 512 MB de RAM, y gran capacidad de disco, dotado de una tarjeta FireWire.
- Dos patrones de reflectancia especular, uno de alta y otro de baja reflectancia.

El volumen de datos que es preciso recoger y almacenar por cada muestra depende de las dimensiones y del número de imágenes adquiridas por los distintos sistemas de análisis automatizado:

- El sistema de análisis de macerales y reflectancia de carbones unitarios captura entre 500 y 1000 campos de 640 x 512 píxeles centradas sobre un grano de carbón, por lo que una preparación requiere sólo unos pocos cientos de MB.
- El sistema de análisis petrográfico de mezclas de carbones captura entre 3 y 7 imágenes de 640 x 640 píxeles de cada campo, pero normalmente se guardan sólo tres bandas. Teniendo en cuenta que de cada preparación se obtienen de 500 a 1200 campos, se puede estimar unas necesidades de almacenamiento de hasta 2 GB.
- Está previsto que el sistema de análisis de menas metálicas capture 14 bandas de hasta 1432 x 1040 píxeles de cada campo, por lo que podría precisar hasta 20 MB por campo. Si se estima que el barrido de una preparación puede requerir entre 300 y 3000 campos, según el grado de cobertura, se puede deducir que serán necesarios de 4 a 60 GB por cada muestra.

En cualquier caso, para garantizar la exactitud y la reproducibilidad de los resultados, el sistema de adquisición ha de calibrarse previamente mediante un programa denominado “TomaPatron”, que permite realizar automáticamente las siguientes operaciones:

- Ajustar el tiempo de exposición de la cámara para cada una de las bandas de la imagen, de tal manera que el nivel de gris de la imagen del patrón de alta reflectancia se acerque lo más posible a la reflectancia correspondiente calculada para esa banda. Este proceso debe ser realizado cada vez que varíen las condiciones de funcionamiento de la lámpara.
- Determinar la disparidad del punto de enfoque óptimo entre las distintas bandas, mediante la realización de un enfoque cuidadoso en cada una de ellas sobre una muestra con suficiente contraste. Este proceso es necesario cuando se trabaja con imágenes multispectrales, porque los objetivos presentan una aberración cromática (corregida y desdeñable para la banda visible pero, a causa de dicha corrección, muy acusada para el UV y el NIR).
- Determinar la variación del centro óptico y de la escala de la imagen entre las distintas bandas, mediante el análisis de la imagen de un elemento que cuenta con un patrón regular de alto contraste cuidadosamente seleccionado. Este proceso sólo es necesario en imágenes multispectrales, porque los objetivos presentan pequeñas diferencias de comportamiento en función de la longitud de onda de la luz.
- Capturar imágenes de ambos patrones en cada una de las bandas. Estas imágenes serán usadas posteriormente para compensar la falta de uniformidad de la iluminación, el efecto del polvo y otras imperfecciones del sistema de adquisición, y establecer una correspondencia entre nivel de gris y reflectancia. Para evitar el efecto de las inevitables imperfecciones superficiales de los patrones (imagen 2 - izq.), se promedian las zonas libres de defectos de varias imágenes adquiridas en diferentes puntos del patrón (distribuidos según una rejilla de 4x4, por ejemplo).

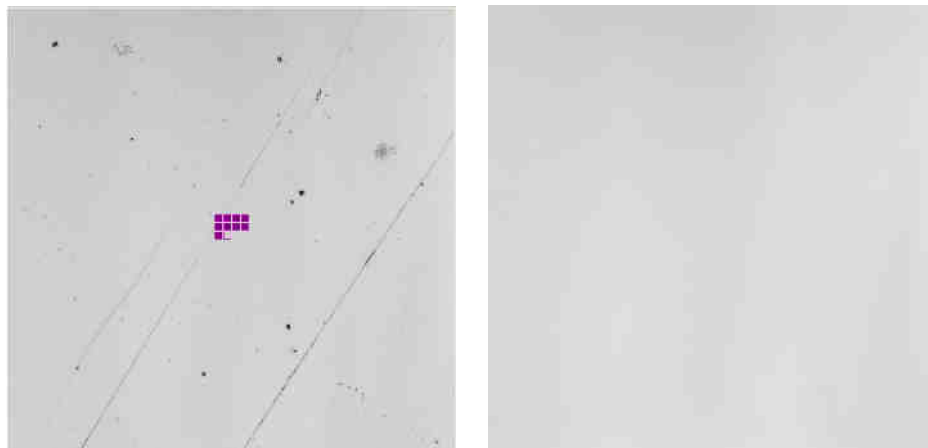


Figura 2 – Izquierda: Imagen en tiempo real del patrón de alta reflectancia, que presenta numerosos defectos superficiales. Derecha: Imagen resultante del proceso de promediado de zonas no defectuosas.

Es aconsejable esperar al menos 30 minutos a que se establezca la temperatura de la cámara y de la lámpara a su tensión de régimen nominal antes de proceder a realizar la calibración del sistema. Una vez calibrado, el sistema es capaz de adquirir imágenes en valores de reflectancia, lo que permite determinar directamente la reflectancia de una muestra en cada una de las bandas consideradas.

La adquisición de las imágenes de una preparación puede realizarse bajo control manual mediante el programa "TomaManual", que permite al operador recorrer la preparación y seleccionar los campos más interesantes para su captura inmediata. También es posible realizar una adquisición automática mediante el programa "TomaAuto", que permite al operador seleccionar la zona de interés de la preparación y luego realiza un barrido capturando automáticamente una serie de imágenes con el nivel de cobertura seleccionado por el operador.

DESARROLLO DEL PROGRAMA DE ANÁLISIS

El desarrollo del programa de análisis es el que habitualmente requiere más esfuerzo, puesto que debe llevar a cabo una misión muy compleja: sustituir al especialista humano en las tareas de observar la imagen de cada campo, realizar las pertinentes medidas sobre la imagen, y decidir qué componente está presente en uno o más puntos de la imagen.

En el desarrollo del primer sistema de análisis microscópico automatizado (el sistema de análisis de macerales y reflectancia de carbones unitarios), AITEMIN contó con la inestimable colaboración del Instituto Nacional del Carbón (INCAR, CSIC) de Oviedo, que aportó el experto a nivel mundial en petrografía del carbón cuya forma de proceder ante el análisis debía ser reproducida por el sistema. La solución finalmente adoptada fue desarrollar una serie de módulos de software con funciones muy específicas que imitaban distintas actividades concretas que el experto llevaba a cabo al realizar el análisis (Catalina et al., 1994), y que fueron ensamblados en una única aplicación informática:

- Por una parte, se desarrolló un sistema experto que contenía gran número de reglas que compendaban el conocimiento del experto sobre los distintos macerales y sobre la forma de abordar su reconocimiento en distintas situaciones. Esta base de conocimiento fue formalizada por un especialista en inteligencia artificial que estaba en contacto permanente con el experto, a partir de las explicaciones proporcionadas por éste.
- Por otra parte, se desarrolló una biblioteca de funciones que permitían procesar la imagen del campo y extraer de ella información acerca de distintas características o propiedades de las diversas zonas del grano existente en el centro de la imagen.
- Finalmente, se desarrolló la aplicación del análisis propiamente dicho, que iba procesando la imagen de cada uno de los campos adquiridos siguiendo las indicaciones del sistema experto para que éste pudiera determinar cuál era el maceral presente en el centro de la imagen. El programa llevaba asimismo cuenta del número y del área de los granos asignados a cada mineral, así como del histograma acumulado de la telocolinita y de cada uno de los grupos macerales de la muestra, y calculaba los porcentajes volumétricos correspondientes.

Los resultados obtenidos con este sistema (Catalina et al., 1995) fueron muy positivos:

- El análisis de la reflectancia mostraba una correlación perfecta con el procedimiento manual.
- El análisis maceral por grupos tenía niveles de error menores que los habituales en comparativas de análisis manuales entre distintos laboratorios.

En el desarrollo del sistema de análisis petrográfico de mezclas de carbones industriales se adoptó un procedimiento de trabajo bastante distinto al manual: la identificación de las zonas de telocolinita existentes en cada campo se llevaba a cabo sobre dos imágenes sintéticas (reflectancia máxima aparente y reflectancia mínima aparente). Estas imágenes se calculaban numéricamente mediante las fórmulas de Ting (Ting y Lo, 1978), a partir de tres imágenes del mismo campo adquiridas a través de polarizadores orientados a 0°, 45° y 90°. El uso de la imagen de reflectancia máxima permitía obtener picos nítidos en los histogramas de las antracitas, facilitando su identificación, y el uso de la imagen de reflectancia mínima permitía estimar la anisotropía, para descartar zonas de inertinita. Los resultados de este sistema fueron muy satisfactorios (Catalina et al., 2003).

Actualmente se está procediendo a desarrollar el software de análisis para el nuevo sistema de análisis de menas metálicas. Se ha puesto a punto ya una versión preliminar del programa que muestra

sucesivamente las imágenes de una serie en pantalla, y permite al operador observar las bandas individuales o una vista en falso color. El operador marca zonas rectangulares sobre los granos para extraer sus espectros, que se muestran en una gráfica y se guardan en un archivo de datos para su análisis. La imagen 3 muestra la ventana de dicho programa tras la selección de cuatro zonas en distintos minerales. En la parte derecha vemos los nombres asignados por el operador a cada zona, sus espectros, así como sus histogramas en la banda seleccionada (la 5, correspondiente a 550 nm). Para facilitar la identificación, los nombres y las curvas de cada zona se representan con el mismo color que el recuadro que la delimita en la imagen (la zona “activa” se indica con un recuadro blanco).

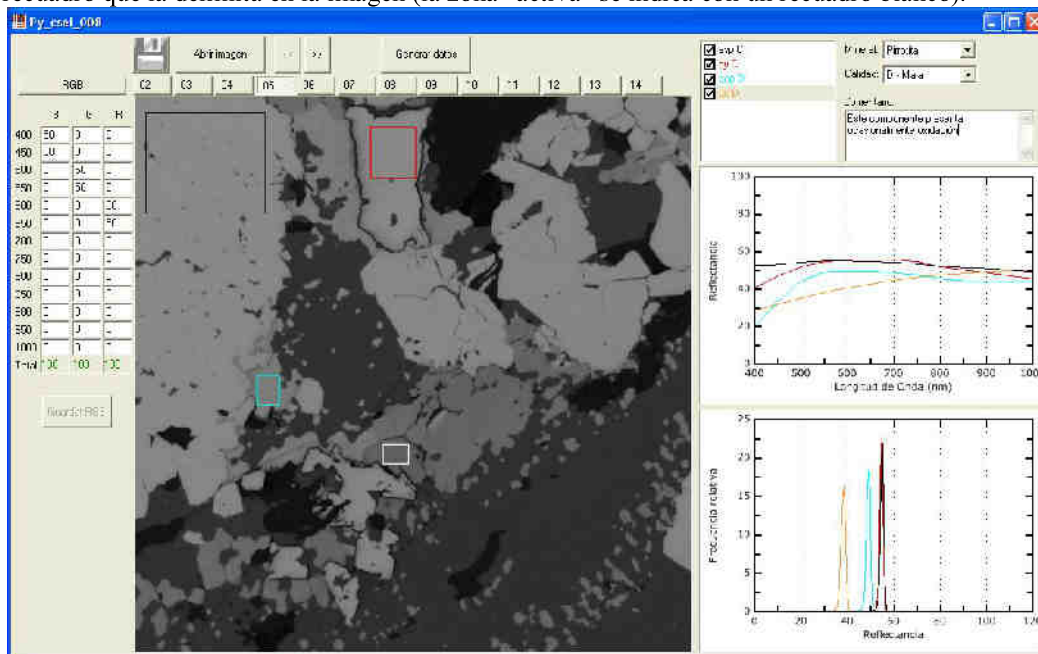


Figura 3 – Programa preliminar de análisis, que permite extraer información de distintos minerales

La aplicación genera un archivo que contiene los valores de reflectancia correspondientes a la moda y la desviación típica del histograma de cada una de las bandas, para cada una de las zonas marcadas. De esta forma, se puede generar una base de datos con información espectral de diversas muestras de cada uno de los minerales de interés, que permitirá en el futuro abordar la identificación automática de los minerales presentes en las muestras.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Catalina, J.C., Alarcón, D. & Prado, J.G. 1994. Automatic coal maceral analysis by means of expert system and computer vision. Second World Congress on Expert Systems. Moving Toward Expert Systems Globally in the 21st Century. Jay Liebowitz, editor. Cognizant Communication Corporation, New York.
- Catalina J.C., Alarcón D. & J.G. Prado 1995. Automatic maceral and reflectance analysis in single seam bituminous coals. Coal Science (J.A. Pajares and J.M.D. Tascón Ed.), p. 239-242. Elsevier, Amsterdam.
- Catalina, J.C., Alarcón, D., Llamas, B., Borrego, A.G. & Prado, J.G. 2002. Análisis petrográfico automático de mezclas de carbón por visión artificial. XI Congreso Internacional de Industria, Minería y Metalurgia.
- 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).
- O'Brien, G., Jenkins, B., Esterle, J. & Beath, H. 2003. Coal characterisation by automated coal petrography. Fuel 82, p. 1067–1073. Elsevier Science Ltd.
- Ting F.T.C. & Lo H.B. 1978. New techniques for measuring maximum reflectance of vitrinite and dispersed vitrinite in sediments. Fuel 57, p. 717-721. Elsevier Science Ltd.