

Capítulo 6:

CONCLUSIONES

El objetivo fundamental de esta tesis era abordar el problema de la obtención de la información que ofrece un espectro Raman, clave para la identificación no destructiva de materiales pictóricos de una obra de arte, y aportar una solución para la automatización del proceso de identificación independizándolo de la subjetividad ligada al juicio y la experiencia del investigador.

Así pues, la aportación principal de este trabajo consiste en el diseño e implementación de un sistema de identificación automática de pigmentos a partir de sus espectros Raman en el que, desde que se toma la medida del espectro hasta que se realiza la identificación del material artístico al que corresponde, no hay intervención del analista, es decir, el espectro no es interpretado por él en base a sus conocimientos y su experiencia. En su lugar, sistemas basados en técnicas de lógica difusa realizan las tareas necesarias para conseguir la identificación, esto es, aumentar la relación señal a ruido del espectro Raman, localizar las bandas Raman presentes en el espectro y tomar la decisión final que permite la identificación del pigmento medido según una base de datos de referencia. Se ha escogido esta técnica matemática ya que, como se ha puesto de manifiesto en esta tesis, es una herramienta que ofrece soluciones de procesado de señal que permiten aunar la experiencia y el conocimiento de los analistas expertos con los métodos objetivos que establecen las técnicas matemáticas en la resolución de problemas de toma de decisiones con datos imprecisos obtenidos experimentalmente. Los algoritmos diseñados en esta tesis, además de ser novedosos, aumentan las prestaciones de un equipo Raman dedicado al estudio del patrimonio cultural.

Las conclusiones que se derivan del trabajo de investigación que se presenta enlazan entre sí los temas tratados en el procesado de espectros Raman y son las que se exponen a continuación.

En esta tesis se demuestra que el filtro implementado mediante técnicas de lógica difusa presentado en el tercer capítulo reduce eficientemente tanto el ruido cósmico como el shot

presentes en los espectros Raman aumentando la relación señal a ruido de los mismos. Ello permite que la información Raman, que para la aplicación desarrollada en esta tesis se encuentra en la posición frecuencial de las bandas Raman presentes en el espectro, pueda ser obtenida de manera más eficiente. Además, es una técnica versátil y flexible, de fácil adaptación según las exigencias del filtrado. El estudio de los resultados obtenidos con el filtro ha confirmado que el filtro difuso reduce el ruido en el espectro preservando la forma de las bandas Raman y evitando el desplazamiento en la posición frecuencial de las bandas. En consecuencia, se mejora la relación señal a ruido del espectro y esto resulta de gran utilidad en la localización de las bandas para la identificación de los materiales de una obra de arte. Concretamente, en el capítulo 3 se ha elegido un parámetro de semejanza para cuantificar la mejora que introduce el filtrado en la relación señal a ruido del espectro; en el ejemplo presentado el valor de este parámetro de semejanza se triplica tras el filtrado.

Así mismo, el sistema difuso diseñado y presentado en el cuarto capítulo realiza una correcta detección automática de las bandas Raman presentes en un espectro, siguiendo un proceso semejante al que se sigue habitualmente en la localización visual. Esto hace que sea un sistema sencillo y rápido. Cabe destacar que debe elegirse un sólo parámetro (denominado umbral) en función del grado de confianza esperado en el resultado, esto es, cuanto mayor sea el umbral (centroide del desdifusor) elegido tendremos más seguridad de que todas las bandas detectadas existen en el espectro y son información Raman, aunque algunas bandas de intensidad débil podrían no detectarse. Además, el método de localización es independiente de la línea de base del espectro (provocada por fluorescencia) y, por consiguiente, no es necesario eliminarla previamente a diferencia de los métodos que se basan en detección de máximos en los que sí es necesario eliminarla. Todo esto hace que el sistema diseñado sea fiable y eficaz.

La última etapa en el proceso de identificación es la toma de decisión del pigmento al que corresponde el espectro bajo análisis, a partir de las bandas localizadas en el espectro y de los patrones reconocidos. El diseño propuesto en el quinto capítulo realiza la identificación automática de forma correcta, teniendo en cuenta que la única información que manejamos es la posición frecuencial de las bandas; no se ha utilizado la información de la intensidad de las bandas, ya que estrictamente, el parámetro que es independiente de la frecuencia de la luz incidente en la muestra es la posición frecuencial de las bandas, es decir, el desplazamiento Raman. La intensidad de las bandas puede variar en función del láser utilizado para realizar la medida y, en caso de utilizarse, debería contemplarse una base de datos para cada frecuencia de excitación.

El resultado de este trabajo es, por tanto, el diseño de tres bloques: filtro, localizador automático e identificador automático, que pueden ser utilizados bien por separado, o bien conjuntamente, permitiendo automatizar todo el proceso de identificación de pigmentos a partir de la obtención del espectro Raman del material pictórico bajo análisis. Estos sistemas, aunque presentan la misma estructura, resuelven los distintos problemas planteados en la tesis mediante el diseño y la implementación de los conjuntos de reglas difusas adecuadas a cada uno de ellos. En resumen, se ha demostrado que el procesado de señal basado en lógica difusa es una herramienta útil para obtener la señal deseada y extraer los datos proporcionados por los espectros Raman en la aplicación concreta a la identificación automática de pigmentos artísticos, cumpliéndose satisfactoriamente los objetivos propuestos para este trabajo y presentados en el capítulo 0.

Cabe resaltar que, aunque los procesos de localización de bandas Raman e identificación de las mismas son totalmente automáticos, la interpretación de los resultados obtenidos por el identificador corresponde finalmente al analista. Existen algunos casos en los que se puede dar alguna ambigüedad, por ejemplo pigmentos distintos que tienen espectros con bandas fundamentales coincidentes, o materiales que corresponden a mezclas de pigmentos en las que no todas las bandas referenciadas en la base de datos aparecen entre las localizadas, o bandas falsas localizadas que corresponden a alguna banda de un pigmento documentado, etc. En estos casos es el analista el que debe tomar la decisión de a qué pigmento o pigmentos corresponde el espectro obtenido en función del grado de coincidencia de las bandas localizadas con las de los patrones, del número de bandas detectadas, de si se encuentra la banda fundamental entre ellas y, si resulta necesario y se dispone de información sobre la obra analizada, del color del pigmento analizado, de la paleta del presunto autor, de la época en la que pudo ejecutarse la obra, etc.

Todos los sistemas diseñados se han implementado en MATLAB, tienen un tiempo de procesado muy corto y han sido probados con espectros obtenidos en el laboratorio de espectroscopía Raman procedentes de estudios sobre diversas obras de arte pertenecientes a centros públicos con los que se colabora (Museo Frederic Marès, Archivo de la Corona de Aragón, Museo de Historia de la Ciutat) o a colecciones particulares.

Finalmente quedaría plantear cuáles pueden ser las líneas futuras de investigación. Como continuación natural del trabajo desarrollado en esta tesis, una línea futura inmediata podría ser el estudio comparativo de las prestaciones que ofrecen otras técnicas de procesado. Además, aún queda mucha investigación por delante en la aplicación de la espectroscopía Raman al mundo del arte y en particular a la identificación de pigmentos. Por ejemplo, en el

análisis de obra moderna en la que se utilizan pigmentos fabricados después de la revolución industrial del siglo XIX, los espectros Raman muestran diferencias muy sutiles entre los distintos pigmentos y por tanto, probablemente, será necesario el desarrollo de nuevos modelos de identificación. También resultaría interesante la ampliación a otros campos como por ejemplo el de los análisis clínicos en medicina, donde la técnica de espectroscopía Raman tiene un amplio rango de aplicaciones, gracias sobre todo a la detallada información que ofrece la medida de espectros Raman en tiempo real. Esta prestación que ofrece la espectroscopia Raman, de realizar medidas en tiempo real, puede ser aplicada a técnicas de diagnóstico, realizando la monitorización de un proceso mediante el análisis Raman, ya sea en el mundo del arte para la conservación o restauración del patrimonio artístico y cultural o en el de los análisis médicos para investigaciones en este campo.