

## **Espectroscopia óptica de imagen para el control de calidad en la industria alimentaria, monitorización en línea de procesos de soldadura y discriminación de patologías tumorales en tejidos cancerígenos**

### **Hyperspectral imaging for diagnosis and quality control in agri-food and industrial sectors and tissue biopsy**

P. Beatriz Garcia-Allende<sup>(1,2,S,\*),</sup> Olga M. Conde Portilla<sup>(2,S)</sup>

1. Institute for Biological and Medical Imaging (IBMI) – Helmholtz Zentrum München, Ingolstädter Landstraße 1, 85764 Neuherberg, Germany.

2. Grupo de Ingeniería Fotónica, Universidad de Cantabria, Avda. de los Castros S/N 39005 Santander, Spain.

(\*) Email: [pb.garcia-allende@helmholtz-muenchen.de](mailto:pb.garcia-allende@helmholtz-muenchen.de)

S: miembro de SEDOPTICA / SEDOPTICA member

Recibido / Received: 29/06/2012. Revisado / Revised: 03/09/2012. Aceptado / Accepted: 10/09/2012.

DOI: <http://dx.doi.org/10.7149/OPA.45.3.345>

#### **RESUMEN:**

La espectroscopia óptica se ha empleado en múltiples campos, ya sea (bio-)químicos, biológicos, físicos o astronómicos debido a su gran especificidad, ya que cada sustancia es distinguible de forma inequívoca de todas las demás a partir de sus propiedades espectrales. El análisis de un material no homogéneo requeriría o bien enfocar sucesivamente el sistema óptico punto a punto sobre la superficie del mismo, replicar los sistemas de iluminación y captación o realizar una única medida promedio tal y como hace la espectroscopia clásica. Una forma mucho más eficiente de abordar el análisis y posterior establecimiento de la distribución local de las propiedades de materiales no homogéneos es mediante la técnica denominada espectroscopia de imagen, que consiste en la medida simultánea de las componentes ópticas del espectro y la localización espacial del mismo. Debido a sus características de operación mínimamente invasivas esta técnica puede dar solución a multitud de problemas en diversos sectores industriales y en la diagnosis médica. Este trabajo revisa un compendio de soluciones basadas en espectroscopia de imagen hiperspectral para diversas problemáticas existentes en los sectores agroalimentario, industrial y de diagnosis médica. Dichas contribuciones se realizaron dentro del marco de la tesis doctoral de Pilar Beatriz Garcia Allende titulada "Contribuciones al desarrollo de nuevas técnicas de interpretación y sistemas basadas en espectroscopia de imagen". Inicialmente se describe el diseño y montaje de un sistema de imagen hiperspectral así como su validación para la discriminación en línea de producción de materias primas. A continuación se describe la extensión de su aplicación a la monitorización en tiempo real de procesos de soldadura y finalmente, se analizarán las modificaciones necesarias en el sistema de adquisición para extraer información relevante de tejidos biológicos que permitan determinar el margen quirúrgico en cirugías de resección de cáncer. Adicionalmente se presentará un método automático de interpretación de la firma espectral de esparcimiento que permite no solamente determinar el margen tumoral sino también la distinción de diversas patologías asociadas a éste.

**Palabras clave:** Espectroscopia Óptica, Imagen Hiperspectral e Imagen Infrarroja, Evaluación no Destructiva, Reconocimiento de Patrones, Procesado de Imágenes, Algoritmos, Sistemas y Dispositivos para el Procesado de Imagen y Aplicaciones de la Imagen Óptica en la Industria, la Medicina y la Ciencia.

**ABSTRACT:**

Optical spectroscopy has been utilized in various fields of science, industry and medicine, since each substance is discernible from all others by its spectral properties. However, optical spectroscopy traditionally generates information on the bulk properties of the whole sample, and in applications in the agri-food industry for example some product properties result from the heterogeneity in its composition. This monitoring is considerably more challenging and can be successfully achieved by the so-called hyperspectral imaging technology, which allows the simultaneous determination of the optical spectrum and the spatial location of an object in a surface. In addition, it is a non-intrusive and non-contact technique which gives rise to a great potential for industrial applications and it does not require any particular preparation of the samples, which is a primary concern in food monitoring. This work illustrates an overview of approaches based on this technology to address different problems in agri-food, industrial and life-sciences sectors. The reviewed contributions comprise the doctoral thesis of Pilar Beatriz Garcia Allende and are focused on the development of new interpretation techniques and systems based on imaging spectroscopy. A hyperspectral imaging system was originally designed and tested for raw material on-line discrimination, which is a key factor in the input stages of many industrial sectors. The combination of the acquisition of the spectral information across transversal lines while materials are being transported on a conveyor belt, and appropriate image analyses have been successfully validated in the tobacco industry. Secondly, the use of imaging spectroscopy applied to online welding quality monitoring is discussed and compared with traditional spectroscopic approaches in this regard. Lastly, by means of the interpretation of light scattering signals that occur in biological tissue, a surgical guidance system to delineate tumor margins was developed.

**Key words:** Optical Spectroscopy, Hyperspectral and Infrared Imaging, Non-destructive Evaluation, Pattern Recognition, Image Processing, Algorithms, Systems and Devices for Image Processing, Optical Imaging Applications in Industrial Sectors, Medicine and Science.

**REFERENCIAS Y ENLACES / REFERENCES AND LINKS**

- [1]. W. Schmidt, *Optical Spectroscopy in Chemistry and Life Sciences*, Wiley-VCH, Weinheim (2005).
- [2]. C. T. Willoughby, M. A. Folkman, M. A. Figueroa, "Application of hyperspectral imaging spectrometer system to industrial inspection", *Proc. SPIE* 2599, 264-272 (1996).
- [3]. N. Gat, S. Subramanian, J. Barhen, N. Toomarian, "Spectral imaging applications: remote sensing, environmental monitoring, medicine, military operations, factory automation, and manufacturing", *Proc. SPIE* 2962, 63-77 (1997).
- [4]. M. Freebody, "Hyperspectral imaging: seeing the big picture", *Optics & Laser Europe* 8, 17 (2009).
- [5]. H. Grüger, T. Egloff, M. Scholles, F. Zimmer, M. Müller y H. Schenk, "Pushbroom NIR hyperspectral imager using MOEMS scanning grating chips", *Proc. SPIE* 6887, 68870E (2008).
- [6]. P. B. García Allende, *Contribuciones al Desarrollo de Nuevas Técnicas de Interpretación y Sistemas basados en Espectroscopia de Imagen*, PhD Thesis, Universidad de Cantabria (2010).
- [7]. S. C. A. Alfaro, D. S. Mendoza, M. S. Matos, "Emission spectrometry evaluation in arc welding monitoring system", *J. Mater. Process. Tech.* 179, 219-224 (2006).
- [8]. B. W. Pogue, S. Jiang, S. Srinivasan, X. Song, H. Dehghani, K. D. Paulsen, T. D. Tosteson, C. Kogel, S. K. Soho, S.P. Popack, "Near-infrared scattering spectrum differences between benign and malignant breast tumors measured in vivo with diffuse tomography", *Biomedical Topical Meetings*, ThB1 (2004).
- [9]. P. B. Garcia-Allende, F. Anabitarte, O. M. Conde, F. J. Madruga, M. Lomer, J. M. Lopez-Higuera, "Infrared imaging spectroscopic system based on a PGP spectrograph and a monochrome infrared camera", *Proc. SPIE* 6941, 694118 (2008).
- [10]. J. M. Mirapeix Serrano, *Contribuciones a la Supervisión y Optimización de Procesos de Soldadura mediante Espectroscopia Óptica de Plasmas*, PhD Thesis, Universidad de Cantabria (2007).
- [11]. V. Krishnaswamy, P. J. Hoopes, K. S. Samkoe, J. A. O'Hara, T. Hasan, B. W. Pogue, "Quantitative imaging of scattering changes associated with epithelial proliferation, necrosis, and fibrosis in tumors using microsampling reflectance spectroscopy", *J. Biomed. Opt.* 14, 014004 (2009).

- [12]. B. W. Pogue, G. C. Burke, "Fiber optic bundle design for quantitative fluorescence measurement from tissue", *Appl. Opt.* **37**, 7429-7436 (1998).
- [13]. H. J. van Staveren, C. J. M. Moes, J. van Marle, S. A. Prahl, M. J. C. van Gemert, "Light scattering in Intralipid 10% in the wavelength range of 400-1100 nm", *Appl. Opt.* **30**, 4507-4514 (1991).
- [14]. J. Workman Jr., A. W. Springsteen, *Applied Spectroscopy: A Compact Reference for Practitioners*, London Academia Press Limited, London (1998).
- [15]. M. S. Park, J. Y. Choi, "Theoretical analysis on feature extraction capability of class-augmented PCA". *Pattern Recogn.* **42**, 2353-2362 (2004).
- [16]. T. B. Moeslund, *Principal Component Analysis. An Introduction*, Technical report, Aalborg University CVMT 01-02 (2001-2002).
- [17]. O. M. Conde, M. Amado, P. B. Garcia-Allende, A. Cobo, J. M. Lopez- Higuera, "Evaluation of PCA dimensionality reduction techniques in imaging spectroscopy for foreign object detection", *Proc. SPIE* **6565**, 65650M (2007).
- [18]. D. Michie, D. J. Spiegelhalter, C. C. Taylor, *Machine Learning. Neural and Statistical Classification*, Prentice Hall (1994).
- [19]. P. B. Garcia-Allende, O. M. Conde, J. Mirapeix, A. Cobo, J. M. Lopez-Higuera, "Quality control of industrial processes by combining a hyperspectral sensor and Fisher's linear discriminant analysis", *Sensor. Actuat. B - Chem.* **129**, 977-984 (2008).
- [20]. L. Gomez-Chova, L. Calpe, G. Camps-Valls, J. D. Martin, E. Soria, J. Vila, L. Alonso-Corda, J. Moreno, "Feature selection of hyperspectral data through local correlation and SFFS for crop classification", *IEEE Int. Geosci. Remote Sens. Symp. Proc.* **1**, 555 - 557 (2003).
- [21]. K. Fukunaga, *Introduction to Statistical Pattern Recognition*, Academic Press, San Diego, 2<sup>nd</sup> Ed. (1990).
- [22]. P. B. Garcia-Allende, O. M. Conde, A. M. Cubillas, C. Jauregui, J. M. Lopez-Higuera, "New raw material discrimination system based on a spatial optical spectroscopy technique", *Sensor. Actuat. A - Phys.* **135**, 605-612 (2007).
- [23]. A. Nogueira, M. R. de Oliveira, P. Salvador, R. Valadas, A. Pacheco, "Classification of internet users using discriminant analysis and neural networks", In *NGI 2005: Next Generation Internet Networks: Traffic Engineering*, pp. 341 - 348 (2005).
- [24]. G. Girouard, A. Bannari, A. El Harti, A. Desrochers, "Validated spectral angle mapper algorithm for geological mapping: comparative study between Quickbird and Landsat-TM", *Geo-imagery bridging continents*, Istanbul, July 12-23, pp. 599-604 (2004).
- [25]. P. B. Garcia-Allende, O. M. Conde, J. Mirapeix, A. M. Cubillas, J. M. Lopez-Higuera, "Data processing method applying principal component analysis and spectral angle mapper for imaging spectroscopic sensors", *IEEE Sens. J.* **8**, 1310-1316 (2008).
- [26]. P. B. Garcia-Allende, O. M. Conde, M. Amado, A. Quintela, J. M. Lopez-Higuera, "Hyperspectral data processing algorithm combining principal component analysis and K nearest neighbours", *Proc. SPIE* **6966**, 69660H (2008).
- [27]. V. Vapnik, *The Nature of Statistical Learning Theory*. Springer (1995).
- [28]. P. B. Garcia-Allende, F. Anabitarte, O. M. Conde, J. Mirapeix, F. J. Madruga, J. M. Lopez-Higuera, "Support vector machines in hyperspectral imaging spectroscopy with application to material identification", *Proc. SPIE* **6966**, 69661V (2008).
- [29]. D. Manolakis, R. Lockwood, T. Cooley, J. Jacobson, "Is there a best hyperspectral detection algorithm?", *Proc. SPIE* **7334**, 733402 (2009).
- [30]. O. M. Conde, A. Cobo, P. B. Garcia-Allende, J. Mirapeix, J. M. Lopez-Higuera, "Sistema de captura de imágenes multispectrales optimizado para la discriminación de materiales", Solicitud de patente española, Número de solicitud: P201100858, Fecha de prioridad: 08/08/2011.
- [31]. J. Mirapeix, P. B. García-Allende, A. Cobo, O. M. Conde, J. M. Lopez-Higuera, "Real-time arc welding defect detection and classification with principal component analysis and artificial neural networks", *NDT & E Int.* **40**, 315-323 (2007).
- [32]. P. B. García-Allende, J. Mirapeix, O. M. Conde, A. Cobo, J. M. Lopez-Higuera, "Arc-welding spectroscopic monitoring based on feature selection and neural networks", *Sensors* **8**, 6496-6506 (2008).

- [33]. P. B. García-Allende, J. Mirapeix, O. M. Conde, A. Cobo, J. M. Lopez-Higuera, "Defect detection in arc-welding processes by means of the line-to-continuum method and feature selection", *Sensors* **9**, 7753-7770 (2009).
- [34]. J. Mirapeix, P. B. García-Allende, A. Cobo, O. M. Conde, J. M. Lopez-Higuera, "Feasibility study of imaging spectroscopy for on-line welding quality monitoring", *Appl. Opt.* **48**, 4735-4742 (2009).
- [35]. A. Wax, "Low-coherence light-scattering calculations for polydisperse size distributions". *J. Opt. Soc. Am. A* **22**, 256-261 (2005).
- [36]. P. B. Garcia-Allende, V. Krishnaswamy, P. J. Hoopes, K. S. Samkoe, O. M. Conde, B. W. Pogue, "Automated identification of tumor microscopic morphology based on macroscopically", *J. Biomed. Opt.* **14**, 034034 (2009).
- [37]. P. B. Garcia-Allende, V. Krishnaswamy, K. S. Samkoe, P. J. Hoopes, B. W. Pogue, O. M. Conde, J. M. Lopez-Higuera, "Automated interpretation of scatter signatures aimed at tissue morphology identification", *Proc. SPIE* **7368**, 73681C (2009).
- [38]. P. B. Garcia-Allende, O. M. Conde, V. Krishnaswamy, P. J. Hoopes, B. W. Pogue, J. Mirapeix, J. M. Lopez-Higuera, "Automated ensemble segmentation of epithelial proliferation, necrosis, and fibrosis using scatter tumor imaging", *Proc. SPIE* **7715**, 77151B (2010).
- [39]. A. M. Laughney, V. Krishnaswamy, P. B. Garcia-Allende, O. M. Conde, W. A. Wells, K. D. Paulsen, B. W. Pogue, "Automated classification of breast pathology using local measures of broadband reflectance", *J. Biomed. Opt.* **9**, 066019 (2010).
- [40]. A. Eguizabal, A. Laughney, P. B. Garcia-Allende, V. Krishnaswamy, W. Wells, K. D. Paulsen, B. W. Pogue, J. M. Lopez-Higuera, O. M. Conde, "Blind breast tissue diagnosis using independent component analysis of localized backscattering response", *Proc. SPIE* **8230**, 823014 (2012).
- [41]. A. Eguizabal, A. Laughney, P. B. Garcia-Allende, V. Krishnaswamy, W. Wells, K. D. Paulsen, B. W. Pogue, J. M. Lopez-Higuera, O. M. Conde, "Enhanced tumor contrast during breast lumpectomy provided by independent component analysis of localized reflectance measures", *Proc. SPIE* **8230**, 823010 (2012).
- [42]. A. Eguizabal, A. Laughney, P. B. Garcia-Allende, V. Krishnaswamy, W. Wells, K. D. Paulsen, B. W. Pogue, J. M. Lopez-Higuera, O. M. Conde, "Textural analysis of optical scattering for identification of cancer in breast surgical specimens", IEEE International Symposium on Biomedical Imaging - ISBI (2012).
- [43]. A. Eguizabal, A. Laughney, P. B. Garcia-Allende, V. Krishnaswamy, W. Wells, K. D. Paulsen, B. W. Pogue, J. M. Lopez-Higuera, O. M. Conde, "ICA-guided delineation of breast cancer pathology", IEEE International Symposium on Biomedical Imaging - ISBI (2012).

## 1. Introducción

La *espectroscopia* óptica engloba todos aquellos métodos analíticos basados en la interacción de la luz y la materia [1] y durante más de doscientos años se ha empleado en múltiples campos debido a su gran especificidad. La medida de parámetros ópticos en función de la longitud de onda (espectro) se convierte en la huella dactilar de la materia bajo análisis (*firma espectral*), de forma que ésta es distinguible de forma inequívoca de todas las demás a partir de sus propiedades espectrales.

El análisis de un elemento distribuido espacialmente, i.e. un material no homogéneo podría abordarse desde tres puntos de vista: enfocando sucesivamente el sistema óptico punto a punto sobre la superficie, replicando los sistemas de iluminación y captación, o

realizando un promedio tal y como hace la espectroscopia óptica clásica. El primero de ellos, aunque tedioso, puede resultar viable. El segundo puede ser inadmisibles por temas de costes. Lo mismo sucede con el último de ellos que será insuficiente en muchas situaciones prácticas como la diagnosis médica o el control de calidad en la industria en los que se requiere una identificación localizada del espectro. Una forma mucho más eficiente de abordar el análisis y posterior establecimiento de la distribución local de las propiedades de materiales no homogéneos es mediante la técnica denominada *espectroscopia de imagen*. Ésta consiste en la medida simultánea de las componentes ópticas del espectro del fenómeno de interacción luz-materia que se esté considerando en cada momento (absorción, reflexión, esparcimiento, etc.) y la localización espacial del mismo. Esto da

lugar a un cubo o conjunto de datos en un espacio de tres dimensiones, dos espaciales ( $x$  e  $y$ ) y una espectral (longitud de onda,  $\lambda$ ) [2]. Los dispositivos empleados para la obtención de este cubo de datos se denominan *espectrógrafos de imagen* y existen varios tipos en función del modo de adquisición. Podría servir un espectrómetro convencional, siempre que se fuera enfocando sucesivamente el sistema óptico a cada punto tal y como se muestra en la Fig. 1, y se realice un barrido en el tiempo de ambas dimensiones espaciales,  $x$  e  $y$ . Son los espectrógrafos de tipo *plumero* (*whiskbroom*) y se trata de una aproximación lenta y cara. Una segunda posibilidad consistiría en el escaneado en el tiempo de la dimensión espectral, de forma que la imagen se captura un plano espectral a continuación de otro. Este tipo de espectrógrafos se denominan de *mirada fija* (*staring*), como las cámaras convencionales que recogen información en las bandas del rojo, azul y verde (RGB, *Red, Green, Blue*). El principal inconveniente de esta alternativa es la superposición espectral de los píxeles que se produciría si la escena estuviera en movimiento, así como la baja resolución espectral. Si la variación del fenómeno óptico en función de la longitud de onda es rápida sólo sería posible realizar estimaciones adecuadas empleando dispositivos caros, basados en filtros sintonizables acusto-ópticos o cristales líquidos, para poder medir múltiples bandas (*multispectral*). Por último, la tercera opción consiste en medir simultáneamente las componentes ópticas de todos los puntos de una línea y escanear en el tiempo la segunda dimensión espacial como se hace con los espectrógrafos tipo *cepillo* (*pushbroom*) que adquieren tanta información espectral como los espectrómetros convencionales. Es cierto que aún resulta necesario barrer la segunda dimensión espacial, pero si se tiene en cuenta los campos tradicionales de aplicación de la espectroscopia óptica, como, por ejemplo, la clasificación de materiales, esto no supone mayor problema. Se puede solventar sin más que ubicar el sistema verticalmente y desplazar el material bajo el mismo en una sola dirección, tal y como hace una cinta transportadora en una planta de producción industrial.

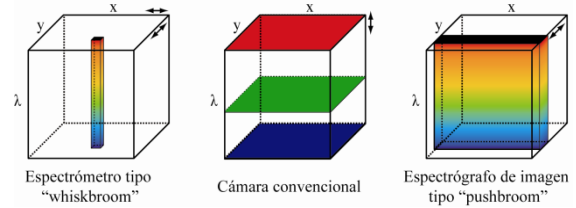


Fig. 1: Posibles métodos de adquisición del cubo de datos en espectroscopia de imagen.

El empleo de la espectroscopia de imagen procede de aplicaciones militares y de sensado remoto [3]. Sin embargo, debido a sus características de operación no intrusivas ni destructivas, se preveía que podía dar solución a multitud de problemas en diferentes sectores industriales (agroalimentario, farmacológico, químico, etc.) mejorando notablemente sus rendimientos económicos [3]. En aplicaciones industriales se utilizan tradicionalmente técnicas de visión o instrumentos que realizan medidas espectrales de manera puntual [4]. Este tipo de sistemas son caros puesto que sólo son capaces de muestrear áreas de objeto muy reducidas. Los sistemas hiperespectrales permiten analizar áreas mucho mayores pero su empleo era inicialmente imposible debido al gran tamaño de los dispositivos de adquisición. Incluso actualmente, que se dispone de instrumentación de tamaño adecuado, queda mucho por hacer. Los factores más limitantes son la complejidad y el elevado coste de los sistemas globales [5]. Una razón fundamental es el precio de los detectores de dos dimensiones, fundamentalmente en el rango del infrarrojo cercano. Por otra parte, la salida de dichos sistemas tiene que ser proporcionada de manera directa facilitando su aplicación, es decir, tienen que ser *usables*. Sin embargo, como consecuencia de la medida de centenares o miles de bandas espectrales para cada píxel de la imagen se requieren complejos e intensivos procesos de análisis de datos. Se precisa por tanto generación de conocimiento y técnica en relación con la espectroscopia de imagen previa a su empleo en procesos. El abaratamiento de costes requiere el desarrollo de dispositivos (fuentes de luz, espectrómetros de imagen y sensores) con características especiales y optimizados para aplicaciones concretas. Por otro lado, es necesario investigar en técnicas de compresión y de análisis de datos temporalmente eficientes que permitan aplicarla

no sólo en laboratorios, sino también en líneas de producción. En este trabajo se revisan la investigación y desarrollo de métodos y dispositivos para espectroscopia de imagen llevados a cabo por la autora durante su periodo de tesis doctoral, que abordaron los dos problemas relacionados con la espectroscopia de imagen hiperespectral (*HIS*, *Hyperspectral Imaging*) en su estado de evolución actual. Estas contribuciones se realizaron desde un punto de vista práctico. Así, mediante la aplicación directa en un conjunto de escenarios (sectores agroalimentario, soldadura y biomédico) se demostró que el conocimiento generado permitía lograr las altas velocidades de inspección y los rigurosos controles de calidad requeridos en dichos sectores [6].

La problemática que se pretendía resolver en el sector agroalimentario consistía en la clasificación de materia prima (hojas de tabaco) a la entrada de la planta de producción de la compañía Altadis, ubicada en el área industrial de Solares (Cantabria, España), que aparece entremezclada con una gran variedad de elementos espurios como consecuencia del proceso de cosecha manual. De los posibles ámbitos en los que se requiere la detección de cuerpos extraños, se seleccionó este grupo multinacional del sector del tabaco y de la distribución (*Alliance Tobacco Distribution*) como consecuencia de la solicitud conjunta de un proyecto de I+D a nivel nacional. A esta coyuntura, se sumó el hecho de que el material publicado en relación con la caracterización espectral de los componentes químicos del tabaco o de cómo codificar óptimamente el color de sus hojas era muy escaso. Más escasas aún e incluso prácticamente nulas, eran las referencias a la incorporación de este tipo de información en sistemas más complejos de clasificación en tiempo real de la materia prima. Esto puede ser porque el tabaco no interesa, pero la necesidad empresarial impulsa esta motivación con el convencimiento de que el conocimiento generado puede trasladarse a otros campos. Se trata, por tanto, de un nicho de generación de conocimiento y además orientado a la resolución de un problema real, lo cual sentaría la base para nuevos proyectos con ésta u otras industrias. En este trabajo se presenta el diseño de un sistema basado en espectroscopia de imagen, y por tanto,

mínimamente invasivo, capaz de realizar esta tarea de identificación del material. Asimismo, se han desarrollado y comparado diversas técnicas de compresión e interpretación de las imágenes hiperespectrales para la detección en línea de cuerpos extraños en tabaco.

Las contribuciones de esta tesis en el área industrial se posicionaron en la monitorización de procesos de soldadura, centrándose de manera particular en la soldadura de arco. En el empleo de la espectroscopia óptica de plasmas para la supervisión de la calidad de la soldadura, el principal inconveniente viene motivado por la incertidumbre en la selección de las líneas de emisión más adecuadas para calcular la señal de control empleada convencionalmente, esto es, la temperatura electrónica del plasma ( $T_e$ ) [7]. Además, la clasificación de los mismos en función de sus posibles causas resulta compleja. Si esto fuera posible el sistema de soldado tendría información disponible en tiempo real acerca del parámetro a modificar (e.g. corriente de soldadura, flujo del gas de aporte, etc.) lo cual permitiría una reducción considerable de la frecuencia de aparición de los defectos, mejorándose, en consecuencia, la productividad. Por último, la estimación de la  $T_e$  implica un procesado complejo que tiene una elevada implicación en el rendimiento temporal del sistema de supervisión. Este escenario llevó al desarrollo de técnicas de análisis espectral que aquí se describen orientadas a la clasificación de defectos así como a la exploración de las posibilidades de la espectroscopia de imagen para la clasificación en línea de defectos de soldadura en diversos procesos de validación en un entorno industrial.

Si en los sectores anteriores la relevancia de las contribuciones, entendida como el interés social y científico de las mismas, era importante, en el caso de las ciencias de la vida ésta adquiere una nueva dimensión en tanto que nos afecta de forma directa a todos y cada uno de nosotros. Cualquier avance en este campo es de vital importancia y si éste se produce, como se describirá en las siguientes líneas, en el campo de la detección precoz y control del tratamiento del cáncer su relevancia es mucho mayor, pues es la primera causa de mortalidad entre los hombres, y la segunda entre las mujeres, tras las

enfermedades cardiovasculares. Las principales modalidades de tratamiento existentes actualmente son: cirugía, radioterapia y quimioterapia. El éxito de la cirugía, que es la modalidad terapéutica más antigua, viene condicionado fuertemente por la capacidad de determinar con la mayor exactitud posible los límites del tumor para no provocar daños innecesarios en el órgano donde se originó o en los órganos vecinos, pero tampoco dejar restos de tumor residual. Esto pone de manifiesto una clara necesidad de desarrollar sistemas de guiado quirúrgico que ayuden a los cirujanos a visualizar con exactitud los márgenes del tumor. Desde un punto de vista muy general, la característica más evidente de la malignidad epitelial es un incremento en la densidad de células epiteliales que además tienen tamaños de núcleos y nucleolos superiores a lo habitual. Esto provoca variaciones en el esparcimiento de la luz en el tejido y estas variaciones llevan, por tanto, codificados los cambios morfológicos y patofisiológicos producidos en el tejido a nivel microscópico y se pueden emplear con propósitos de diagnóstico [8], por ejemplo, como herramienta de guiado en la resección de tumores, si previamente se diseñan técnicas de compresión y visualización en tiempo real. El desarrollo de una herramienta automática capaz de clasificar los cambios en el esparcimiento en función del tipo de tejido biológico asociado será el último objetivo a abordar en este resumen.

Estos objetivos fueron llevados a cabo haciendo uso de la capacidad de la espectroscopia de imagen hiperespectral para combinar las imágenes tradicionales en dos dimensiones espaciales con la medida de las propiedades espectrales de cada píxel. El establecimiento de estos mapas de parámetros ópticos se puede realizar mediante distintos métodos que serán revisados y comparados en la siguiente sección en función de su aplicabilidad para cada sector concreto. La Sección 3 describirá las técnicas de compresión y análisis de datos para la obtención de figuras de mérito y parámetros de calidad, i.e. tipo de material, soldadura correcta o defectuosa, patología, etc. a partir de las imágenes hiperespectrales. A continuación se presentaran los resultados obtenidos para demostrar la consecución de los

objetivos planteados y finalmente se esbozarán las conclusiones principales.

## 2. Sistemas basados en espectroscopia óptica de imagen

### 2.a. Montajes experimentales

La *reflectancia difusa* es el fenómeno de interacción luz-materia más apropiado para la caracterización de los materiales a clasificar, ya que la disposición de los materiales sobre la cinta transportadora en la planta de producción impide la realización de medidas en transmisión. La reflectancia difusa se produce cuando la radiación incidente penetra en la muestra de material y viaja a través de la misma siendo parcialmente absorbida y dispersada. De este modo el espectro de la radiación reflejada en direcciones arbitrarias lleva codificada la composición química de la muestra, permitiendo su clasificación. En la caracterización de la materia prima se han empleado dos sistemas hiperespectrales en los rangos visible e infrarrojo cercano. En ambos se hace uso del espectrógrafo de imagen tipo *pushbroom* ImSpector (Specim Ltd.) en sus versiones V10E y N24E que cubren los rangos espectrales de 400 a 1000 nm y de 1000 a 2400 nm, respectivamente. La fuente de iluminación empleada en ambos sistemas constaba de dos focos halógenos Taxley MX500, con una potencia cada uno de aproximadamente 500W. El módulo de sensado es en el rango inferior una cámara monocroma de alto rendimiento, Pixelink PL-A741 (1280 x 1024 píxeles), cuyo rango espectral abarca de 350 a 1000 nm, mientras que en el rango del infrarrojo cercano se empleó la cámara XEVA-FPA-2.5-30 de Xenics cuyo detector es de HgCdTe (850-2500 nm). Las cámaras se conectan a un ordenador personal que se emplea para control y adquisición. Por último, la óptica de entrada que precede a los espectrógrafos para el ajuste de las dimensiones de la línea de visión son una lente Navitar Zoom 7000 y Pentax C1614M (C31634), respectivamente, ambas con montura-C y que permiten el control manual del enfoque y la apertura numérica. Las especificaciones de los sistemas resultantes tras los exhaustivos procesos de calibración se resumen en la Tabla I. Para mayor información

en referencia a los mismos se remite al lector a consultar [9].

En el caso de la soldadura de arco será la espectroscopia de emisión la que proporcionará información valiosa acerca de los procesos industriales en los que se analiza la radiación luminosa emitida. Aunque típicamente la espectroscopia de emisión, designada como espectroscopia óptica de plasmas, se emplea para identificar qué elementos y en qué porcentajes están participando en un determinado proceso, también permite, con el procesado adecuado, aportar conocimiento sobre otras variables del proceso, i.e. la aparición de defectos. De hecho, los procesados desarrollados se demostraron primeramente para los espectros clásicos (entiéndase de una dimensión) adquiridos durante una tesis doctoral previa realizada en el mismo grupo de

investigación [10], y posteriormente se extendió su aplicación a las imágenes hiperespectrales adquiridas mediante el empleo del sistema anteriormente descrito para el rango Vis-NIR durante diversos procesos de soldadura de arco simulando soldaduras correctas y defectos. El empleo de este sistema en los sectores industrial y agroalimentario, así como las imágenes hiperespectrales adquiridas en cada caso se resume en la Fig. 2.

La aplicación del sistema hiperespectral tal y como se ha descrito hasta este momento a la determinación del margen quirúrgico en cirugías de resección de cáncer plantea un primer problema que es la complejidad del procesado que se requeriría para la interpretación de las imágenes adquiridas. Esto se debe a que la luz reflejada difusamente ha sufrido la influencia combinada de la absorción y el esparcimiento y

TABLA I  
Resumen de las principales especificaciones de los sistemas de adquisición hiperespectrales

	VIS-NIR (ImSpector V10E)	NIR (ImSpector N24E)
Rango espectral del espectrógrafo (nm)	400-1000	1000-2400
Resolución espectral (nm)	2.8	8
Tamaño de imagen (número de píxeles)	1024 (eje espectral) x 2048 (eje espacial)	256 (eje espectral) x 320 (eje espacial)
Longitud de la línea de vista (nm)	20	143
Resolución espacial ( $\mu\text{m}$ )	41.67	446.88
Resolución espacial después del promediado ( $\mu\text{m}$ )	208.35	2234.40

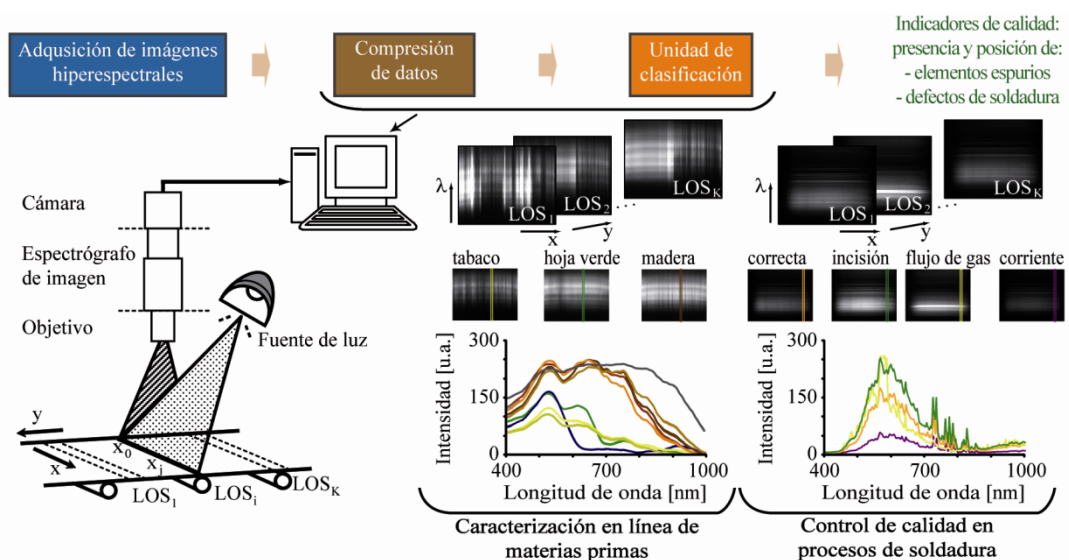


Fig. 2: Diagrama de bloques global del sistema de imagen hiperespectral diseñado para aplicaciones en los sectores industrial y agroalimentario.



no es posible determinar si los cambios medidos en ella reflejan cambios en la absorción, el esparcimiento o ambos. Por ello si se van a emplear para la clasificación las variaciones en el esparcimiento como consecuencia del incremento en la densidad de las células y la variación en los tamaños de sus núcleos y nucléolos, será necesario diseñar un sistema de imagen que facilite la adquisición de esta señal y la desligue en la mayor medida posible de la absorción debida a los distintos cromóforos existentes. Este es precisamente el objetivo del sistema diseñado por Krishnaswamy et al. [11] mediante la aseguración de que las áreas de iluminación y detección son inferiores a la longitud promedio de esparcimiento de la luz en el tejido en el rango de longitudes de onda de interés (típicamente 100  $\mu\text{m}$  [12]). De este modo los fotones incidentes son esparcidos una única vez y la señal detectada es en gran medida independiente de la absorción local. Se remite al lector a consultar [11] para una descripción detallada del sistema, así como los procedimientos de calibración y ajuste de los parámetros de esparcimiento de interés para la identificación de la morfología de los tejidos que son la amplitud y potencia de esparcimiento y la irradiancia de esparcimiento mediante la aproximación empírica de la teoría de Mie propuesta por Staveren et al. [13]. Las contribuciones de este trabajo en esta área consisten en la interpretación automática de estos parámetros para la delineación precisa del tejido tumoral así como la distinción de diversas patologías tumorales dentro del mismo.

## **2.b. Extracción de la información relevante de las imágenes hiperspectrales**

Los esquemas de procesado empleados parten de la medida de los diferentes parámetros ópticos (reflectancia difusa, emisión atómica y esparcimiento) y constan en todos los casos de dos etapas, tal y como se reflejaba en la Fig. 2. La primera consiste en una reducción del volumen de datos o espacio de características, entendiéndose característica como cada una de las bandas espectrales en que se mide la interacción. Esta reducción pretende extraer la información relevante de acuerdo a una figura de mérito concreta por determinar. Si esta etapa previa se realiza adecuadamente, no sólo

reducirá el tiempo empleado sino que mejorará además el rendimiento de la segunda fase que lleva a cabo la interpretación o clasificación de esa información. Las características o bandas espectrales más relevantes para la clasificación pueden determinarse mediante dos tipos de aproximaciones:

- Extracción de características: Se genera un subconjunto de nuevas características por medio de combinaciones de las características existentes.
- Selección de características: Se elige un subconjunto de entre las características ya existentes, escogiendo las que contienen más información relevante.

La implementación de la etapa de compresión de datos del sistema se basó inicialmente en el *Análisis de Componentes Principales* (PCA, *Principal Component Analysis*) [14]. Es uno de los métodos de extracción de características más comunes en la reducción de la dimensionalidad que generalmente selecciona las características mediante el método clásico o método-m, en el que las componentes a mantener o descartar se eligen en función de la varianza de los datos. Sin embargo, en la evaluación de dicha varianza no se tiene en cuenta la pertenencia de clase, por lo que puede que las componentes elegidas no sean las óptimas para una posterior clasificación [15]. Existen dos alternativas para resolver este problema: tener en cuenta las clases individuales en la selección de las componentes o modificar inicialmente los datos mediante la introducción de información relativa a la clase a la que pertenecen. En la primera de ellas se calcula una determinada distancia entre clases, medida-J o SEPCOR [16] y se seleccionan aquellas componentes para las que la distancia de separación entre categorías sea máxima. En la segunda opción se convierte el algoritmo PCA en un procedimiento supervisado [15]. Todas estas alternativas se compararon cualitativa y cuantitativamente [17]. Posteriormente se desarrollaron unidades de compresión basadas en el *Análisis del Discriminante Lineal* (LDA, *Linear Discriminant Analysis*) [18] en el que la dimensión del espacio transformado es siempre el número de clases menos uno, i.e. el análisis de dos clases proporciona directamente el clasi-

ficador [19] y la *Selección Secuencial Flotante hacia Adelante* (SFFS, *Sequential Floating Forward Selection*) [20] que es una de las múltiples alternativas dentro de los algoritmos de selección de características y permite solventar la desventaja fundamental de las técnicas de extracción en cuanto que no es posible establecer una correlación entre las componentes seleccionadas y la firma espectral del material analizado.

## 2.c. Generación de indicadores de calidad y figuras de mérito

A pesar de que las imágenes hiperespectrales contienen una cantidad ingente de información acerca de las propiedades ópticas de los objetos, únicamente la presencia y posición de los materiales espurios, de defectos de soldado o la existencia de malignidad son de interés en cada uno de los sectores de aplicación considerados. Esta segmentación de las imágenes en áreas que exhiben el mismo comportamiento espectral se lleva a cabo en la *etapa final de clasificación* que genera los denominados indicadores de calidad y figuras de mérito mediante una interpretación cualitativa de las firmas espectrales previamente optimizadas. A continuación se citan, brevemente y en relación con el primer campo de aplicación, los algoritmos empleados de los múltiples tipos que existen [21] en función de su linealidad, del tipo de aprendizaje (supervisado o no supervisado), etc.

Inicialmente, se empleó una unidad de clasificación basada en las Redes neuronales artificiales (ANN, *Artificial Neural Networks*) [22], debido a su capacidad de procesamiento paralelo de información, no linealidad y su rápida adaptación a las dinámicas del sistema [23]. De este modo se lograron elevadas tasas de acierto en la clasificación, por lo que se dedujo que quizá algoritmos más sencillos, entendiendo sencillez como linealidad, eran suficientes para lograr una fiabilidad aceptable. Con este motivo se investigó en unidades de interpretación basadas en el Discriminante lineal de Fisher (FLD, *Fisher's Linear Discriminant*) [18] y el Mapeo del ángulo espectral (SAM, *Spectral Angle Mapper*) [24]. Este tipo de algoritmos son más eficientes desde el punto de vista temporal y más adecuados para su implementación en línea [19,25]. En todos los algoritmos la interpreta-

ción o clasificación debe realizarse en dos etapas: entrenamiento y fase de test. Esto implica una desventaja desde el punto de vista práctico, ya que la inclusión de nuevos materiales conlleva la parada y recalibración del sistema. Para solventar esta desventaja, se ha evaluado un sistema de clasificación basado en los  $K$  vecinos más cercanos (KNN, *K Nearest Neighbours*) [21]. Sin embargo, su implementación es computacionalmente costosa lo que contradice el objetivo de respuesta en tiempo real. Para minimizar esta complejidad se desarrollaron árboles binarios de almacenamiento de los datos [26]. Por último, y ya que las Máquinas de Vectores Soporte (SVM, *Support Vector Machines*) [27] estaban sustituyendo a las ANNs, se consideró conveniente la evaluación de sus prestaciones en los sectores de aplicación de este trabajo [28].

## 3. Resultados

### 3.a. Control de calidad en el sector agroalimentario

La Fig. 3 demuestra la viabilidad de los sistemas desarrollados para emplearse en aplicaciones en línea de producción en la industria tabacalera y compara los resultados obtenidos en función de las técnicas de compresión y clasificación empleadas. Se desarrollaron diversas alternativas tanto para el bloque de reducción de dimensionalidad como para la clasificación, cada una con sus correspondientes ventajas e inconvenientes, expresados normalmente en función de su exactitud y tiempo de ejecución. En algunos casos se buscaron, además, posibles soluciones a los inconvenientes planteados si la ventaja que se obtenía era relevante, es el caso de KNN y su elevado tiempo de ejecución, pero que evita paradas y reentrenamientos del sistema. No es posible, a pesar de los exhaustivos análisis comparativos realizados concluir un algoritmo concreto como el óptimo en sentido absoluto. Y ésta es precisamente la conclusión más importante que se debe extraer y que es la misma situación existente en el análisis de las imágenes de sensado remoto [29]. Otra conclusión muy importante de las contribuciones realizadas es que estas técnicas son aplicables a cualquier otra situación que

conlleve la discriminación de materiales. Solamente se requiere la caracterización adecuada de sus espectros y la adecuación de los algoritmos. La principal limitación para la aplicación de este tipo de sistemas en línea de producción es el requerimiento de fuentes de iluminación de elevada potencia. En el caso del sector agroalimentario esto no es posible pues desvirtuaría las propiedades de los alimentos. Si la potencia de iluminación es menor, se puede contrarrestar incrementando el tiempo de integración de los dispositivos de adquisición, pero eso empeora el rendimiento temporal del sistema. Una solución alternativa sería el empleo de fuentes de iluminación adaptativa, iluminación únicamente a las longitudes de onda óptimas de discriminación determinadas previamente mediante los algoritmos de selección de características [30].

### 3.b. Monitorización en línea de procesos de soldadura

Las técnicas de interpretación y sistemas basados en espectroscopia de imagen que se diseñaron para la resolución de problemáticas en el sector agroalimentario se extendieron a la monitorización en línea de la calidad en procesos de soldadura de arco demostrando, por tanto, que son extrapolables a otros entornos. En primer lugar, se diseñó una red neuronal artificial específica para la discriminación de soldaduras correctas y los defectos típicos como falta de penetración, reducción del flujo de gas de protección, etc. y las prestaciones en tiempo real de la misma se mejoraron mediante la aplicación previa del algoritmo PCA a los espectros de la radiación del plasma [31]. La Fig. 4 (izquierda) demuestra la validez de la técnica en la identificación de los defectos, que incluso mejora la capacidad de detección de la solución clásica basada en perfiles  $T_e$ . Además, permite obtener una clasificación de los posibles defectos y es más eficiente temporalmente puesto que evita las numerosas etapas previas que se requieren en la estimación de la temperatura electrónica (ecualización, eliminación de la radiación de fondo, etc.).

El empleo de algoritmos de selección de características supone una línea futura de investigación natural de esta técnica. Al estar la información que permite distinguir los eventos de la soldadura codificada en las líneas de emisión atómica, la posibilidad de relacionar las líneas discriminantes con las especies atómicas cobra especial interés, ya que proporcionaría mayor conocimiento sobre el proceso físico. Por ello se propuso la sustitución de la primera etapa basada en PCA por SFFS, que es igualmente válida para la detección de fallas tal y como se demuestra en la Fig. 4 (derecha) e indicó que las líneas de emisión relacionadas con el gas de aporte son más relevantes para la clasificación que las de los componentes fundamentales del material a soldar, que en este caso era acero inoxidable AISI-304 [32].

El interés cobrado por los perfiles  $T_e$  se debe a que, en ocasiones es suficiente con detectar la aparición del defecto sin establecer su causa concreta. El problema es que precisamente si éste es el objetivo que se persigue será

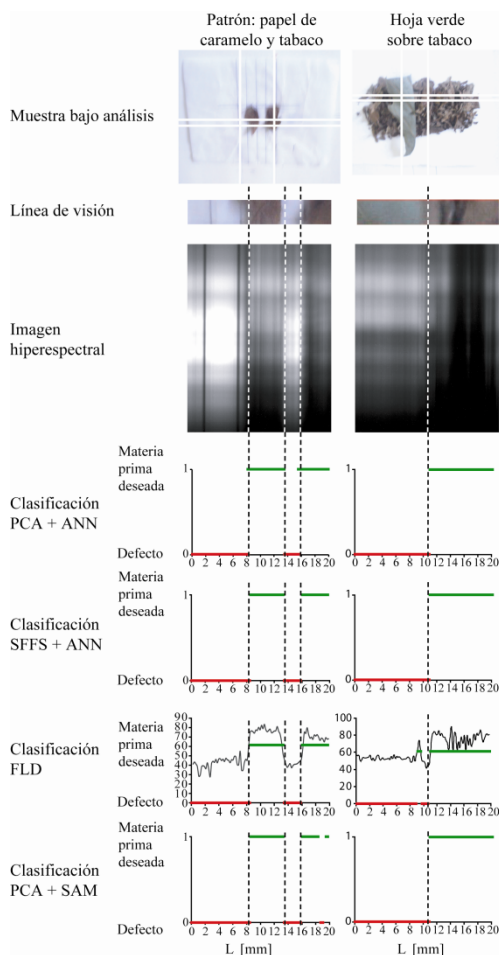


Fig. 3: Resultados de la clasificación de materiales. Las líneas verticales discontinuas ayudan a correlar los resultados de discriminación con la imagen hiperespectral (tercera línea) y una fotografía de la muestra bajo análisis (segunda línea).

interesante hacerlo lo más rápido posible. Una forma muy sencilla de determinar la aparición de defectos es mediante la obtención de los perfiles línea-continuo (cociente entre la intensidad de una línea de emisión integrada a lo largo de su perfil,  $I_L$ , y la intensidad de la radiación de fondo no integrada en zonas adyacentes a dicha línea,  $I_C$ ). El problema es que la capacidad de detección de esta técnica depende de forma significativa de la línea que se escoja y si se evalúan todas ya no es posible hacerlo rápidamente. Pero si, precisamente como se ha defendido en el párrafo anterior, una técnica basada en selección de características es capaz de identificar aquellas líneas discriminantes, se podrán usar los perfiles línea-continuo de estas mismas líneas como señal de monitorización de la calidad. La validez de esta afirmación queda demostrada a través de los

resultados presentados en la Fig. 5, donde la longitud de onda es la más relevante concluida por SFFS [33].

El empleo de la espectroscopia de imagen para la monitorización en línea de la calidad de la soldadura demostró que tampoco se requerían en este caso la identificación de las líneas de emisión, con el consecuente ahorro computacional, y que un esquema sencillo de procesamiento de las imágenes, como el mostrado en la Fig. 6 es suficiente para la identificación de los defectos [34]. Además, permite llevar a cabo análisis detallados sobre distintas regiones de la columna del plasma. Sin embargo, el coste del sistema hiperespectral, que ya es de por sí elevado, puede venir agravado en este caso por la necesidad de compatibilizarlo con las condiciones del entorno.

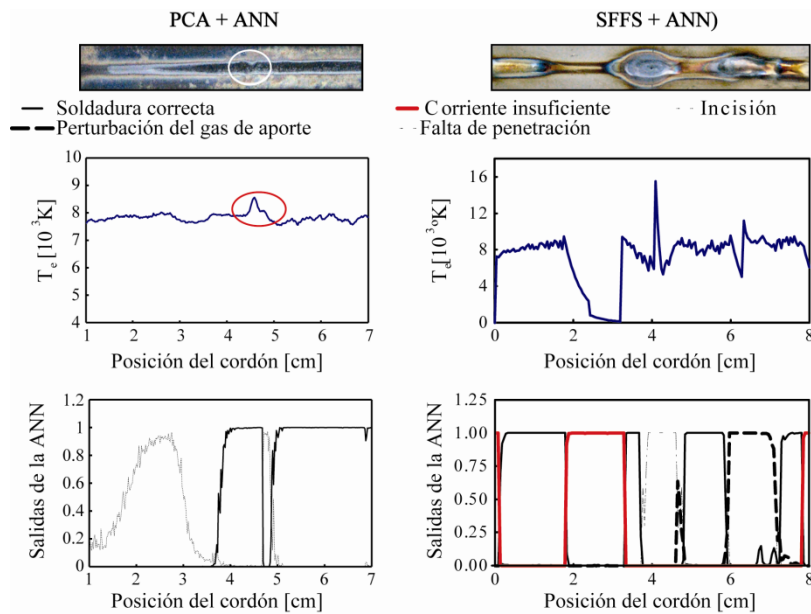


Fig. 4: Clasificación de defectos en cordones de soldadura mediante extracción (columna izquierda) o selección de características (columna derecha) y redes neuronales y comparación con la técnica tradicional basada en espectroscopia óptica de plasmas.

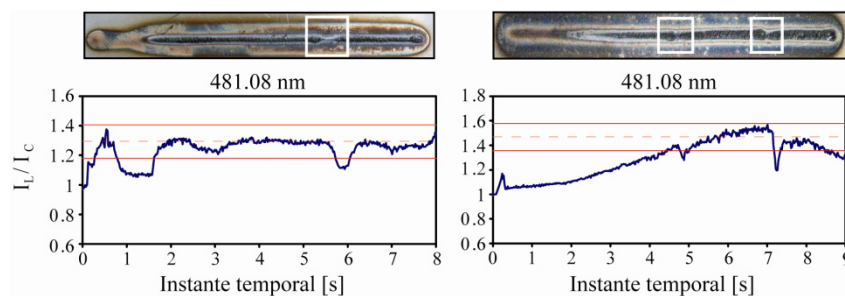


Fig. 5: Detección de defectos de soldadura mediante SFFS y perfiles línea-continuo.

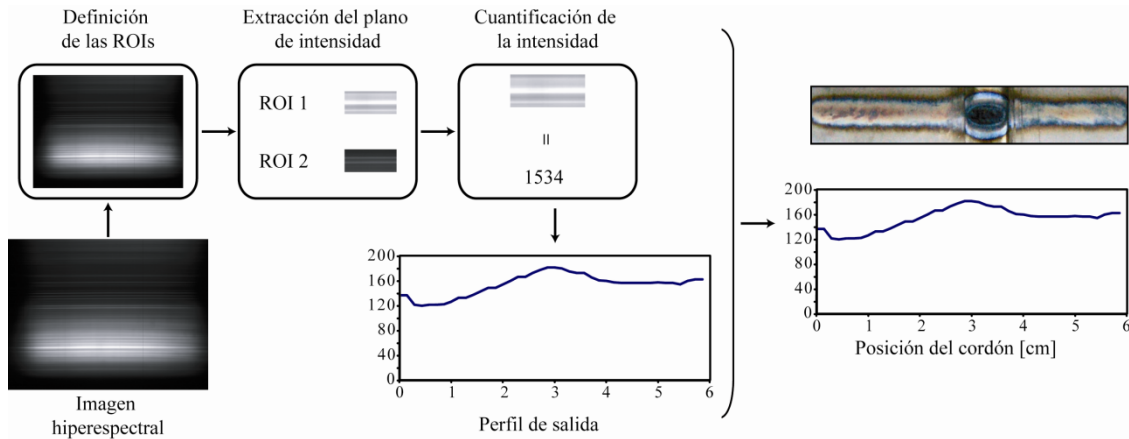


Fig. 6: Procesado de imágenes propuesto para la generación de la señal de monitorización de la calidad de la soldadura y demostración del mismo para la detección de una incisión en el cordón.

### 3.c. Discriminación de patologías tumorales en tejidos cancerígenos

El análisis del esparcimiento de la luz de las células y los tejidos, bien sea mediante métodos basados en coherencia o resueltos angularmente, permite cuantificar el origen subcelular de ciertas características del tejido [34]. Esto se puede emplear con propósitos de diagnóstico, ya que las variaciones en el espectro del esparcimiento están relacionadas con las estructuras patológicas del tejido. La medida de estas variaciones puede proporcionar una herramienta única para el guiado de la resección de tumores si es posible desarrollar una metodología de reducción de datos y visualización en tiempo real. No es posible, sin embargo, establecer una correlación directa entre los cambios en el esparcimiento y la morfología de los tejidos asociados, como consecuencia de la superposición de la variabilidad asociada a la patología concreta y la propia variabilidad del tejido [11]. Por ello se hace imprescindible para proceder al desarrollo de estudios clínicos, el diseño de una metodología automática de identificación. En la solución propuesta, tal y como se esquematiza en la Fig. 7, se realiza en primer lugar un análisis morfológico de los parámetros de esparcimiento [36]. Dicho análisis consiste en la determinación de sus estadísticos de primer a cuarto orden para mitigar el efecto no sólo de la variabilidad del tejido, sino también del propio sistema de medida. Seguidamente se propone una interpretación automática de los parámetros iniciales así como de las características

morfológicas extraídas con un doble objetivo. Se pretende, en primer lugar, desarrollar un método de discriminación entre tumor y tejido normal, es decir, realizar de forma fiable la detección del margen del tumor que los actuales microscópicos quirúrgicos visualizan difusamente. Por otra parte, los tumores pueden ser tremendamente heterogéneos siendo la cuantificación de esta heterogeneidad crítica en la planificación de los tratamientos para combatirlo. Por consiguiente, una vez realizada la identificación de la zona tumoral, se evaluará la capacidad de la solución propuesta para la discriminación de diferentes patologías tumorales. Y es precisamente en este punto donde reside la principal novedad del trabajo realizado ya que la discriminación de tejido normal – tumor se ha investigado previamente de forma exhaustiva.

En primer lugar, se demostró la capacidad de técnicas basadas en KNN y ANN para la discriminación entre tejido normal y tumor a partir de las imágenes de parámetros de esparcimiento ajustadas a partir de los espectros adquiridos por un sistema de imagen de tipo *plumero* [11,36,37]. Para lograr una identificación fiable de las diferentes patologías dentro de la morfología asociada a un tumor fue necesario incluir en el procesado de las imágenes de esparcimiento el mencionado proceso de extracción de características morfológicas basado en cálculos estadísticos. Así se obtuvieron correlaciones perfectas para ambas metodologías automáticas (KNN y ANN) con respecto a la segmentación realizada por un

patólogo. Además y puesto que una de las ventajas fundamentales era la capacidad de terminar el tipo de tejido en un área mayor de muestra que el experto tal y como se aprecia en la Fig. 8, se propuso la fusión de los resultados independientes de ambas metodologías [38]. La combinación de estos algoritmos de clasificación automatizados con el sistema de imagen confocal multiespectral, permitiría en un futuro al cirujano escanear directamente los tejidos y visualizar su distribución espacial en imágenes (del tipo a las imágenes de diagnóstico presentadas en la Fig. 8). Esto facilitaría enormemente la visualización del área tumoral delimitando los diferentes tipos y subtipos de tejidos que lo conforman. Es decir, una vez el sistema es entrenado sería capaz de detectar

diferencias submicroscópicas en tipos de tejidos que no pueden ser identificados con precisión por el ojo del cirujano. Por consiguiente, la intersección y combinación del sistema de escaneado, la extracción de los parámetros de esparcimiento a partir del espectro y el algoritmo de clasificación para identificar el tipo de tejido se presupone que tendrá un elevado potencial como sistema de guiado quirúrgico.

La principal línea de investigación abierta en este ámbito se centra en el estudio de la viabilidad de las técnicas (tanto de adquisición como de interpretación) para otros tipos de cáncer. De hecho, actualmente se está trabajando en la clasificación de patologías de tejido de pecho para evaluar la funcionalidad de la técnica en el caso del cáncer de mama [39-43].



Fig. 7: Esquemático del sistema global para la identificación de la morfología del tejido mediante espectroscopia de imagen.

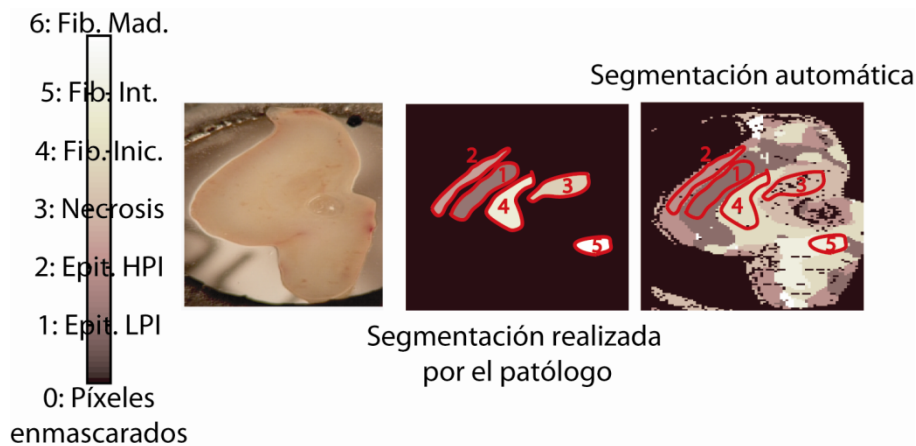


Fig. 8: Imágenes de diagnóstico en escala de color obtenidas por el patólogo y las unidades de interpretación automática de una muestra de tumor de páncreas.

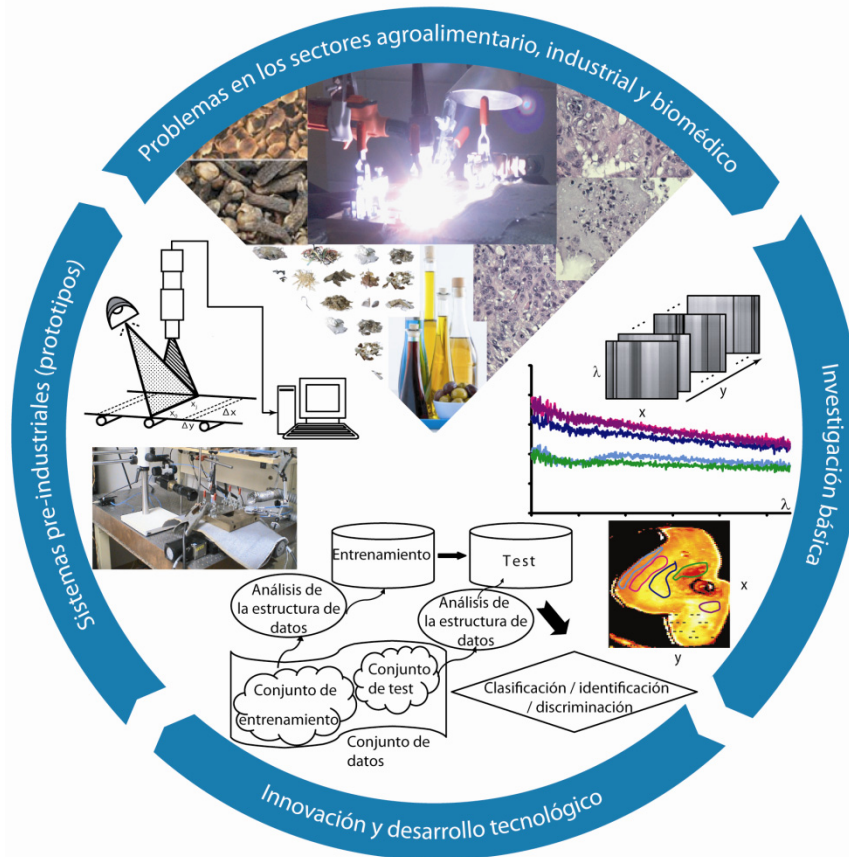


Fig. 9. Diagrama de bloques del trabajo de Tesis doctoral objeto de este resumen.

#### 4. Conclusiones

El objetivo fundamental perseguido fue contribuir al avance del conocimiento y de la técnica en el área de espectroscopia de imagen, así como, la aplicación de esta técnica en los sectores agroalimentario, industrial y biomédico. De forma concisa se puede afirmar que la motivación principal era abordar las dos problemáticas existentes en relación con HIS es decir, la mejora de los sistemas de adquisición y de las técnicas de interpretación espectral existentes en la actualidad y en este sentido, se puede concluir que los trabajos desarrollados han cumplido satisfactoriamente los objetivos planteados. Además y tal y como resalta la Fig. 9 se trata de un trabajo multidisciplinar. En primer lugar, resultó indispensable realizar investigación básica orientada a la comprensión de los mecanismos fundamentales y causas de los procesos de interacción luz-materia (reflectancia difusa, emisión y esparcimiento)

que tienen lugar en cada uno de los sectores. Ésta permitió abordar la subsecuente generación de conocimiento en relación a la adquisición y procesamiento de los mismos concretamente en *técnicas de compresión* del elevado volumen de datos adquirido por los sensores hiperespectrales y *algoritmos de clasificación y segmentación* de las imágenes en áreas que exhiban el mismo comportamiento espectral. En ambos se tuvieron en cuenta siempre requisitos de tiempo real que permitieran manejar y visualizar los datos adquiridos de manera eficiente y usable. Resaltar finalmente que parte de los resultados obtenidos han dado lugar a prototipos y sistemas pre-industriales que se encuentran actualmente en periodo de validación.

#### Agradecimientos

Las autoras agradecen a J. M. Mirapeix, J. M. López-Higuera, A. Cobo, J. J. Valdiande, A. M. Cubillas, M. Amado, F. Anabitarte, A. G. Mignani,

L. Ciaccheri, B. W. Pogue, V. Krishnaswamy y A. M. Laughney sus contribuciones a los trabajos mencionados. Adicionalmente estos trabajos han sido posibles en gran parte, gracias a las contribuciones de los proyectos I+D en los que se han enmarcado: TIC2002-01259, TEC2004-05936-C02-02, TEC2005-08218-C02-02 y TEC2007-67987-C02-01. Finalmente, P. B. Garcia-Allende agradece a la Universidad de Cantabria la concesión de una beca predoctoral para la realización de la Tesis.