

# Diseño y desarrollo de un espectrómetro óptico versátil de bajo coste

*Designing and developing a versatile low-cost optical spectrometer*

Vicente Ferrando<sup>1\*</sup>, Javier Monreal<sup>2</sup>, Walter D. Furlan<sup>3</sup> y Juan A. Monsoriu<sup>1</sup>

## Resumen

En este trabajo se detalla el proceso de diseño, desarrollo y prototipado de un sistema de medida del espectro visible. El objetivo que hay que cumplir es la obtención de un dispositivo reproducible, competitivo en el aspecto técnico con modelos comerciales de docencia actuales, y económico. El dispositivo resultante reúne las características de ser portátil, versátil, compacto, económico y con alta conectividad. El centro del proyecto es el *software*, que como característica clave permite ser utilizado prácticamente con cualquier cámara comercial y ser ejecutado desde distintos sistemas operativos. El prototipado se ha realizado con una cámara comercial con conexión USB con el fin de encontrar un equilibrio entre asequibilidad y resolución del producto final. Tiene un precio 20 veces más económico y una resolución similar al espectrofotómetro comercial utilizado como referencia.

## Palabras clave

Espectrofotómetro, red de difracción, impresión 3D.

## Abstract

*In this work, the processes of designing, developing and prototyping an instrument to measure the visible spectrum is shown in detail. The objective is to obtain a low-cost device, reproducible and technically competitive with the commercial docent models. The obtained device is portable, adaptable, compact, economic and with high connectivity. The core of the project is the software, and its key point is the compatibility with any commercial camera and it can be run in different operative systems. For this prototype a commercial camera with USB connection has been considered in order to find a balance between price and resolution for the resulting device.*

## Keywords

*Spectrophotometer, diffractive grating, 3D printing.*

Recibido / received: 5.10.2017. Aceptado / accepted: 11.11.2017.

<sup>1</sup> Centro de Tecnologías Físicas, Universitat Politècnica de València, 46022 Valencia (España).

<sup>2</sup> Escuela Técnica Superior de Ingeniería del Diseño, Universitat Politècnica de Valencia, 46022 Valencia (España).

<sup>3</sup> Departamento de Óptica, Universitat de València, 46100 Valencia (España).

\*Autor para correspondencia / corresponding author: viferma1@upv.es

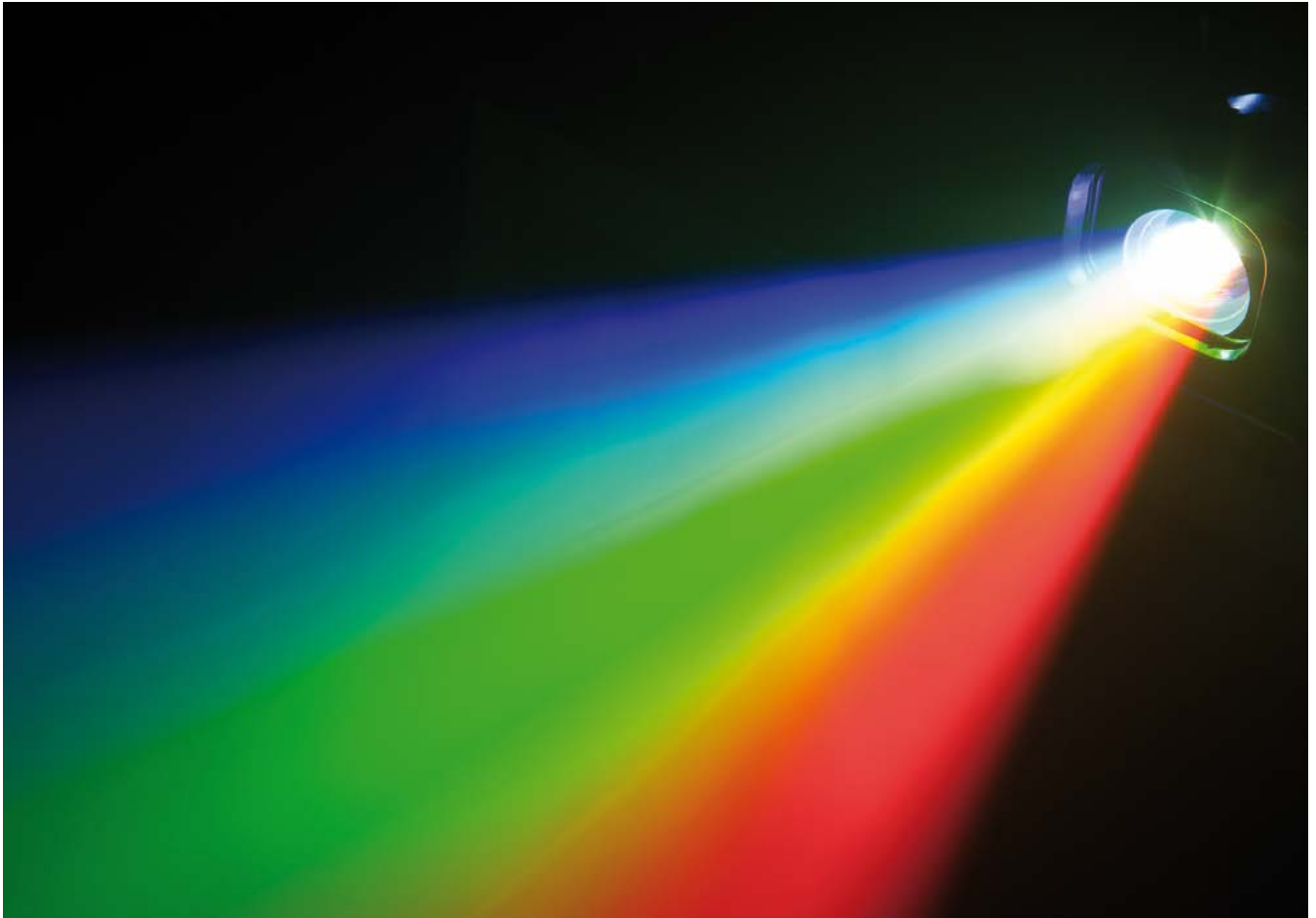


Foto: Shutterstock

## Introducción

La espectrofotometría es una técnica con un gran potencial de aplicación que ha permitido un fuerte desarrollo en los ámbitos industrial e I+D+i, pero su presencia en el ámbito docente, estudiantil, personal y *amateur* se ve limitada por su elevado coste, la especificidad de los equipos comerciales y la baja accesibilidad. Esta técnica tiene aplicaciones muy diversas que van desde la caracterización de cuerpos celestes en astronomía (Sterken, 1992) (Itoh, 2017) hasta la detección de componentes químicos en un laboratorio (Schwedt, 1997) (Binks, 2017), pasando por la caracterización y calibrado de pantallas led (Rodríguez-Vallejo, 2017).

Al ser una técnica con un amplio rango de aplicación, resulta curioso que muchos centros educativos no dispongan de espectrofotómetros para abordar la materia de forma empírica. Esto se debe, principalmente, al elevado coste de los sistemas comerciales

muy especializados en cada una de las aplicaciones y/o con prestaciones demasiado elevadas para el ámbito docente.

El objetivo de este trabajo consiste en diseñar y construir un espectrofotómetro de bajo coste, para lo que se han utilizado componentes muy extendidos. Adicionalmente, se ha desarrollado un *software* que permite el control del dispositivo, así como su puesta a punto.

## Material y métodos

El funcionamiento del sistema se basa en el fenómeno de la difracción producida por una red de difracción. Si iluminamos esta con un haz plano monocromático, parte de la radiación será transmitida con ángulos de salida,  $\theta$ , que cumplan la relación (Casas, 1995)

$$d \sin(\theta) = n \lambda, \quad (1)$$

donde  $d$  es la distancia entre las

rendijas de la red,  $\lambda$  es la longitud de onda incidente y  $n$  es el orden de difracción, que puede tomar cualquier valor entero, aunque nuestro sistema capturará solamente el primer orden de difracción ( $n = 1$ ). En esta relación observamos la dependencia directa del ángulo difractado con la longitud de onda, con lo que, bajo iluminación policromática, la red de difracción produce una separación angular de las diferentes longitudes de onda que se puede focalizar sobre el sensor de la cámara.

En la figura 1a se muestra un esquema del espectrómetro construido: la luz que se analiza es recogida por una fibra hasta el conector de entrada del dispositivo. Tras pasar una rendija, es colimada por una lente macro para *smartphone* (*disashop*) y el haz colimado incide sobre la red de difracción (Ventus Ciencia, 500 líneas/mm). Dado que nos interesa estudiar el rango visible del espectro (380-750 nm) y que para ello capturamos el primer orden de

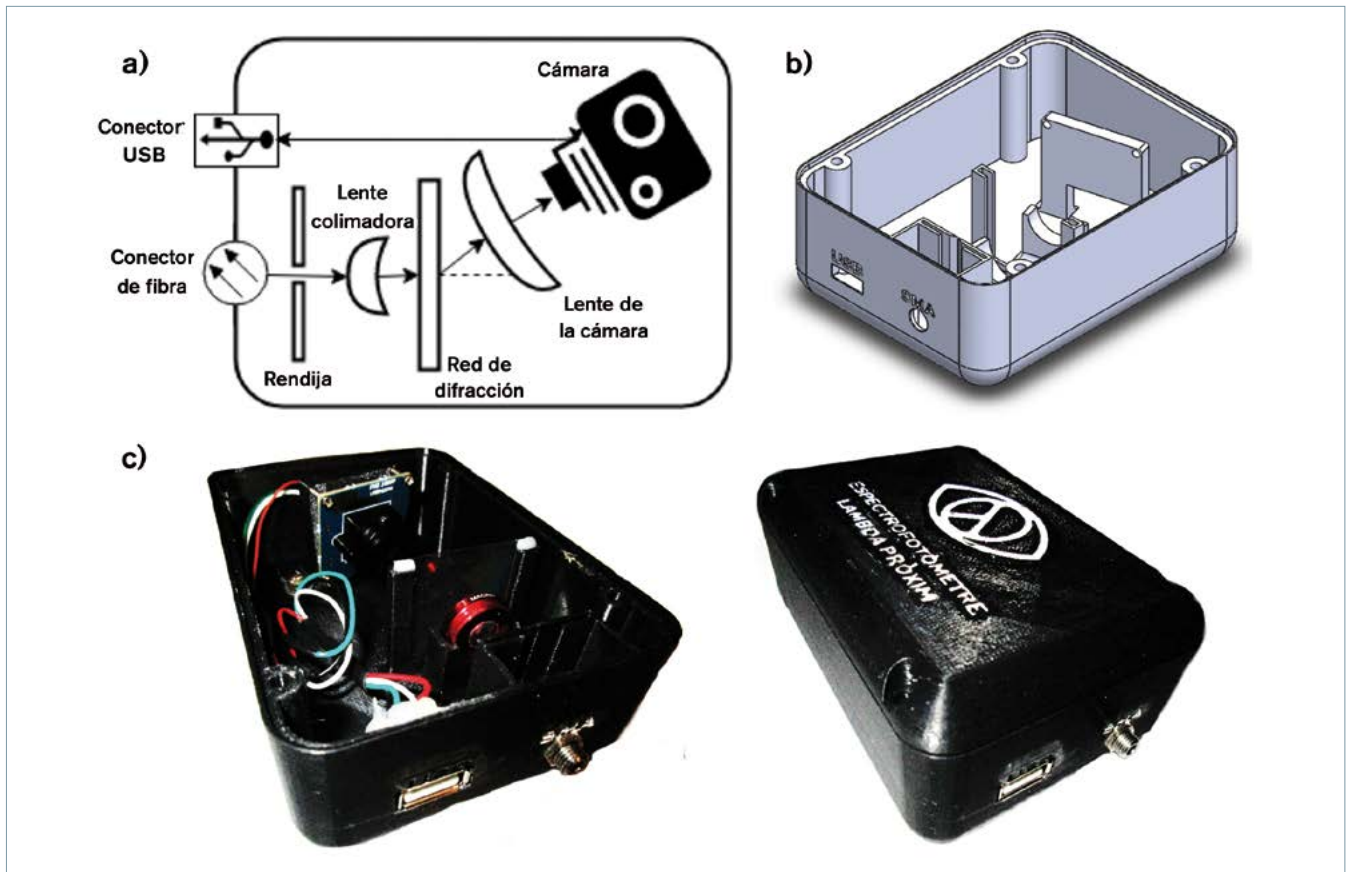


Figura 1. a) Esquema de espectrofotómetro desarrollado. b) Diseño de la caja construida mediante impresión 3D. c) Prototipo del espectrofotómetro abierto y con la tapa.

difracción, tendremos en cuenta que estas longitudes de onda son difractadas entre  $11^\circ$  y  $22^\circ$  -Ec. (1)-. La luz difractada se registra con una cámara comercial con conexión USB (ELP-USBFHD01M-L21-02-S, 1920 x 1080 píxeles) y, dado que necesitamos un campo de visión (CV) de al menos 11 grados, montamos en la cámara una lente (Uxcell, focal: 25 mm, montura M12) que nos proporciona un CV de 16,5 grados. Todos estos elementos se montan en una caja expresamente diseñada y fabricada en material Z-ULTRAT (ABS) mediante una impresora 3D (Zortrax M200). En la figura 1b se muestra el diseño de la caja impresa y en la figura 1c, el prototipo final.

Para que este dispositivo cumpla su función como espectrofotómetro se ha creado un *software* instalable multiplataforma. En la programación de este se ha desarrollado una interfaz gráfica mediante el lenguaje de programación gráfico LabView (Fig. 2), del que se han generado ejecutables que permiten controlar el espectrofotómetro desde los sistemas operativos Windows

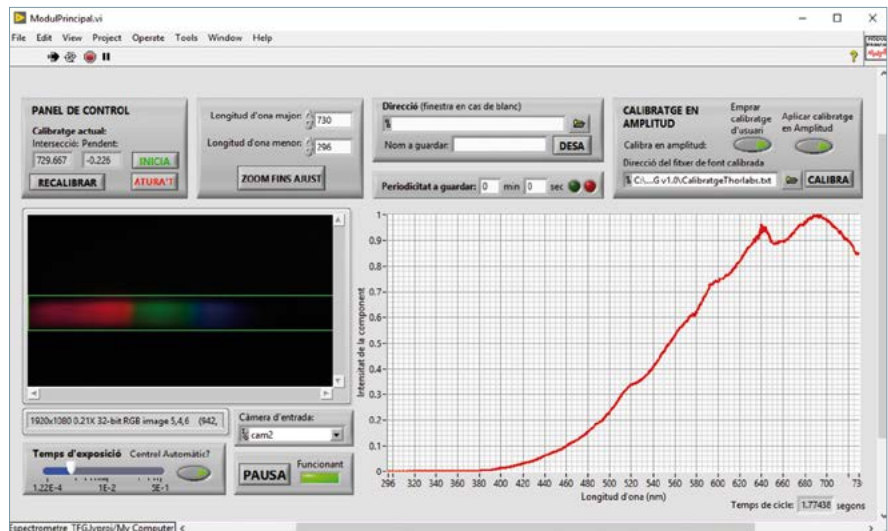


Figura 2. GUI desarrollada en LabView para controlar el dispositivo. Destacan la imagen capturada por la cámara (derecha) y el espectro que se obtiene de esta (izquierda).

y MacOS en los que no será la instalación del entorno de programación completo. En la figura 3 se representa el diagrama de flujo del programa principal. El funcionamiento de este programa parte de la captura de la luz

difractada mediante la cámara. En la figura 4 se muestran las imágenes capturadas para diferentes fuentes como una lámpara halógena, un puntero láser y un tubo fluorescente. El *software* transforma la imagen obtenida a esca-

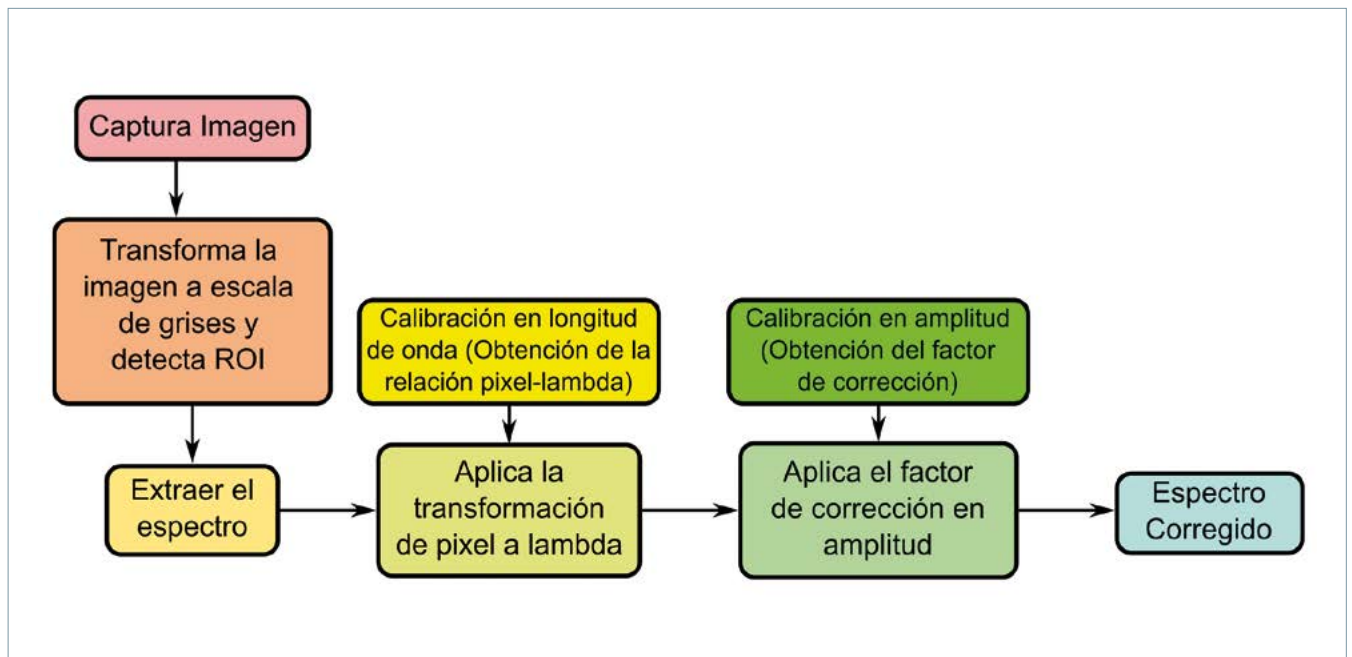


Figura 3. Esquema del funcionamiento del *software* desde la captura de la imagen en la cámara hasta que muestra el espectro corregido.

la de grises y se recorta para extraer la región de interés y obtener la curva del espectro.

Por otra parte, y con el objetivo de relacionar cada posición horizontal sobre el sensor con una longitud de onda, el *software* permite capturar el espectro de diferentes punteros láser (cuya longitud de onda necesitamos conocer previamente) y asignar el centroide del *spot* producido a su longitud de onda. Tras registrar al menos dos casos el programa nos muestra las curvas espectrales capturadas en función de la longitud de onda. Además, para asegurarse de que los espectros capturados no se ven afectados por la diferente sensibilidad para cada longitud de onda, el programa permite cargar el fichero con los datos del espectro para una lámpara de referencia y, comparándolo con el espectro capturado para la misma fuente, obtener los factores de corrección para cada longitud de onda. Como características adicionales, el *software* permite un autoajuste del tiempo de exposición del sensor y el análisis de transmitancias utilizando una fuente con un ancho de banda extenso en el rango visible.

Partimos de la imagen capturada por el sensor, que se transforma a escala de grises y de la cual se recorta la región de interés (ROI). A partir de estos datos se extrae la curva del es-

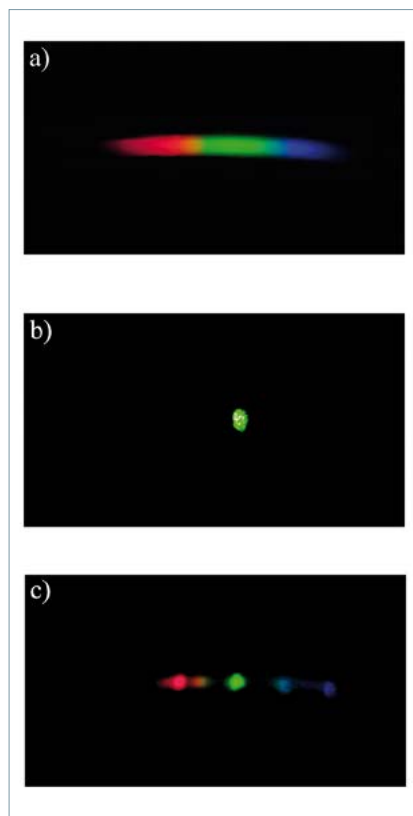


Figura 4. Imágenes capturadas por el dispositivo para diferentes fuentes estudiadas: a) lámpara halógena, b) puntero láser verde y c) tubo fluorescente.

pectro. Como no sabemos a que longitud de onda pertenece cada píxel de la captura, utilizaremos una calibración previa para hacer esta conversión.

Seguidamente se aplica un factor de compensación para la amplitud del espectro en función de la longitud de onda para corregir las inhomogeneidades de sensibilidad que pueda presentar el sensor. Finalmente, el programa muestra el espectro corregido y ofrece la posibilidad de guardar un fichero con los datos.

## Resultados

Para realizar la calibración en longitud de onda, aplicaremos diferentes fuentes monocromáticas de frecuencia conocida que generan un *spot* sobre el sensor. El *software* permite introducir el valor de la longitud de onda y detecta automáticamente el centroide de este *spot*. Mediante un ajuste lineal, el sistema relaciona cada posición del sensor con la longitud de onda correspondiente. Esta relación se guarda para ser utilizada automáticamente en las posteriores medidas. En este trabajo para calibrar el dispositivo se ha utilizado un conjunto de tres punteros láser con longitudes de onda de 405, 535 y 650 nm.

Para obtener el calibrado en amplitud utilizamos un espectrómetro comercial (Thorlabs CCS200) y una fuente con un ancho de banda extendido en el rango visible (lámpara halógena o linterna led blanca). Capturamos el espectro de la fuente con el

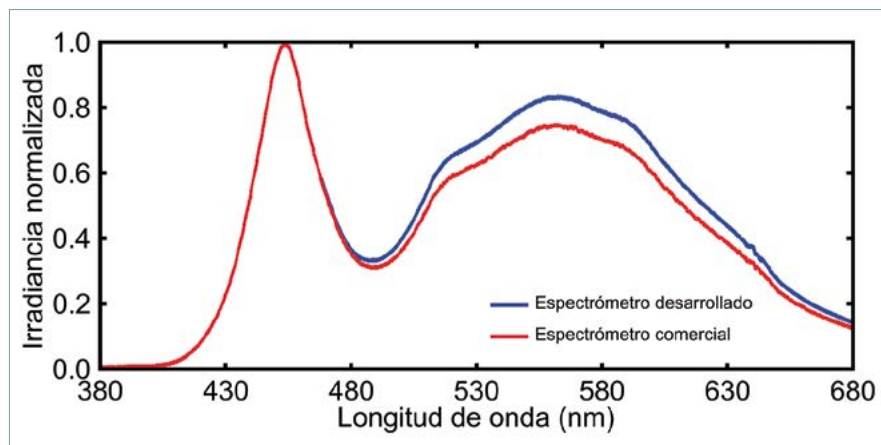


Figura 5. Comparación de los espectros obtenidos para una linterna led blanca mediante el espectrofotómetro desarrollado y un espectrofotómetro comercial (Thorlabs CCS200).

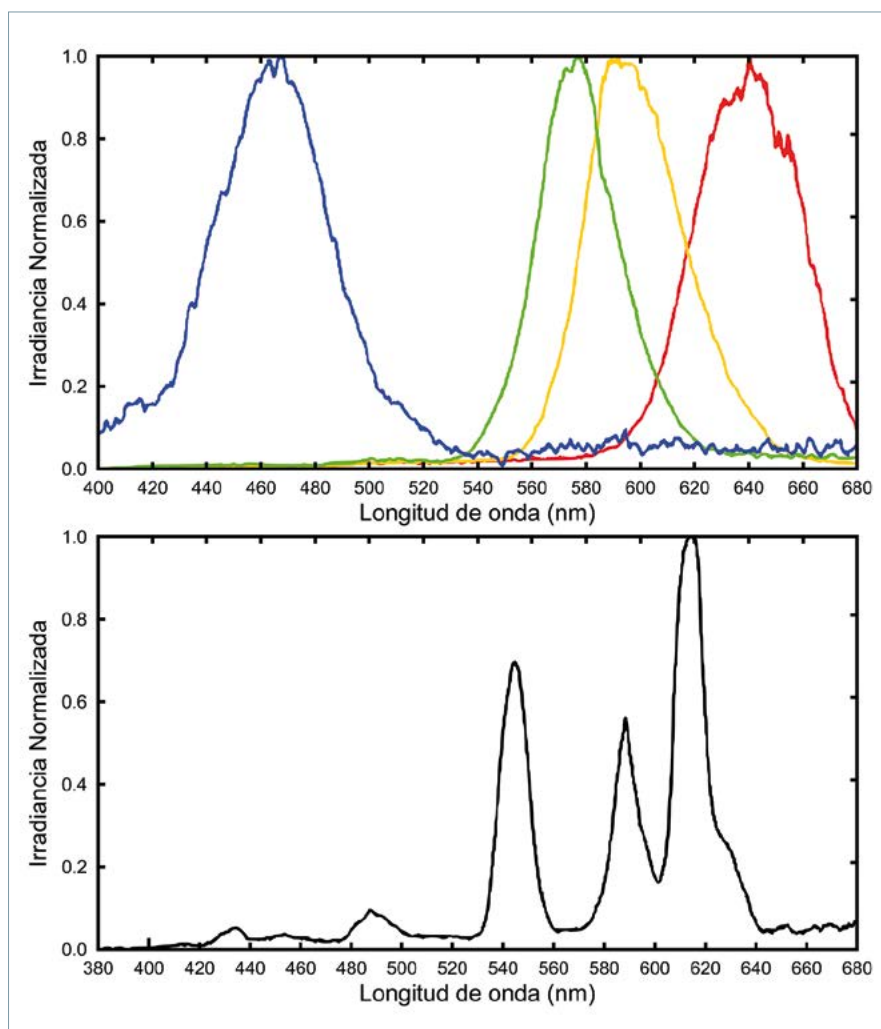


Figura 6. Espectros capturados para diferentes fuentes: a) Diodos led de diferentes colores y b) tubo fluorescente.

espectrómetro comercial y generamos un archivo con los datos. El *software* diseñado nos permite cargar dicho archivo y aplicar la calibración en amplitud capturando el espectro produ-

cido por la misma fuente con nuestro sistema. Tras comparar los resultados se registra el factor de corrección para cada longitud de onda que, posteriormente, se aplica al espectro capturado.

Una vez realizada la calibración del sistema, tanto en longitud de onda como en amplitud, mediremos el espectro de diferentes fuentes para comprobar el funcionamiento del dispositivo. En primer lugar, se han comparado los espectros de una misma fuente (una linterna led) capturados mediante el espectrofotómetro desarrollado y un espectrómetro comercial (Thorlabs CCS200). Estos resultados se muestran en la figura 5, en la que se observa la buena concordancia entre ambos espectros.

Además, en la figura 6 se muestran los espectros capturados de varios leds de diferentes colores, así como de un tubo fluorescente. Estas experiencias muestran el potencial docente de este sistema de bajo coste, ya que permite la captura digital del espectro con suficiente resolución para distinguir diferentes tipos de fuente.

### Conclusiones

Se ha diseñado y construido el prototipo de un espectrofotómetro de bajo coste y se ha desarrollado un *software* que permite su calibración y posterior uso. Varios espectros capturados por el sistema han sido comparados con los de un sistema comercial, y se ha obtenido muy buena concordancia. Además, se han capturado varios espectros representativos como el de un tubo fluorescente y leds de diferentes colores para mostrar el potencial docente del sistema desarrollado.

### Agradecimientos

Este trabajo ha sido financiado por el Ministerio de Economía y Competitividad y FEDER (Proyecto DPI2015-71256-R) y por la Generalitat Valenciana (Proyecto PROMETEOII-2014-072).

### Bibliografía

- Binks BP, Fletcher PDI, Johnson AJ, Marinopoulos I, Crowther, JM Thompson, MA (2017). "Spectrophotometry of Thin Films of Light-Absorbing Particles". *Langmuir*. 33: 3720-30.
- Casas, J (1995). *Óptica*. Librería General, Zaragoza. ISBN: 9788430024483.
- Itoh S, Matsuo T, Goda S, Shibai H, Sumi T (2017). "Pupil Masks for Spectrophotometry of Transiting Exoplanets". *Astronomical Journal* 154: 97.
- Rodríguez-Vallejo M, Ferrando V, Montagud D, Monsoriu JA, Furlan WD (2017). "Stereopsis assessment at multiple distances with an iPad application". *Displays*. 50:35-40.
- Schwedt G (1997). *The Essential Guide to Analytical Chemistry*. Wiley, Chichester. ISBN: 9780471974123.
- Sterken C, Manfroid J (1992). "Astronomical photometry: a guide". *Astrophysics and space science library*: 1-6.