

Diseño y validación del protocolo de medida para el espectrorradiómetro Ocean Optics USB2000+ en aplicaciones con sensores aeroportados y a bordo de satélite

Xavier Pons⁽¹⁾, Gerard Moré⁽¹⁾, Cristina Cea⁽¹⁾, Pere Serra⁽¹⁾, María Mira⁽¹⁾, Óscar González⁽¹⁾, Alaitz Zabala⁽¹⁾, Fernando Pérez⁽²⁾, Anna Tardà⁽²⁾, Ramón Alamus⁽²⁾, Vicenç Palà⁽²⁾ y Antonio López⁽²⁾

⁽¹⁾ GRUMETS research group. Departamento de Geografía, Edificio B, Universitat Autònoma de Barcelona, 08193-Bellaterra, Cataluña, España. Emails: xavier.pons@uab.cat, gerard.more@gmail.com, cristina.cea@uab.cat, pere.serra@uab.cat, maria.mira@uab.cat, oscar.gonzalez.guerrero@uab.cat, alaitz.zabala@uab.cat

⁽²⁾ Instituto Cartográfico y Geológico de Catalunya (ICGC), Parc del Montjuïc s/n, 08038 Barcelona, Cataluña, España. Emails: fernando.perez@icgc.cat, anna.tarda@icgc.cat, ramon.alamus@icgc.cat, vicenc.pala@icgc.cat, antonio.lopez@icgc.cat

Resumen: Las medidas de campo obtenidas mediante espectrorradiómetros son una pieza clave para el trabajo en sinergia con imágenes de sensores aeroportados y a bordo de satélite. Sin embargo, existe muy poca información sobre los detalles técnicos de su funcionamiento. El objetivo de este estudio es establecer y validar el protocolo de medida óptimo de un espectrorradiómetro que opera en espectro visible e infrarrojo cercano. Consideramos el protocolo a seguir para la medida en el campo de reflectividades de objetos naturales y artificiales, y lo validamos con medidas hiperespectrales capturadas simultáneamente por sensores aeroportados. El espectrorradiómetro utilizado es el Ocean Optics USB2000+ (200–1100 nm) y los sensores aeroportados son CASI-550 (410–962 nm) y AISA Eagle II (406–994nm).

Palabras clave: espectrorradiometría, protocolo medidas de campo, imágenes hiperespectrales y multiespectrales, validación, tiempo de integración, USB2000+

Design and validation of the measurement protocol applied to the Ocean Optics USB2000+ spectroradiometer for applications with airborne and satellite sensors

Abstract: Field spectroradiometers are key instruments for the synergetic work with airborne and satellite imagery. However, there is limited information about the technical details of their performance. The objective of this study is to set and validate the optimum measurement protocol for a spectroradiometer operating in the visible and near infrared wavelengths. We assessed the protocol followed to measure field reflectances of natural and artificial objects. We then validated the data with hyperspectral measurements simultaneously acquired by airborne and satellite sensors. The spectroradiometer studied is the Ocean Optics USB2000+ (200–1100 nm) and the airborne sensors are CASI-550 (410–962 nm) and AISA Eagle II (406–994 nm).

Keywords: spectroscopy, field measurement protocol, hyperspectral and multispectral images, validation, integration time, USB2000+

1. INTRODUCCIÓN

La espectrorradiometría de campo es la técnica usada para medir las propiedades de reflectividad de diferentes cubiertas generalmente bajo unas determinadas condiciones de iluminación solar (Milton, 1987). De sus muchas aplicaciones, una de ellas es la calibración de sensores aeroportados y satelitales (Pérez *et al.* 2014), donde se refleja la importante sinergia entre éstos y los espectrorradiómetros de campo portátiles, aportando información relevante significativa para el estudio de cualquier superficie.

Sin embargo, los usuarios de estos instrumentos deben enfrentarse a la falta de detalles en los manuales de uso, hecho que dificulta su óptimo manejo. Además, una parte importante de los artículos científicos que describen el uso de este tipo de instrumentos en el campo (no en laboratorio) no precisan suficientemente la metodología de obtención de los datos, aunque ésta sea imprescindible para obtener unos datos de calidad.

El conocimiento del sensor y su sensibilidad en todo el rango espectral es esencial para optimizar su uso, especialmente en aquellos instrumentos en los que el número de parámetros configurables por el usuario es elevado.

Así pues, el principal objetivo de este trabajo es establecer una guía de buenas prácticas para medir con un espectrorradiómetro de haz único, el Ocean Optics USB2000+, que cubre los rangos espectrales del visible e infrarrojo cercano, con la finalidad de obtener mediciones espectrales de calidad.

Este protocolo tiene en cuenta todo lo necesario para garantizar la estabilidad de las mediciones: control de la señal-ruido, el número de medidas, el tiempo de medición, la configuración de parámetros como el tiempo de integración según la cubierta, etc., y ha sido validado mediante la comparación de datos de dos sensores hiperespectrales aeroportados, CASI-550 and AISA Eagle II.

2. ÁREA DE ESTUDIO

El área de estudio donde realizamos las medidas de campo simultáneamente a los vuelos de los sensores aeroportados es el lago de Banyoles (Girona, España) y sus alrededores (Figura 1). Se tomaron medidas del agua del lago, la arena de un campo de fútbol, el hormigón coloreado de un campo de baloncesto, y lonas de diferentes colores (rojo, azul y gris).



Figura 1. Composiciones RGB de imágenes CASI-550 tomadas el 15 de Marzo de 2013 sobre (a) el lago de Banyoles (Girona, España) y (b) sus alrededores. Localización de las medidas de campo sobre el lago (recuadro amarillo), las lonas y la arena (recuadro rojo), y el hormigón coloreado (recuadro azul).

3. MATERIAL

3.1. Espectrorradiómetro y panel de reflectividad difusa del visible al infrarrojo cercano

Las medidas de las reflectividades hemisférico-cónicas del visible al infrarrojo cercano se realizaron con el espectrorradiómetro “Ocean Optics USB2000+”, un panel de reflectividad difusa de Politetrafluoroetileno (PTFE) de 30×30 cm² (Figura 2 y Tabla 1), y un cable de fibra óptica con campo de visión de 25° unido al espectrorradiómetro. El panel no está calibrado, pero se asume 100% reflectante.

3.2. Imágenes de sensores aeroportados

El conjunto de imágenes consideradas, tomadas simultáneamente por los sensores aeroportados CASI-550 y AISA Eagle II (Figura 3 y Tabla 2), está formado por 2 imágenes sobre el lago (Figura 1a) y 4 sobre sus alrededores (Figura 1b) (*i.e.*, un total de 6 imágenes por sensor). Las imágenes CASI-550, con 16 bandas, fueron tomadas con una resolución espacial de 50 cm. Las imágenes AISA Eagle II, con 63 bandas (excepto una imagen sobre los alrededores, tomada con una configuración de 16 bandas igual a las de CASI-550), fueron tomadas con una resolución espacial de 20 cm.

Las imágenes fueron pre-procesadas con el software propio del fabricante. La corrección geométrica se llevó a cabo con el software desarrollado por el ICGC, basado en Alamús y Talaya (2000) y Colomina *et al.* (1992). Fueron corregidas atmosféricamente utilizando un software propio basado en la versión escalar de 6S (Vermote *et al.*, 1997) pero sin medidas atmosféricas simultáneas a la captura de imagen. Los detalles técnicos de los vuelos y el procesamiento de las imágenes se pueden consultar en Pérez *et al.* (2014).

Para comparar las medidas terreno con las estimaciones de las imágenes se consideró el valor medio de los píxeles sobre un área de 1,5×1,5 m² y se remuestrearon los espectros medidos en el campo mediante un promedio según las bandas espectrales de cada sensor, considerando su FWHM de ~0,3 nm.

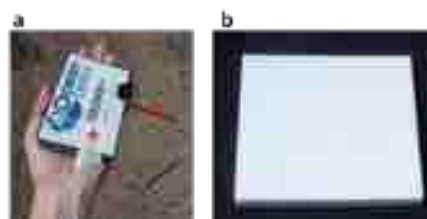


Figura 2. (a) Espectrorradiómetro “Ocean Optics USB2000+” (200-1100 nm) junto con la fibra óptica, y (b) panel de reflectividad difusa en el visible y infrarrojo cercano de Politetrafluoroetileno (PTFE).

Tabla 1. Principales características técnicas del espectrorradiómetro “Ocean Optics USB2000+”.

Ocean Optics USB2000+	
Intervalo espectral	300 – 1100 nm
Resolución óptica	0,3 – 10,0 nm FWHM, configurable
Relación señal-ruido	7500:1 @ 10 ms
Corriente oscura	50 RMS cuentas
Tiempo de integración	Entre 1 ms y 60 s
Dimensiones	89 mm × 63 mm × 34 mm
Peso	190 g
Software	SpectraSuite®



Figura 3. Instalación de los sensores CASI-550 y AISA Eagle II (a) en la aeronave Cessna Caravan B208 del ICGC (b).

Tabla 2. Principales características técnicas de los sensores aeroportados CASI-550 y AISA Eagle II

	CASI-550	AISA Eagle II
Intervalo espectral (nm)	409,5-961,7	406,3-993,8
Resolución espectral	1,9 nm	2,3 nm
Ancho de banda	~35 nm	~10 nm
Campo de visión	40,4°	37,7°
Num. máx. de bandas	288	260
Detectores espaciales CCD	550	1024
Rango dinámico	14 bits	12 bits

4. RESULTADOS

4.1. Protocolo para medir reflectividades del visible al infrarrojo cercano

Para medir correctamente la reflectividad de una muestra bajo condiciones de cielo abierto con el USB2000+ es necesario realizar una serie de medidas que nos permitan corregir el ruido de la señal y estimar la contribución atmosférica en forma de radiancia hemisférica descendente. El ruido se mide evitando que entre luz por la fibra óptica (en lo sucesivo llamado “oscuridad”), mientras que la radiancia reflejada en el panel (idealmente de forma lambertiana) corresponde a la contribución de la atmósfera sobre la muestra en estudio. Es necesario conectar el instrumento un tiempo antes de empezar las medidas para la optimización inicial de los ajustes de ganancia y la corrección en la corriente oscura. Este tiempo según Salisbury *et al.* (1998) es aproximadamente una hora aunque en nuestro experimento fueron necesarios unos 35’, correspondientes al momento en que la corriente oscura se estabiliza.

A continuación, se requiere determinar el tiempo de integración del espectrorradiómetro, es decir, el tiempo durante el cual el sensor estará recibiendo señal. Siguiendo la recomendación del fabricante, éste debe ajustarse de manera que la mayor intensidad que se vaya a registrar esté alrededor del 85 % de la capacidad del instrumento (unas 50000 cuentas en nuestro caso, ya que su capacidad es de 65535 cuentas). Este valor puede cambiar con el tiempo ya que depende de las condiciones de iluminación. Para reducir el SNR (*signal to noise ratio*) y aumentar el intervalo espectral efectivo de las medidas, éste fue dividido arbitrariamente en tres tramos (300–760 nm; 760–930 nm; 930–1025 nm) y se optimizó la señal para cada uno de ellos variando el tiempo de integración.

Así mismo, para optimizar la señal recibida de la muestra, se asumió que existe una relación lineal entre la intensidad registrada y el tiempo de integración. La serie de medidas realizadas, en orden consecutivo, fue *panel de referencia (p) – oscuridad (o) – muestra (m) – oscuridad (o)*. Las dos primeras con el tiempo de integración óptimo para el panel, y las dos últimas para la muestra. La reflectividad espectral (R_λ) de la muestra se calcula a partir de las intensidades espectrales (I_λ) equivalentes al mismo tiempo de integración, siguiendo la ecuación:

$$R_\lambda (\%) = 100 (I_{\lambda m} - I_{\lambda o}) / (I_{\lambda p} - I_{\lambda o}) \quad (1)$$

donde la intensidad se refiere a la energía por unidad de superficie. Observamos, además, ciertas condiciones generales a considerar durante las medidas de campo. Debido a que el Sol es la fuente principal de la irradiancia necesaria en las medidas y a la débil sensibilidad del instrumento, fue necesario 1) tener en cuenta la distancia entre la cubierta y el sensor según el FOV del instrumento, 2) evitar medir con el Sol a baja altura para evitar sombras, 3) evitar realizar las medidas en presencia de nubes, sobre todo si son variables, 4) medir un espectro de referencia en cada serie de medidas, sobre

todo bajo condiciones de iluminación variable, 5) optimizar el tiempo de medida, y 6) tomar las medidas casi simultáneamente al paso del sensor. Además, se hubo de inicializar el USB2000+ unos 35’ antes de empezar las medidas para permitir su estabilización, puesta de manifiesto a través de la estabilidad de las medidas de oscuridad.

4.2. Comparación entre las medidas de campo y los datos CASI y AISA

Los espectros de reflectividad medidos con el espectrorradiómetro USB2000+ se obtuvieron a partir de, como mínimo, 5 series de medidas sobre un mismo punto, cada medida con 5 repeticiones. Su valor medio y desviación estándar, remuestreado según las bandas CASI y AISA, se representa en la Figura 4. La desviación estándar observada en las medidas de reflectividad en % varía de $\pm 0,05$ a $\pm 1,3$.

En la figura 4 se representa también el promedio y la desviación estándar de las estimaciones de 2 imágenes CASI o AISA sobre el lago, y 3 y 4 imágenes CASI o AISA, respectivamente, sobre los alrededores. El promedio de la desviación estándar de las reflectividades (en %) de los píxeles considerados en cada imagen varía de $\pm 0,07$ a $\pm 0,32$ para CASI y de $\pm 0,35$ a $\pm 4,6$ para AISA. Con la comparación entre los espectros medidos en el campo y los espectros medidos por los sensores aeroportados (Figura 4) observamos que las características espectrales singulares de cada muestra son reproducidas correctamente. Debido a las diferencias espaciales y espectrales entre CASI y AISA, son obvias las diferencias entre sus estimaciones incluso cuando las bandas son equivalentes (Figura 5). Tras dicho análisis, se observaron errores cuadráticos medios absolutos de 1 a 5 (relativos de 3 a 37 %) y una desviación entre 0,5 y 4 (unidades de reflectividad en %).

5. CONCLUSIONES

Las medidas de campo con el USB2000+ se llevaron a cabo teniendo en cuenta:

- La puesta en marcha del instrumento, al menos 35’ antes de iniciar las medidas.
- La distancia entre la cubierta y el sensor, teniendo en cuenta el FOV del instrumento.
- El tiempo de integración óptimo, de acuerdo con la cubierta y el rango espectral de estudio.
- La repetitividad de las secuencias (panel – oscuridad – muestra – oscuridad) consideradas para el cálculo de las reflectividades, teniendo en cuenta una relación lineal entre la intensidad y el tiempo de integración.

Las medidas de campo obtenidas aplicando este protocolo presentan muy baja dispersión (repetitividad aceptable), demostrando así su consistencia. La excepción la encontramos en la pista de fútbol sala (hormigón) donde la desviación estándar entre mediciones aumenta debido a la heterogeneidad de la cubierta (diferente desgaste, líneas de diferentes colores,...).

También cabe subrayar la consistencia entre las medidas de campo y los datos hiperespectrales adquiridos por

CASI-550 y AISA Eagle II, indicando su validez para la calibración de sensores aeroportados. Las diferencias observadas podrían estar causadas por diferentes razones (*i.e.*, la diferencia en resolución espacial, errores en la corrección atmosférica, etc.)

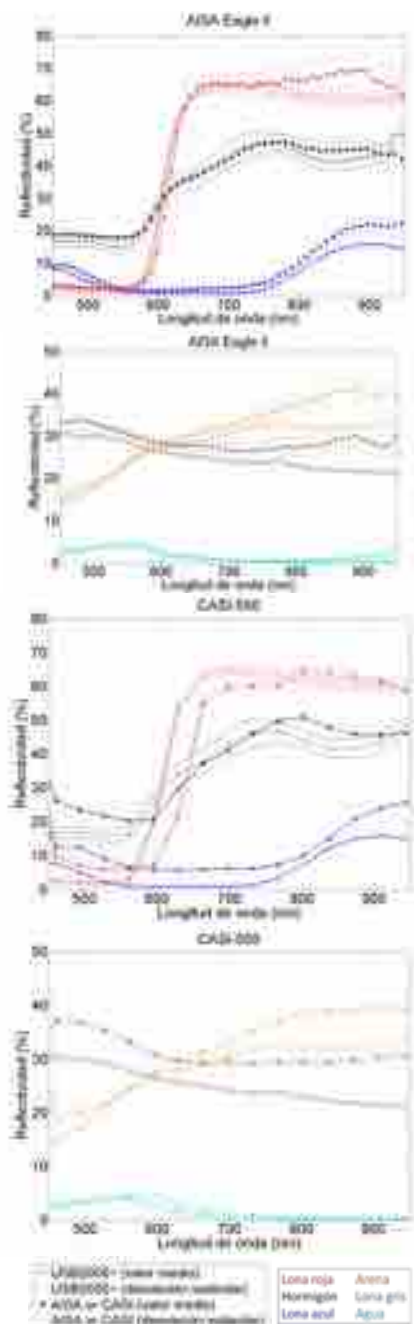


Figura 4. Comparación entre los espectros medidos en el campo con el USB2000+ (círculos huecos), filtrados según las bandas espectrales del sensor considerado, y los espectros procedentes de las imágenes CASI-550 y AISA Eagle II (círculos rellenos). Los puntos indican el valor medio y las líneas de alrededor su desviación estándar.

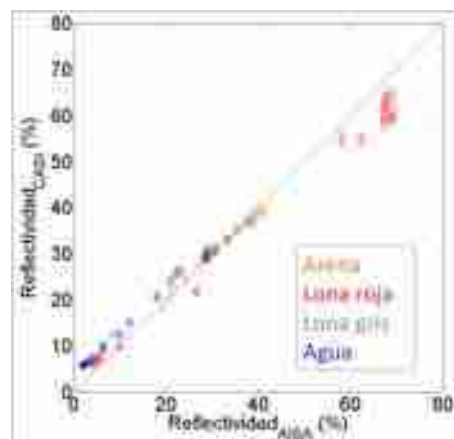


Figura 5. Comparación entre las reflectividades medidas por CASI-550 (4 imágenes) y AISA Eagle II (1 imagen) sobre diferentes superficies con una configuración equivalente de 16 bandas.

6. AGRADECIMIENTOS

Este estudio fue financiado por el Ministerio Español de Ciencia e Innovación (proyecto CGL2012-33927 y contrato de investigación "Juan de la Cierva" de la Dra. Mira), la Generalitat de Catalunya (GRUMETS - grupo de investigación consolidado desde 2009, SGR 2014 núm. 1491). Xavier Pons es beneficiario de un ICREA Academia Excellence in Research grant. 2011-2015.

7. BIBLIOGRAFÍA

- Alamus, R. & Talaya, J. 2000. *Airborne sensor integration and direct orientation of the CASI system*. ISPRS, vol. XXXIII. Amsterdam, 2000.
- Colomina, I. *et al.* 1992. *GeoTeX: a general point determination system*. International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing, Vol. 29, Comm. III, PP. 656-664.
- Milton, E. J. 1987. *Review Article Principles of field spectroscopy*. International Journal of Remote Sensing, 8:12, 1807-1827
- Milton, E. J. *et al.* (2009). *Progress in field spectroscopy*. [in special issue: Imaging Spectroscopy] Remote Sensing of Environment, 113, supplement 1, S92-S109.
- Pérez, F. *et al.* 2014. *Intercalibración de sensores AISA y CASI*. Revista Catalana de Geografia, XIX (48).
- Salisbury. 1998. *Spectral measurements field guide*, Report No. ADA362372 published by the Defense Technology Information Center.
- Vaughan. P. 2001. *Estimación de contenido de humedad de la vegetación mediante radiometría de campo*. P. Vaughan Trabajo de investigación tutelado, Universidad de Alcalá, Alcalá de Henares, Spain.
- Vermote, E.F. *et al.* 1997. *Second simulation of the satellite signal in the solar spectrum: An overview*. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 35:675-686.