

Espectroradiometría de campo del visible al infrarrojo térmico de muestras con características espectrales singulares

María Mira⁽¹⁾, Raquel Niclòs⁽²⁾, Enric Valor⁽²⁾, Xavier Pons⁽¹⁾, Cristina Cea⁽¹⁾, Vicente García-Santos⁽²⁾, Diego Caselles⁽²⁾ y Vicente Caselles⁽²⁾

⁽¹⁾ GRUMETS research group. Departamento de Geografía, Edificio B, Universitat Autònoma de Barcelona, 08193-Bellaterra, Catalunya, España. Emails: maria.mira@uab.cat, xavier.pons@uab.cat, cristina.cea@uab.cat

⁽²⁾ Grupo de Teledetección Térmica, Departamento de Física de la Tierra y Termodinámica, Universitat de València, 46100-Burjassot, Valencia, España. Emails: raquel.niclos@uv.es, enric.valor@uv.es, diego.caselles@uv.es, vicente.caselles@uv.es

Resumen: La calibración de sensores a bordo de satélite requiere medidas espectrales de campo simultáneas al paso del satélite. El objetivo de este trabajo es determinar y validar el protocolo óptimo para medir en el campo espectros de reflectividad (del visible al infrarrojo cercano) y emisividad (en el infrarrojo térmico) de muestras con características espectrales singulares (calcita, cuarzo, yeso y sal). Los espectrorradiómetros analizados son el Ocean Optics USB2000+ (200–1100 nm) y el μ FTIR D&P Modelo 102 (2–16 μ m). La buena repetitividad de las medidas de campo y la caracterización precisa de las características espectrales singulares de cada muestra prueban la validez de los protocolos aplicados a las medidas *in situ* con estos instrumentos.

Palabras clave: reflectividad y emisividad espectral, medidas de campo, calcita, cuarzo, yeso, sal, espectroscopía, USB2000+, FTIR

Spectroradiometry from visible to thermal infrared over samples with singular spectral features

Abstract: The calibration of satellite sensors requires *in situ* measurements carried out concurrently with satellite overpasses. The objective of this study is to determine and validate an optimum protocol for measuring field reflectance (from visible to near infrared) and emissivity (thermal infrared domain) spectra of samples with singular spectral features (calcite, quartz, gypsum and salt). The analyzed spectroradiometers are the Ocean Optics USB2000+ (200–1100 nm) and the μ FTIR D&P Model 102 (2–16 μ m). The good repetitivity of the field measurements and the accurate characterization of the singular spectral features of each sample support the validity of the protocols applied to *in situ* measurements with those instruments.

Keywords: *spectral reflectance and emissivity, field measurements, calcite, quartz, gypsum, salt, spectroscopy, USB2000+, FTIR*

1. INTRODUCCIÓN

En las últimas décadas se observa una tendencia creciente hacia el estudio de la teledetección a partir de datos hiperespectrales. Muestra de ello es la existencia de sensores multiespectrales a bordo de satélites como EOS-MODIS y EOS-ASTER, así como en las futuras misiones HypIRI, ECOSTRESS, THIRSTY, MISTIGRI o HiTeSEM. Para la calibración/validación de los sensores a bordo de satélite y sus productos se necesitan medidas de campo simultáneas al paso del satélite. Éstas deben ser realizadas en áreas de referencias extensas y radiométricamente homogéneas para mitigar los problemas relacionados con la diferencia espacial entre las medidas de campo (puntuales) y los datos de satélite (áreas más amplias). Uno de los problemas principales en las medidas de campo es la discrepancia entre medidas espectrales tomadas por instrumentos diferentes.

El principal objetivo de este estudio es, pues, determinar y validar el protocolo de medidas óptimo para medir en el campo espectros de reflectividad (del visible al infrarrojo cercano) y emisividad (en el infrarrojo térmico). Para ello se seleccionó un conjunto de muestras de características espectrales singulares. Se realizaron medidas con dos espectrorradiómetros, uno para cada dominio espectral, y se compararon con espectros de

laboratorio de muestras similares o equivalentes, disponibles *online* (i.e., ASTER *Spectral Library*).

La reflectividad se define como el cociente entre el flujo energético reflejado por una superficie y el flujo energético incidente, y la emisividad como el cociente entre la emisión de una superficie y la emisión de un cuerpo negro a la misma temperatura termodinámica. Según la ley de Kirchhoff de la radiación térmica, si un cuerpo (o superficie) está en equilibrio termodinámico con su entorno, su emisividad es igual a su absorptancia ($\epsilon = \alpha$). Ambas variables son propiedades direccionales y dependen de la longitud de onda; serán hemisféricas si promediamos sobre el hemisferio reflejado o de emisión, respectivamente.

En nuestro experimento, las medidas de campo realizadas con nuestros instrumentos podrían considerarse como direccionales, ya que están realizadas con cierto ángulo de visión (el nadir). No obstante, es importante destacar que nuestras medidas en el dominio térmico permiten obtener directamente emisividades (no reflectividades), siendo éstas direccionales. Esto es de especial interés para la posterior comparación con espectros de laboratorio (hemisférico-direccionales), medidas de emisividad con el método de la caja (hemisféricas), o medidas de emisividad con el método de separación de la

temperatura y la emisividad TES-ASTER (direccionales) (Mira *et al.*, 2009).

2. MATERIAL

2.1. Muestras

El conjunto de muestras seleccionadas para este estudio es: calcita y cuarzo en polvo, arena del desierto de White Sands (NM, EEUU) rica en yeso (99%), sal fina, y sal gruesa. Las muestras fueron caracterizadas según su composición y tamaño de partícula, éste último determinado mediante la técnica de difracción de rayos X o por comparación con una plantilla (en el caso de la sal).

Las muestras fueron seleccionadas por 1) sus características espectrales singulares, 2) su importancia en la estimación de las emisividades térmicas de los suelos (Mira *et al.*, 2010), y 3) la existencia de extensas áreas en el mundo con abundancia de estos materiales (i.e., White Sands, NM, EEUU; Algodones Dunes, CA, EEUU; Salar de Uyuni, Bolivia).

2.2. Espectros del visible al infrarrojo cercano: espectrorradiómetro y panel de reflectividad difusa

Las medidas de las reflectividades del visible al infrarrojo cercano se realizaron con el espectrorradiómetro “Ocean Optics USB2000+” y un panel de reflectividad difusa de Politetrafluoretileno (PTFE) de 30×30 cm² (Tabla 1). Las medidas se realizaron mediante una fibra óptica unida al espectrorradiómetro con campo de visión de 25°.

2.3. Espectros en el infrarrojo térmico: espectrorradiómetro y panel de reflectividad difusa

Las medidas de emisividad se realizaron con el espectrorradiómetro de transformada de Fourier en el infrarrojo “*Designs & Prototypes* modelo 102” (Korb *et al.*, 1996), un cuerpo negro de referencia, y un panel de reflectividad difusa en el infrarrojo “*Infragold Reflectance Target* IRT-94-100” de 25,4×25,4 cm² (Tabla 2).

2.4. Medidas multiespectrales en el infrarrojo térmico: radiómetro multibanda

Para el cálculo de la emisividad infrarroja se realizaron también medidas con el radiómetro multiespectral “CIMEL Electronique CE312-2”. Éste se caracteriza por tener 5 bandas espectrales equivalentes a las bandas térmicas del sensor ASTER, y una banda ancha entre 8 y 14 μm. Su resolución espectral varía entre 0,008 y 0,05 °C a 20 °C (según el canal), tiene un tiempo de respuesta de 1 s, un campo de visión de 10°, y funciona a temperaturas ambiente entre -20 y 50 °C.

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
Relación señal-ruido	7500:1 @ 10 ms
Ruido en la oscuridad	50 cuentas RMS
Tiempo de integración	1 ms a <60 s
Dimensiones	89 mm × 63 mm × 34 mm
Peso	190 g
Software	<i>SpectraSuite</i> ®

Tabla 2. Principales características técnicas del espectrorradiómetro “D&P modelo 102” y de su cuerpo negro (CN).

FTIR D&P modelo 102	
Intervalo espectral	2 – 16 μm
Resolución espectral	4, 8, y 16 cm ⁻¹
Precisión	±1 cm ⁻¹
Temperatura de operación	15 a 35 °C
Campo de visión	4,8°
Dimensiones	36 cm × 20 cm × 23 cm
Peso	6,8 kg
Software	<i>D&P FTIR</i> ®
Intervalo de temp. del CN	3 a 95 °C
Precisión del CN	±0,2 °C

3. RESULTADOS

3.1. Protocolo de medida para cada espectrorradiómetro

a) Espectros de reflectividad 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 permita corregir el ruido de la señal y estimar la contribución del entorno 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 del entorno sobre la muestra en estudio. La serie de medidas realizadas, en orden consecutivo, fue *panel (p)* – *oscuridad (o)* – *muestra (m)* – *panel (p)*, esta última aconsejable especialmente cuando las condiciones ambientales no son ideales (cielo no completamente despejado). La reflectividad espectral (R_{λ}) de la muestra se calcula a partir de las intensidades espectrales (I_{λ}) registradas siguiendo la ecuación:

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

Antes de empezar las medidas se requiere determinar el tiempo de integración del espectrorradiómetro, es decir, el tiempo durante el cual el sensor estará recibiendo señal. Éste debe ajustarse de manera que la mayor intensidad que se vaya a registrar, en nuestro caso la procedente del panel, sea un 85% de la capacidad del instrumento (50000 cuentas en nuestro caso, ya que su capacidad es de 65536 cuentas). Éste valor se conservó en las medidas de toda la serie, pero puede cambiar con el tiempo ya que depende de las condiciones de iluminación.

Tras evaluar las diferentes opciones proporcionadas por el software *SpectraSuite*[®], se consideró que la configuración óptima para nuestro experimento nos la proporcionaba la opción denominada *Pause-resume-export acquisitions* del menú *File/Save*. Ésta nos permite cumplir con la necesidad de realizar las medidas con el menor tiempo posible para que no cambien las condiciones de iluminación, ya que guarda los ficheros automáticamente. Además, conserva los metadatos de las medidas (día y hora, tiempo de integración, número de espectros promediados, suavización, etc.).

b) Espectros de emisividad

La medida de la emisividad en condiciones de campo con el μ FTIR D&P requiere una serie de medidas que nos permita su calibración con valores de referencia y la determinación de la contribución atmosférica a la emisión de la muestra. La calibración es posible con la medida de la radiancia procedente del cuerpo negro a dos temperaturas extremas, mientras que la radiancia reflejada por el panel (idealmente de forma lambertiana) nos permite estimar la radiancia hemisférica descendente (García-Santos *et al.*, 2013). La serie de medidas realizadas, en orden consecutivo, fue *cuerpo negro frío – cuerpo negro caliente – panel (p) – muestra (m)*. La emisividad espectral (ϵ_λ) de la muestra se calcula a partir de las radiancias espectrales (L_λ) medidas siguiendo la expresión:

$$\epsilon_{\lambda m} = \frac{L_{\lambda m} - L_{\lambda DW}}{B_\lambda(T_m) - L_{\lambda DW}} \quad (2)$$

donde $L_{\lambda DW}$ es la radiancia atmosférica descendente y B_λ es la radiancia espectral de cuerpo negro dada por la ley de Planck a la temperatura de la muestra que resulta ser otra de las incógnitas de la ecuación. Para resolver el problema de la separación de la temperatura y la emisividad, en este estudio se analizaron dos métodos:

1. El método de la “emisividad de referencia” para un pequeño intervalo espectral: extraído de medidas de laboratorio disponibles *online* sobre muestras similares o equivalentes, o estimado con la aplicación del método TES (Gillespie *et al.*, 1998) a medidas con el radiómetro multibanda CIMEL CE312-2 sobre nuestras muestras.
2. El método de la “suavización espectral”: basado en la minimización de las líneas de emisión atmosféricas en una porción del espectro, idealmente en las bandas *Reststrahlen*, partiendo de una estimación inicial de la temperatura de la muestra y variándola en pequeños intervalos. Este método es similar al propuesto por Horton *et al.* (1998).

c) Observaciones generales

Para realizar con éxito medidas espectrales en el campo fue condición indispensable medir bajo condiciones de cielo completamente despejado y sin viento. En caso contrario las medidas se hubieran visto distorsionadas por cambios en las condiciones de iluminación y/o del equilibrio térmico. Si bien el panel de referencia nos permite corregir tal efecto (siempre que la serie de medidas se realice bajo condiciones estables), ya que nos

determina la contribución atmosférica, no nos aseguró la repetitividad de las medidas.

Debido a que el Sol era la fuente principal de la irradiancia necesaria en las medidas del visible al infrarrojo cercano y a la débil sensibilidad del instrumento, fue necesario medir con el Sol a suficiente altura. Además, el USB2000+ necesitó ser inicializado unos 25' antes de empezar las medidas para permitir su estabilización, puesta de manifiesto con la estabilidad de las medidas de la oscuridad.

El intervalo espectral válido de ambos instrumentos fue inferior al medido: 400–900 nm para el USB2000+ y 8–13 μ m para el D&P. En el primer caso es posible optimizar el intervalo espectral válido considerando un tiempo de integración óptimo para diferentes porciones del espectro (Pons *et al.*, 2015). En el segundo caso no lo es, debido a la elevada absorción atmosférica en la región 2 a 8 μ m, excepto de 4,5 a 5,5 μ m.

3.2. Espectros medidos en el campo

El experimento se llevó a cabo en la terraza de la facultad de Letras y Filosofía de la Universidad Autónoma de Barcelona, y la Facultad de Física de la Universidad de Valencia, respectivamente. Los espectros de reflectividad del visible al infrarrojo cercano se obtuvieron a partir de 5 series de medidas, cada una con 5 repeticiones, realizadas en un único día (26 Marzo 2015) durante un total de unos 7' por muestra. Los espectros de emisividad a partir de 15 series de medidas, cada una con 10 repeticiones, realizadas en 3 días diferentes (5, 10 y 27 Marzo 2015) durante un total de unos 10' por muestra y día. Como ejemplo, se presentan algunos de ellos en la Figura 1, donde se incluyen espectros de laboratorio de muestras similares o equivalentes (en el caso de White Sands).

La desviación estándar observada en las medidas de reflectividades en % varía de $\pm 0,2$ a $\pm 0,6$, y de $\pm 0,005$ a $\pm 0,02$ en el caso de las emisividades. La gran variabilidad (poca precisión) observada en las medidas de emisividad de la calcita para $>11 \mu$ m se debe a la presencia de las líneas de emisión atmosféricas, no suficientemente minimizadas por el método utilizado para este intervalo espectral, y la cantidad de medidas consideradas, tomadas además en 3 días con diferentes condiciones atmosféricas. Las características espectrales singulares de cada muestra, prácticamente inexistentes en la región visible, y evidentes en el infrarrojo térmico, son bien reproducidas. Prueba de ello es la concordancia con las curvas espectrales proporcionadas por las librerías espectrales *online*, que recogen medidas de laboratorio. Así se han observado: 1) las características bandas de absorción en el infrarrojo térmico de la calcita (11,4 y 11,8 μ m), 2) la débil absorción de las bandas *Reststrahlen* del cuarzo (8,1–9,4 y 12,6 μ m), 3) el elevado contraste espectral del yeso (con emisividades de $\sim 0,74$ en 8,6–8,7 μ m) en el infrarrojo térmico inherente a la presencia de agua en los cristales de yeso, y 4) la ancha banda de absorción de la sal en el infrarrojo térmico y la ausencia de bandas de absorción en el visible e infrarrojo cercano. En particular la emisividad térmica de la sal observada en los espectros de laboratorio es $\sim 0,3$, mucho menor a la

medida en este trabajo ($\sim 0,96$), que está de acuerdo con las medidas realizadas con el método de la caja en el Salar de Uyuni (Rubio *et al.*, 1999) y las medidas que realizamos con el CIMEL y el método TES.

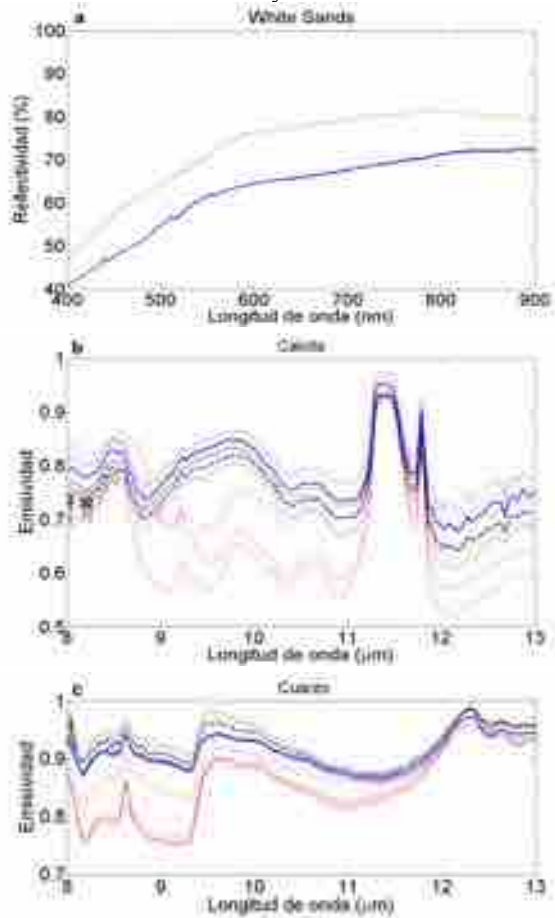


Figura 1. Valor medio (líneas gruesas) y desviación estándar (líneas finas) de espectros de reflectividad y emisividad medidos en el campo, éstos últimos obtenidos con el método de la emisividad de referencia (en negro) y el método de la suavización espectral (en azul), en comparación con espectros de laboratorio de la librería espectral ASTER (en rojo).

4. CONCLUSIÓN

La buena repetitividad de las medidas (i.e., pequeña desviación estándar) y la buena reproducción de las características espectrales singulares de cada muestra (i.e., calcita, cuarzo, yeso y sal) prueban la validez de los protocolos aplicados. Concretamente, el protocolo para obtener los espectros de reflectividad con el espectrorradiómetro “Ocean Optics USB2000+” se basa en una secuencia de medidas de la intensidad procedente del panel de referencia, de la oscuridad, de la muestra, y finalmente de nuevo del panel de referencia. En todos los casos se mide con el tiempo de integración óptimo para el panel de referencia. El protocolo aplicado para obtener los espectros de emisividad con el espectrorradiómetro “FTIR D&P modelo 102” consiste en una secuencia de medidas de la radiancia procedente del cuerpo negro a una temperatura elevada, del cuerpo negro a una

temperatura más baja, del panel de referencia y, por último, de la muestra.

Con la aplicación del método de suavización espectral es posible una estimación exacta del espectro de emisividad en el infrarrojo térmico, ya que las líneas de emisión atmosférica se suavizan (sobre todo en las bandas Reststrahlen), y no se requiere una primera estimación o asunción de la emisividad de referencia. Además, evita posibles errores en la estimación de la temperatura de la superficie terrestre y el correspondiente error en la estimación del espectro, como ocurre al aplicar el método de la emisividad de referencia (método 1).

Este estudio fue financiado por el Ministerio de Ciencia e Innovación (proyecto CGL2011-30433-C02-02, contratos de investigación “Ramón y Cajal” de la Dra. Nicolòs y “Juan de la Cierva” de la Dra. Mira), el Ministerio de Economía y Competitividad (CGL2012-33927 y CGL2013-46862-C2-1/2-P), la Generalitat Valenciana (proyecto PrometeuII/2014/086), la Generalitat de Catalunya (GRUMETS SGR2014-1491 y SGR2009-1511) y la “Institució Catalana de Recerca i Estudis Avançats” (“ICREA Academia Excellence in Research” del Dr. Pons).

5. BIBLIOGRAFÍA

- García-Santos, V., *et al.* 2013. *Evaluation of different methods to retrieve the hemispherical downwelling irradiance in the thermal infrared region for field measurements.* Ieee Transactions on Geoscience and Remote Sensing 51(4): 2155-2165.
- Horton, K. A., *et al.* 1998. *Infrared measurements of pristine and disturbed soils 2. Environmental effects and field data reduction.* Remote Sensing of Environment 64(1): 47-52.
- Korb, A. R., *et al.* 1996. *Portable Fourier transform infrared spectroradiometer for field measurements of radiance and emissivity.* Applied Optics 35(10): 1679-1692.
- Mira, M., *et al.* 2009. *Comparison of Thermal Infrared Emissivities Retrieved With the Two-Lid Box and the TES Methods With Laboratory Spectra.* Ieee Transactions on Geoscience and Remote Sensing 47(4): 1012-1021.
- Mira, M., *et al.* 2010. *Soil Moisture Effect on Thermal Infrared (8-13 μm) Emissivity.* Ieee Transactions on Geoscience and Remote Sensing 48(5)(5): 2251-2260.
- Pons, X., *et al.* 2015. *Diseño y validación del protocolo de medida para el espectrorradiómetro Ocean Optics USB2000+ en aplicaciones con sensores aeroportados y a bordo de satélite.* XIV Congreso de la Asociación Española de Teledetección.
- Rubio, E., *et al.* 1999. *Emissivity of natural surfaces in the Bolivian Altiplano: In situ measurements and mapping.* Photo-interpretation 37: 3-14.