Metodología de Inter-comparación entre Espectro-radiómetros y Paneles de Referencia: Un Enfoque Colaborativo entre Laboratorios de la Red NetOPS

Marcos Jiménez⁽¹⁾, Óscar Gutiérrez-de la Cámara⁽¹⁾, David Aragonés⁽²⁾, Juanjo Peón⁽¹⁾, Félix Muñoz⁽¹⁾, Thomas Schmid⁽³⁾, Dimas Pereira⁽⁴⁾, Álvaro Sánchez⁽⁵⁾, Mª José Muñoz⁽⁶⁾, Juncal A. Cruz⁽⁷⁾, Marco Talone⁽⁸⁾, Mª Pilar Martín⁽⁹⁾

⁽¹⁾ Instituto Nacional de Técnica Aeroespacial (INTA), Cta. Ajalvir s/n, 28850 Torrejón de Ardoz, Madrid, España. jimenezmm@inta.es, gutierrezcao@inta.es, jpeogar@inta.es, munozsf@inta.es

⁽²⁾ Laboratorio de Sistemas de Información Geográfica y Teledetección. Estación Biológica de Doñana

LAST-EBD (CSIC), Avda. Americo Vespucio 26, 41092, Sevilla, España. daragones@ebd.csic.es ⁽³⁾ Centro de Investigaciones Energéticas Medio Ambientales y Tecnológicas (CIEMAT), Avda. Complutense 40, 28040 Madrid, España. thomas.schmid@ciemat.es

⁽⁴⁾ Grupo de Investigación en Geomática e Ingeniería Cartográfica (GEOINCA), Universidad de León, Avenida de Astorga sn, 24401 Ponferrada, León, España. dpero@unileon.es

⁽⁵⁾ Grupo de Teledetección y SIG, Instituto de Desarrollo Regional (IDR), Universidad de Castilla-La Mancha, Campus Universitario s/n, 02071 Albacete, España. Alvaro.Sanchez@uclm.es

⁽⁶⁾Instituto Andaluz de Investigación y Formación Agraria y Pesquera (IFAPA). Centro Alameda del Obispo.

Avd. Menéndez Pidal s/n 14071 Córdoba, España. maria.munoz.gomez@juntadeandalucia.es

⁽⁷⁾ Grupo de Investigación Geología Ambiental, Cuaternario y Geodiversidad (Q-GEO), Universidad de León. Campus de Vegazana, s/n, 24071, León, España. jcrum@unileon.es

⁽⁸⁾ Instituto de Ciencias del Mar (ICM-CSIC), Pg. Marítim de la Barceloneta, 37, Ciutat Vella, 08003 Barcelona, España. talone@icm.csic.es

⁽⁹⁾ Laboratorio de Espectro-radiometría y Teledetección Ambiental (SpecLab), IEGD-CSIC, Albasanz 26-28, 28037, Madrid, España. mpilar.martin@csic.es

Resumen: En el marco de la recién creada red de investigación Red Española de Teledetección Óptica de Proximidad (NetOPS) que promueve la comunicación y colaboración entre la comunidad científica del ámbito de la Teledetección, y con ocasión de su reunión inicial, se realizaron dos ensayos de inter-comparación: un ensayo 1 donde se inter-compararon 8 espectro-radiómetros ASD FieldSpec® frente a una esfera integradora, un ensayo 2 donde se inter-compararon 18 paneles de calibración. Ambos ensayos aspiran a ser punto de partida para establecer protocolos de inter-comparación aceptado por los integrantes de NetOPS.

Palabras clave: Espectro-radiometría de campo, ASD FieldSpec Paneles de referencia, inter-comparación, NetOPS

Inter-comparison Methodology for spectro-radiometers and reference panels: collaborative approach between NetOPS laboratories

Abstract: In the framework of the recent established Spanish Network of Optical Proximal Sensing (NetOPS) that promotes communication and collaborations between Remote Sensing institutions, coinciding with its Kick off meeting, two inter-comparison test were performed: in the test 1, 8 field spectro-radiometers ASD FieldSpec® were inter-compared using an integrating sphere, in the test 2, 18 reference panels were inter-compared. Both tests want be starting point for an inter-comparison protocols with the agreement of all NetOPS members.

Keywords: Field Spectroscopy, ASD FiedlSpec, Reference Panels, inter-comparison, NetOPS.

1. INTRODUCCIÓN

La Red Española de Teledetección Óptica de Proximidad (NetOPS) (https://netops.csic.es/) es una red de investigación que fomenta la colaboración entre grupos de investigación de las comunidades científicas oceánica y terrestre que comparten los mismos intereses en el uso y aplicaciones de sensores multi e hiperespectrales para la obtención de información sobre el terreno y/o desde plataformas aéreas (drones, aviones). La detección óptica de proximidad se aplica en múltiples contextos, desde estudios a pequeña escala (agricultura de precisión) hasta actividades de calibración y validación (Cal/Val) de productos satelitales globales y modelado climatológico. A pesar de su uso cada vez más generalizado, el claro potencial de adquirir datos comparables que sirvan de entrada a modelos para estudiar procesos en ecosistemas naturales a escala regional o global, se puede ver comprometido por el uso de diferentes métodos y protocolos de medición, según la aplicación, instrumentación y finalidad del estudio. El objetivo de NetOPS es superar esa limitación mediante una visión centralizada de operaciones sensibles como la calibración y caracterización de sensores, el diseño de protocolos de medición y la implementación de técnicas de procesamiento de datos.

Entre las actividades de NetOPS se incluye la organización de experimentos de caracterización, calibración e

Citar como: Jiménez, M., Gutiérrez-de la Cámara, O., Aragonés, D., Peón, J., Muñoz, F., Schmidt, T., Pereira, D., Sánchez, A., Muñoz, M.J., Cruz, J.A., Talone, M., Martín, M.P. (2024). Metodología de Inter-comparación entre Espectro-radiómetros y Paneles de Referencia: Un Enfoque Colaborativo entre Laboratorios de la Red NetOPS. En *Teledetección y Cambio Global: Retos y Oportunidades para un Crecimiento Azul, Actas del XX Congreso de la Asociación Española de Teledetección*, pp. 517-520. 2024, Cádiz. Disponible en http://www.aet.org.es/?q=congresos

inter-comparación de instrumentación que permita a los miembros de la red tener un adecuado conocimiento del estado de sus equipos y garantice su comparabilidad. En la primera reunión de coordinación de la red NetOPS, realizada a finales de septiembre de 2023, se propuso llevar a cabo una jornada de experimentación de inter-comparación, invitando a todos los miembros de la red que dispongan de instrumentación comparable (espectro-radiómetros y paneles de calibración) a participar. Ambos ensayos aspiran a ser punto de partida para establecer un protocolo de inter-comparación aceptado por los integrantes de NetOPS.

2. ENSAYO 1: INTER-COMPARACIÓN ESPECRO-RADIOMETROS

El ensayo 1 tuvo como objetivo promover la evaluación de la medición de la radiancia espectral de cada uno de los espectro-radiómetros aportados por los miembros de la red y la inter-comparación con el resto de los participantes usando una esfera integradora (G-ENAC-14 Rev. 1).

2.1. Instrumentación Ensayo 1

La fuente radiométrica de referencia utilizada en este ensayo fue la esfera integradora Labsphere CSTM-USS-4000 (Custom Uniform Source System- Uniform Source Sphere) propiedad de INTA. Su interior, con un diámetro de 102 centímetros, está recubierto de spectraflect[©], un material muy reflectante, iluminado con una configuración de lámparas IHLS-DM-150 (Internal Halogen Light Sources-Direct Mount), cada una de ellas alimentada con fuentes estabilizadas LPS200 (Lamp Power Supply). La esfera dispone de diez lámparas etiquetadas cada una de ellas con letras desde la "A" a la "J". En el ensayo, se utilizaron cuatro configuraciones de lámparas alimentadas con una intensidad de 4 amperios, denominadas CEGI, CEG, CE y C. Estas configuraciones producen una radiación uniforme y constante en el puerto de salida de 20 cm de diámetro (Figura 1).

Todos los espectro-radiómetros participantes en el ensayo pertenecen a la gama ASD FieldSpec® (Malvern Panalytical, Ltd) son considerados como referentes en el ámbito de la espectro-radiometría de campo (Tabla 1). Su diseño consta de tres espectrómetros sensibles en tres regiones contiguas del espectro: uno en la región visible e infrarroja (VNIR) y dos en la región del infrarrojo medio de onda corta (SWIR01 y SWIR02), cubriendo en su conjunto el rango espectral desde 350 a 2500 nanómetros. Los instrumentos presentan un ancho de banda distinto en cada región espectral y modelo, pero los datos son re-muestreados de forma interna cada nanómetro.

Tabla 1. Es	pectro-radiómetros	participantes	en el	ensayo

-			-	
Fabricante/modelo	Propietario	S/N	ld	
ASD FS3	INTA	16040	01	
ASD FS4	SPECLAB-CSIC	18754	02	
ASD FS4	QGEO-UNILEON	18354	03	
ASD FS1 PRO FR	LAST-CSIC	06453	04	
ASD FS3 HI RES	UCLM	16206	05	
ASD FS3	IFAPA	16448	06	
ASD FS4	LAST-CSIC	18864	07	
ASD FS3	CIEMAT	16355	08	

2.2 Metodología Ensayo 1

La fibra de entrada de señal de cada espectro-radiómetro participante se posicionó a una distancia de 10 cm de la apertura de la esfera. Utilizando un accesorio diseñado a tal efecto fue posible mantener agrupadas todas las fibras alineadas con el centro de la apertura y apuntando hacia el centro de la esfera (Figura 1). Este montaje permaneció inalterado durante todo el ensayo.



Figura 1. Montaje esfera-fibras-espectro-radiómetros durante el ensayo de inter-comparación.

La incertidumbre asociada a la medición de cada instrumento se calculó como la combinación de la incertidumbre de la esfera integradora USS4000 y la del ASD FS#, obteniendo, u_{pt}^{λ} . Se estableció un procedimiento para asignar un valor en radiancia espectral a la fuente de referencia de la prueba de aptitud (*pt-Proficiency Testing*), L_{pt}^{λ} . Inicialmente, se calculó $L_{\rm pt}^{\ \lambda}$ como el promedio de la radiancia espectral de todos los instrumentos participantes (L_i^{λ}) . Se evaluó la desviación en porcentaje de cada uno, d_i^{λ} , según el criterio de selección de la Ecuación (1). El valor asignado fue L_{pt}^{λ} , en el caso que todos los instrumentos superasen el criterio. En caso de que algunos no lo superasen, se eliminó aquel con mayor desviación y se repitió el proceso de forma iterativa hasta que toda la población de instrumentos incluida en el tratamiento estadístico superó el criterio de selección.

$$d_i^{\ \lambda} = \left| 100 \cdot \frac{\left(L_i^{\ \lambda} - L_{pt}^{\ \lambda}\right)}{L_{pt}^{\ \lambda}} \right| < u_{pt}^{\ \lambda} \tag{1}$$

Para evaluar el desempeño de cada espectro-radiómetro participante en el ensayo se utilizó el estadístico Z-score como indicador significativo de dispersión de los resultados (Ecuación (2)). Se consideraron "Conformes" aquellos resultados en los que el Z-score alcanzó un valor inferior a 2. Los resultados Z-score entre 2 y 3 se clasificaron como "Dudoso" lo que indica la conveniencia de revisar la calibración. Por último, los resultados Z-score > 3 se etiquetaron como "No Conformidad", lo que, en principio obligaría a realizar una re-calibración del equipo. Cada espectro-radiómetro participante fue evaluado en el conjunto del rango espectral y también para las tres regiones espectrales coincidentes con los sensores del ASD.

$$z_i^{\ \lambda} = \left| \frac{\left(L_i^{\ \lambda} - L_{pt}^{\ \lambda} \right)}{\sigma_{pt}^{\ \lambda}} \right| \tag{2}$$

2.3 Resultados Ensayo 1

La Figura 2 muestra el resultado de la radiancia espectral asignada en cada una de las cuatro configuraciones de iluminación de la esfera USS4000. La incertidumbre expandida asociada se puede observar como el engrosamiento sombreado de la curva. La radiancia de una configuración formada por un conjunto de lámparas se observa como la radiancia de la configuración de una lámpara multiplicada por un número igual a la cantidad de lámparas utilizadas. Las distintas configuraciones permiten evaluar los espectro-radiómetros en cuatro puntos del rango radiométrico.



Figura 2. Radiancia espectral asignada en cada configuración de iluminación de la esfera durante el ensayo 1.

Al analizar el Z-Score en cada configuración de lámparas, se obtuvo el resultado de desempeño de los instrumentos participantes. La inter-comparación permite validar las medidas en radiancia espectral de aquellos que obtuvieron la conformidad y detectar los participantes cuyas medidas no son aceptables o presentan dudas, permitiéndoles tomar acciones correctivas para recuperar su validez. En la Figura 3 se muestra a modo de ejemplo los resultados para la configuración CEGI, para facilitar la interpretación grafica de los resultados se marcaron dos líneas horizontales en los valores Z-Score 2 y 3.



Figura 3 Resultados Z-Score ensayo de inter-comparación de la configuración CEGI. Cada color es asignado a un espectro-radiómetro (sin leyenda para no identificar).

El desempeño en la medida de la radiancia espectral del 70% de los espectro-radiómetros participantes resultó conforme en el ensayo 1. Se detectó un 13% con un comportamiento dudoso y no se obtuvo la conformidad para el 17% de ellos.

3. ENSAYO 2: INTER-COMPARACIÓN PANELES DE REFERENCIA

El ensayo 2 fue diseñado como un protocolo experimental para analizar y evaluar la degradación de los paneles de referencia utilizados en espectroscopia de campo (Bernad *et al.*, 2019), que resulta de gran utilidad de cara a evaluar la necesidad de proceder a su limpieza/re-calibración o sustitución, contando con criterios cuantitativos frente a los meramente cualitativos o visuales que son usados con frecuencia.

3.1. Material Ensayo 2

I

Para la medición de los paneles se utilizó en este ensayo un único espectro-radiómetro, un ASD FieldSpec® 3 con número de serie 16474 propiedad del INTA. Se utilizó como panel de referencia (Master) un spectralon calibrado con reflectividad del 99% y número de serie 99AA02-0623-4706, propiedad del LAST-EBD. Se utilizó este panel por ser el que contaba con la calibración más reciente y menor uso de todos los empleados en el ensayo. Para el seguimiento de las condiciones atmosféricas se utilizó el fotómetro solar Microtops II.

En la Tabla 2 se pueden ver las características (tamaños y niveles de reflectancia) de los 18 paneles de referencia inter-comparados. Fueron convenientemente etiquetados para facilitar su identificación, la clave de nomenclatura de los paneles fueron: tres caracteres para indicar el grado de reflexión (W para blanco y G para gris), P para panel, y tamaño (L para grandes y S para pequeños), varios caracteres para identificar el organismo propietario, y un carácter para el número.

 Tabla 2. Lista y características de Paneles de referencia participantes en la inter-comparación.

Orden	Código	Tamaño	Reflectancia	Referencia	Calibración
Master	WPL LAST 2	25X25 cm	99%	99AA02-0623-4706	15/06/2023
1	WPL_QGEO_1	25x25 cm	99%		
2	WPL_UCLM_1	25x25 cm	99%		
3	WPL_SPECLAB_1	25x25 cm	99%		
4	WPL_LAST_1	25x25 cm	99%	43203-5-1	//2011
5	WPL_CIEMAT_2	25x25 cm	99%		
6	WPL_CIEMAT_1	25x25 cm	99%		
7	WPL_IFAPA_1	25x25 cm	99%		
8	GPL_LAST_1	25x25 cm	10%	49385-1-1	16/08/2006
9	GPL_INTA_1	25x25 cm	25%		
10	WPS_SPECLAB_2	10x10 cm	99%		
11	WPS_CIEMAT_1	10x10 cm	99%		
12	WPS_CIEMAT_2	10x10 cm	99%		
13	WPS_LAST_1	10x10 cm	99%	99AA10-0120-3951	17/03/2020
14	WPS_INTA_1	10x10 cm	99%		
15	WPS_LAST_2	10x10 cm	99%	99AA04-0920-4454	21/10/2020
16	WPS_INTA_2	10x10 cm	99%		
17	WPS_SPECLAB_1	10x10 cm	99%		
18	GPS_INTA_1	10x10 cm	25%		

En la Figura 4 se puede ver el montaje experimental desplegado en el exterior del edificio del Área de Sistemas de Teledetección del INTA, alejada de fuentes de radiación difusa procedentes de edificios colindantes. La fibra óptica del ASD (FOV = 25°) se instaló en un trípode con un brazo extensor y apuntando nadiralmente a una mesa cubierta con un plástico negro de reflectividad nula en todo el espectro para evitar efectos de radiación difusa procedentes de la propia mesa de medidas. La fibra quedó fijada a una altura de 35 cm de la superficie de la mesa de medición. Dicha altura se calculó para que el FOV abarcara aproximadamente la mitad de la superficie central de los paneles grandes y una superficie equivalente en los paneles pequeños después de colocarles sobre un soporte elevado.



Figura 4. Montaje inter-comparación paneles

3.2 Métodos Ensayo 2

Un primer indicador para evaluar la comparación de los distintos paneles con el panel Master fue la diferencia relativa porcentual de las radiancias espectrales (RPDcal). Este indicador se calcula utilizando la Ecuación (3) con la media de la radiancia espectral del panel (Lp) incluyen las respectivas calibraciones (Cal_Panel), siendo 1 en caso de ser un panel sin calibración, frente a la media de la radiancia espectral del panel de referencia (Lm) incluyendo su calibración (Cal_master). Un segundo indicador fue a nivel de reflectividad absoluta de cada panel, y para un análisis más detallado de la degradación de los paneles, se calculó la distancia promedio en valor absoluto para cada región del espectral (DRE), incluyendo las calibraciones de cada panel (Ecuación 4).

$$RPD_{cal}{}^{\lambda} = 100 \cdot \frac{\left(Lp^{\lambda} - Lm^{\lambda}\right)}{Lm^{\lambda}}$$
(3)

$$DRE = \frac{\sum_{1}^{\lambda} \sqrt{\left(\left(\frac{\bar{x}_{p}^{\lambda}}{\bar{x}_{M}^{\lambda}} * cal_{master}^{\lambda}\right) - cal_{panel}^{\lambda}\right)^{2}}}{n_{\lambda}}$$
(4)

3.3 Resultados Ensayo 2

El análisis visual de la RPDcal muestra la situación tan heterogénea de los paneles de referencia que usan los integrantes de la red. Existiendo solo unos pocos paneles en perfecto estado de conservación mientras que el resto presentan problemas importantes tanto en las regiones del visible como del SWIR (Figura 5). Como ejemplo de los resultados obtenidos con el DRE (Tabla 3) podemos ver como las distancias mayores se alcanzan en la región espectral del aerosol costero salvo en el panel WPL-Speclab_1 en donde todos los valores son muy bajos siendo uno de los paneles mejor conservados.

4. CONCLUSIONES

Esta primera jornada de inter-comparación de instrumentos y paneles de referencia ha permitido detectar aquellos espectro-radiómetros que requieren ser enviados a revisión a fabrica, para asegurar la buena calidad de las mediciones y en la mala situación que se encuentran algunos de los paneles de referencia que hoy en día se están utilizando. Es importante remarcar el gran interés y utilidad que está teniendo la red NetOPS para sus integrantes y la mejora sustancial en los servicios que ofrece no solamente el CSIC sino otras instituciones de investigación españolas. No queremos dejar pasar la oportunidad para

520

invitar al resto de usuarios de la teledetección óptica de proximidad a participar en NetOPS.



Figura 5. Valores de RDPcal de todos los paneles.

1000	i S. valores	DRE de 4 de l	los puneles.	•
Regiones	WPL	WPL	WPL	WPL
espectrales	QGEO_1	SPECLAB_1	LAST_1	IFAPA_1
CA (0.4-0.45)	2.28%	0.14%	8.22%	11.44%
B (0.45-0.5)	1.49%	0.05%	6.10%	7.60%
G (0.5-0.6)	0.83%	0.11%	4.10%	4.57%
R (0.6-0.7)	0.44%	0.16%	2.58%	2.68%
R Edge (0.7-0.8)	0.23%	0.12%	1.70%	1.81%
NIR_A (0.8-0.9)	0.16%	0.13%	1.16%	1.33%
NIR_B (0.9-1.1)	0.08%	0.16%	0.65%	0.99%
NIR_C (1.2-1.3)	0.08%	0.10%	0.26%	0.57%
SWIR-1 (1.5-1.7)	0.05%	0.14%	0.06%	0.43%
SWIR-2 (2.1-2.3)	0.22%	0.18%	0.26%	0.26%
TOTAL	0.36%	0.14%	1.58%	1.99%

5. AGRADECIMIENTOS

Este trabajo se ha realizado en el marco de la red NetOPS que es una red de investigación concedida por Agencia Estatal de Investigación en la convocatoria 2022. También contó con el soporte de Asociación Española de Teledetección.

6. BIBLIOGRAFÍA

- G-ENAC-14. (2008). Rev. 1 Guía sobre la participación en programas de intercomparación. ENAC, septiembre 2008.
- Bernad, B., Ferrero, A., Strothkämper, C., Campos, J.,Pons, A., Quast, T., Hauer, K.-O., Schirmacher, A. (2019). Deviation of white diffuse reflectance standards from perfect reflecting diffuser at visible and near-infrared spectral ranges. *Metrologia*, 56, 055005