

Evaluación de sensores hiperespectrales para la estimación del carbono orgánico del suelo

Juanjo Peón^(1,2), Carmen Recondo^(1,2), Susana Fernández^(2,3) y Javier F. Calleja⁽⁴⁾

⁽¹⁾ Área de Ingeniería Cartográfica, Geodésica y Fotogrametría. Dpto. de Explotación y Prospección de Minas. Universidad de Oviedo. Gonzalo Gutiérrez Quirós s/n, 33600 Mieres, Asturias, España.

Emails: peonjuan@uniovi.es, mdrecondo@uniovi.es

⁽²⁾ Instituto de Recursos Naturales y Ordenación del Territorio (INDUROT). Universidad de Oviedo. Gonzalo Gutiérrez Quirós s/n, 33600 Mieres, Asturias, España.

⁽³⁾ Dpto. de Geología. Universidad de Oviedo. Jesús Arias de Velasco s/n, 33005 Oviedo, Asturias, España.
Email: fernandezmsusana@uniovi.es

⁽⁴⁾ Dpto. de Física. Universidad de Oviedo. Gonzalo Gutiérrez Quirós s/n, 33600 Mieres, Asturias, España.
Email: jfcalleja@uniovi.es

Resumen: El objetivo de este trabajo es la identificación de los sensores y regiones del espectro más adecuados para la estimación del carbono orgánico del suelo (TOC) en el suroccidente de Asturias (noroeste de España). Se evalúan tres sensores hiperespectrales (Hyperion, CASI y AHS) y uno multiespectral, Landsat-5 TM. Los espectros de reflectividad de un conjunto de muestras de suelo se remuestran para los distintos sensores y se calibran modelos PLSR (Partial Least Squares Regression) de TOC para varias regiones del espectro. Se comparan los resultados y se determinan las regiones del espectro más importantes para la estimación de TOC.

Palabras clave: carbono orgánico, teledetección hiperespectral, espectroscopía VIS-NIR, CASI, AHS, Hyperion

Evaluation of hyperspectral sensors for estimating soil organic carbon

Abstract: The aim of this work is to identify the most suitable sensors and regions of the spectrum for estimation of soil organic carbon in southwest Asturias (northwest Spain). Three hyperspectral sensors (Hyperion, CASI, and AHS) and one multispectral, Landsat-5 TM, are evaluated. The reflectance spectra of a set of soil samples are resampled for the different sensors and PLSR (Partial Least Squares Regression) models of TOC are calibrated for several regions of the spectrum. The results are compared and the most important regions of the spectrum for estimation of TOC are determined.

Keywords: organic carbon, hyperspectral remote sensing, VIS-NIR spectroscopy, CASI, AHS, Hyperion

1. INTRODUCCIÓN

El suelo contiene la principal reserva de carbono de la superficie terrestre y contribuye significativamente al secuestro de CO₂ atmosférico (Batjes, 1996). Representa un sumidero de carbono de gran importancia, con repercusión en el ciclo global del carbono. El fuego es un factor capaz de transformar el carbono del suelo y estas alteraciones inducidas por el fuego pueden tener efectos significativos en el ciclo global del carbono. El tamaño y dinámica de los sumideros de carbono en el mundo son todavía ampliamente desconocidos y su evaluación se realiza tradicionalmente mediante el análisis de bases de datos de perfiles de suelo.

La teledetección es una técnica especialmente interesante para la cartografía de propiedades del suelo. Su aportación como complemento o incluso alternativa a los métodos tradicionales es de gran importancia. Las técnicas de laboratorio utilizadas en el ámbito de la espectroscopía para la estimación de propiedades edáficas se basan en el uso de espectros continuos y son ampliamente aceptadas debido a su capacidad de estimar de manera precisa múltiples propiedades del suelo (Viscarra Rossel et al., 2006). El desarrollo de la teledetección hiperespectral en las últimas décadas ha permitido la caracterización espectral de la superficie terrestre con una precisión comparable en algunos casos

a la obtenida en el laboratorio. La elevada resolución espectral de las imágenes hiperespectrales permite la estimación de propiedades del suelo mediante métodos de espectroscopía utilizados tradicionalmente en el laboratorio.

En este trabajo se evalúa el potencial e idoneidad de varios sensores para la estimación del carbono del suelo en un ecosistema natural, situado en el suroccidente de Asturias, en una región en la que el uso del fuego durante milenios ha alterado y transformado el carbono contenido en el suelo. Los sensores hiperespectrales elegidos en este trabajo son los aeroportados CASI (*Compact Airborne Spectrographic Imager*) y AHS (*Airborne Hyperspectral Scanner*), y el sensor Hyperion, instalado en el satélite EO-1 (*Earth Observing-1*). También se selecciona el sensor multiespectral Landsat-5 TM, para contrastar el resultado de los sensores hiperespectrales con un sensor de resolución espectral significativamente inferior. Todos los sensores seleccionados tienen imágenes disponibles para la zona de estudio, en el caso de AHS y CASI cedidas por el Área de Teledetección del Instituto Nacional de Técnica Aeroespacial (INTA).

2. MATERIAL Y MÉTODOS

Para la evaluación de los sensores se utilizan los espectros de reflectividad de un conjunto de muestras de

suelo del área de estudio, obtenidos en el laboratorio con un espectrómetro. Los espectros se remuestran utilizando las curvas de respuesta espectral de los distintos sensores con el objeto de simular la respuesta de las muestras de suelo en cada uno de ellos. Posteriormente se realizan modelos de predicción con los espectros remuestrados para cada sensor y se comparan los resultados obtenidos, con el fin de analizar el efecto de la resolución espectral en la estimación del carbono del suelo.

2.1. Área de estudio y muestras de suelo

El área de estudio se sitúa en el entorno de la Reserva de la Biosfera de Muniellos, en la zona oeste de la Cordillera Cantábrica (Asturias, noroeste de España). La región seleccionada es idónea para este análisis debido a su larga historia de incendios forestales. Los suelos en estas áreas de montaña de elevada recurrencia de incendios están enriquecidos en carbono orgánico en cantidades que pueden llegar a triplicar las encontradas en suelos naturales (Fernández-Menéndez et al., 2011). Como consecuencia del reiterado uso del fuego, los suelos y la vegetación han sufrido una fuerte degradación. La vegetación natural ha desaparecido en la mayor parte de la región y actualmente la vegetación predominante es el brezal.

En el verano de 2013 se tomaron aleatoriamente 89 muestras de los 5 cm superiores del suelo en tres zonas situadas en el norte, centro y sur del área de estudio. Todas las muestras se tomaron en laderas parcialmente cubiertas de brezo, resultado de la regeneración post-incendio. Las muestras se trasladaron al laboratorio, se secaron a 70°C, se tamizaron a 2 mm y se determinó el contenido de carbono orgánico total (*Total Organic Carbon*, TOC) por combustión seca a 950°C.

2.2. Espectros de laboratorio

Las muestras se escanearon en el laboratorio con un espectrómetro ASD LabSpec® 2600 (350-2500 nm). Se tomaron 10 medidas por muestra que se promediaron para obtener un espectro de reflectividad representativo de cada una de ellas. Posteriormente se acortaron los espectros de 350-2500 nm a 400-2450 nm debido a la presencia de ruido al inicio y final de los mismos.

2.3. Remuestreo de espectros

Se simuló la respuesta de las muestras de suelo para cada uno de los sensores seleccionados en el trabajo. Para ello se remuestraron los espectros de reflectividad (400-2450 nm) de las 89 muestras de suelo utilizando las curvas de respuesta espectral de los distintos sensores. A continuación se indican las características principales de los cuatro sensores seleccionados:

- CASI 1500i (*Compact Airborne Spectrographic Imager*)
Es un sensor hiperespectral aerportado, de tipo óptico y de barrido. El FOV (*Field Of View*) es de 40° y el IFOV (*Instantaneous Field Of View*) de 0,5 mrad. La configuración del instrumento puede ser optimizada para aplicaciones específicas, ya que permite situar los canales en cualquier zona situada

en la región ~380-1050 nm. Dado que la resolución espectral de este sensor puede variar entre imágenes, en este trabajo se utilizó la misma resolución que la empleada en el vuelo realizado sobre la zona de estudio: 144 bandas en la región 368-1053 nm, con FWHM (*Full Width at Half Maximum*) de 6 nm. Se eliminaron las 8 primeras bandas que no solapaban con los espectros de laboratorio, por lo que en total se emplearon 136 bandas. La resolución espacial de la imagen CASI de la zona de estudio es de 1.5 m y la altura de vuelo sobre el terreno de 1859 m.

- AHS (*Airborne Hyperspectral Scanner*)
Sensor hiperespectral y aerportado. Es un escáner lineal de tipo *whisk-broom*. El FOV es de 90° y el IFOV de 2,5 mrad. Tiene 80 canales: 63 en la región óptica del espectro (visible, infrarrojo cercano e infrarrojo medio de onda corta, VIS-NIR-SWIR), 7 en la región 3177-5251 nm del infrarrojo medio (MIR), y 10 en la región 8310-12952 nm del infrarrojo térmico (TIR). De los 80 canales disponibles, en este trabajo se seleccionaron los que solapaban con los espectros de laboratorio, y que además tenían una relación señal-ruido (*Signal-to-Noise Ratio*, SNR) superior a 10 en la imagen de la zona de estudio. En total se utilizaron 38 canales en la región 443-2326 nm, con FWHM variable entre 14 y 85 nm. La resolución espacial es de 5 m para una altura de vuelo sobre el terreno de 1859 m.
- Hyperion
Es el primer sensor hiperespectral en órbita terrestre, instalado en el satélite *Earth Observing One* (EO-1) de la NASA. Este satélite describe una órbita heliosíncrona a una altitud de 705 km, con un periodo de 16 días y posee capacidad de apuntamiento lateral. El FOV de Hyperion es de 0,63° y el IFOV de 0,043 mrad. Tiene un único telescopio y dos espectrómetros de tipo *pushbroom*: Visible-Near Infrared (VNIR, Bandas 1-70) y Short-Wave Infrared (SWIR, Bandas 71-242). Tiene 242 bandas en la región 360-2580 nm con FWHM de 10-12 nm. De las 242 bandas disponibles, en este trabajo se seleccionaron las 155 bandas estables propuestas por Datt et al. (2003) como combinación de bandas efectiva para evitar el ruido. Todas ellas solapan con los espectros de laboratorio de las muestras de suelo. La resolución espacial es de 30 m.
- Landsat-5 TM (*Thematic Mapper*)
En este trabajo también se seleccionó el sensor multiespectral TM de Landsat-5, ampliamente utilizado por la comunidad científica. Este satélite describe una órbita heliosíncrona a una altitud de 705 km, con un periodo de 16 días. El sensor TM es de tipo *whisk-broom* y tiene 7 bandas en el visible e infrarrojo, centradas entre 485 y 11435 nm. En este trabajo se utilizaron únicamente las 6 bandas de la región óptica que solapaban con los espectros de laboratorio. La resolución espacial de las bandas ópticas de Landsat-5 TM es de 30 m.

En la tabla 1 se indica el número de bandas seleccionadas de los sensores anteriores, así como el número de bandas en cada una de las tres divisiones del óptico (400-2500 nm): visible (VIS, 400-700 nm), infrarrojo próximo o cercano (NIR, 700-1300 nm) e infrarrojo medio de onda corta (SWIR, 1300-2500 nm).

Tabla 1. Número de bandas seleccionadas y resolución espacial de los sensores utilizados. HYP: Hyperion, L5TM: Landsat-5 TM.

Resolución del sensor	CASI 1500i	AHS	HYP	L5TM
Número de bandas:				
VIS (400-700 nm)	62	9	27	3
NIR (700-1300 nm)	74	10	57	1
SWIR (1300-2500 nm)	-	19	71	2
VIS-NIR-SWIR	136	38	155	6
Resolución espacial (m)	1,5	5	30	30

Para el remuestreo de los espectros de reflectividad de las muestras de suelo se utilizaron las curvas de respuesta espectral de los cuatro sensores. En el caso de AHS y Landsat-5 TM se dispone de las curvas de respuesta espectral, mientras que en el caso de los sensores Hyperion y CASI 1500i éstas se obtuvieron utilizando un modelo Gaussiano, en el que la curva de respuesta espectral de cada banda se calculó en función de su longitud de onda y FWHM. En la figura 1 se muestra a modo de ejemplo el resultado del remuestreo de un espectro para el sensor Landsat-5 TM.

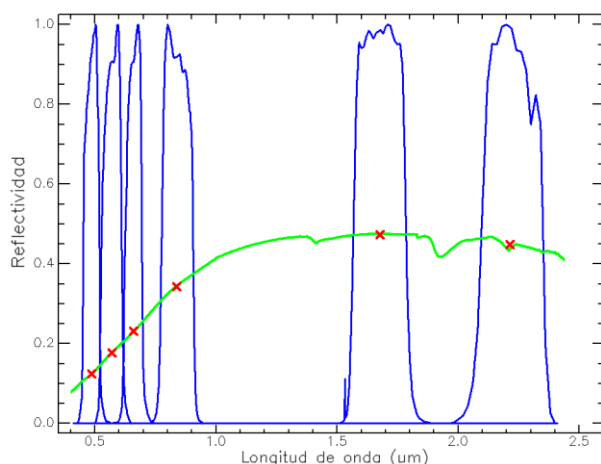


Figura 1. Ejemplo de remuestreo del espectro de una muestra de suelo para el sensor Landsat-5 TM. Curvas de respuesta espectral de Landsat-5 TM (azul), espectro de reflectividad de la muestra de suelo (verde), y espectro remuestreado (rojo).

2.4. Modelización del carbono del suelo

Los espectros de reflectividad remuestreados para los cuatro sensores se convirtieron a log (1/reflectividad), dado que el resultado de los modelos mejoró con esta transformación. También se evaluaron otras técnicas de pre-procesamiento de espectros, como el centrado y escalado de los mismos, pero finalmente se descartó la utilización de estas técnicas debido a que el resultado de los modelos no mejoró significativamente.

A continuación se asoció el valor de carbono (TOC) de cada muestra a los espectros remuestreados y posteriormente se modelizó el carbono. La técnica empleada para la modelización fue la regresión de mínimos cuadrados parciales (*Partial Least Squares Regression*, PLSR), una técnica de análisis estadístico multivariante utilizada frecuentemente en el ámbito de la Quimiometría (Wold et al., 2001). Permite generar modelos de predicción en conjuntos de datos con un gran número de variables explicativas, y que se encuentran altamente correlacionadas entre sí (multicolinealidad), como ocurre en los espectros de laboratorio. El objetivo que se persigue al ajustar un modelo PLSR es encontrar un número bajo de componentes que expliquen la mayor parte de la variación tanto de las variables explicativas, como de las variables respuesta. El número de componentes a incluir en cada modelo se seleccionó mediante validación cruzada *leave-one-out*. La selección del número óptimo de componentes se realizó minimizando el criterio de información de Akaike (*Akaike Information Criterion*, AIC). AIC permite establecer un compromiso entre la bondad de ajuste del modelo y la complejidad del mismo (Akaike, 1969). Se calibraron modelos de predicción de carbono para los cuatro sensores en las cuatro regiones del espectro (VIS, NIR, SWIR y VIS-NIR-SWIR). La calibración del modelo para CASI en el SWIR no fue posible debido a que este sensor no tiene bandas en esta región (Tabla 1). En el caso de Landsat-5 TM únicamente se obtuvo el modelo en el VIS-NIR-SWIR debido al bajo número de bandas de este sensor. A pesar de que la técnica PLSR es adecuada para sensores con un elevado número de bandas, se utilizó también en el caso de Landsat-5 TM, para permitir la comparación de resultados entre sensores utilizando la misma técnica de modelización. El software utilizado para la calibración de los modelos PLSR fue ParLeS v 3.1 (Viscarra Rossel, 2008).

2.5. Evaluación de modelos

La habilidad de predicción de los modelos se evaluó mediante los siguientes parámetros obtenidos en la validación cruzada: coeficiente de determinación (R^2) y error cuadrático medio (RMSE).

3. RESULTADOS

Los valores de carbono (TOC) obtenidos en el laboratorio para las 89 muestras de suelo varían entre 4,3 y 63,2%, con un valor medio de 29,4% y una desviación típica de 14,9%.

En la Tabla 2 se indican los parámetros de los modelos PLSR de TOC para los distintos sensores y regiones del espectro, así como el R^2 y RMSE obtenido en la validación cruzada. En el VIS los resultados son muy similares para los tres sensores hiperespectrales, con $R^2=0,76-0,78$ y $RMSE=7,05-7,24\%$. Los mejores resultados en el VIS se obtienen con el sensor AHS. En el NIR se observan mayores discrepancias entre sensores, el mejor resultado se obtiene con Hyperion ($R^2=0,72$ y $RMSE=7,97\%$) y el peor con AHS ($R^2=0,59$ y $RMSE=9,54\%$). Los peores resultados obtenidos con

AHS y CASI se atribuyen a la distribución de sus bandas en el NIR, situadas únicamente en la región ~700-1050 nm. CASI tiene mayor número de bandas en el NIR y más estrechas que Hyperion (CASI: 74 bandas con FWHM=6 nm, Hyperion: 57 bandas con FWHM=10-12 nm), sin embargo su distribución es menos adecuada para la estimación de TOC que la de Hyperion, cuyas bandas cubren completamente la región del NIR (700-1300 nm). Los dos sensores analizados en el SWIR, Hyperion y AHS, obtienen resultados muy similares ($R^2 \sim 0,8$ y RMSE ~7%), ligeramente mejores para el sensor AHS. Los mejores modelos para los tres sensores hiperespectrales se obtienen en la región VIS-NIR-SWIR ($R^2=0,78-0,81$ y RMSE=6,55-7,06%). No obstante, los modelos en esta región no son significativamente mejores a los obtenidos en el SWIR con los sensores Hyperion y AHS.

Tabla 2. Parámetros de los modelos PLSR de TOC y resultados de la validación cruzada. Número de muestras (n): 89. NC: número de componentes PLSR seleccionadas. AIC: Akaike Information Criterion.

Región	Parámetro	CASI 1500i	AHS	HYP	L5TM
VIS	NC	6	6	6	
	AIC	188,1	185,8	187,1	-
	R^2	0,76	0,78	0,77	
	RMSE (%)	7,24	7,05	7,15	
NIR	NC	8	7	6	
	AIC	211,0	214,8	196,8	-
	R^2	0,65	0,59	0,72	
	RMSE (%)	8,95	9,54	7,97	
SWIR	NC		6	5	
	AIC	-	180,9	184,1	-
	R^2		0,80	0,77	
	RMSE (%)		6,67	7,07	
VIS-NIR-SWIR	NC	8	7	7	6
	AIC	189,9	181,2	185,7	209,8
	R^2	0,78	0,81	0,79	0,62
	RMSE (%)	7,06	6,55	6,88	9,23

El mejor modelo para la estimación de TOC se obtuvo con el sensor AHS en la región VIS-NIR-SWIR ($R^2=0,81$ y RMSE=6,55%). La precisión de este modelo es satisfactoria en relación al rango de TOC observado en las muestras (4,3-63,2%).

El error del modelo con Landsat-5 TM en el VIS-NIR-SWIR es un ~30-40% superior al obtenido con los sensores hiperespectrales en la misma región, lo que demuestra la eficacia de los sensores hiperespectrales frente a los multispectrales para la estimación del carbono del suelo.

4. CONCLUSIONES

Se ha analizado el efecto de la resolución espectral en la estimación del carbono orgánico del suelo (TOC) usando sensores hiperespectrales y multispectrales. Los resultados obtenidos han permitido identificar los

sensores y regiones del espectro con mayor potencial para la estimación de TOC. En este sentido, son especialmente interesantes los sensores Hyperion y AHS, y las regiones VIS-NIR-SWIR y SWIR. Los resultados obtenidos en este trabajo son muy útiles para la posterior cartografía de TOC en la zona de estudio, con las imágenes disponibles de los cuatro sensores analizados.

5. AGRADECIMIENTOS

Este trabajo ha recibido financiación del Gobierno del Principado de Asturias a través del proyecto SV-PA-13-ECOEMP-40. J. Peón tiene una ayuda predoctoral del Programa "Severo Ochoa" del Gobierno del Principado de Asturias (BP14-104) y anteriormente (año 2014) un contrato predoctoral 2013 para la formación en investigación y docencia en la Universidad de Oviedo.

6. BIBLIOGRAFÍA

- Akaike, H. 1969. *Fitting autoregressive models for prediction*. Annals of the Institute of Statistical Mathematics, 21, 243-247.
- Batjes, N.H. 1996. *Total carbon and nitrogen in the soils of the world*. European Journal of Soil Science, 47, 151-163.
- Datt, B., McVicar, T.R., Van Niel, T.G., Jupp, D.L.B., & Pearlman, J.S. 2003. *Preprocessing EO-1 Hyperion hyperspectral data to support the application of agricultural indexes*. Ieee Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 41, 1246-1259.
- Fernández-Menéndez, S., Santín, C., Cabo, C., Menéndez, R.A., & Álvarez, M.A. 2011. *Incendios forestales y transferencia de carbono biomasa-suelo en áreas montañosas de clima atlántico*. In XIV Congreso de la Asociación Española de Teledetección (AET): Bosques y cambio climático, pp. 217-220. Ed. by C. Recondo & E. Pendás. Mieres (Asturias).
- Viscarra Rossel, R.A. 2008. *ParLeS: Software for chemometric analysis of spectroscopic data*. Chemometrics and Intelligent Laboratory Systems, 90, 72-83.
- Viscarra Rossel, R.A., Walvoort, D.J.J., McBratney, A.B., Janik, L.J., & Skjemstad, J.O. 2006. *Visible, near infrared, mid infrared or combined diffuse reflectance spectroscopy for simultaneous assessment of various soil properties*. Geoderma, 131, 59-75.
- Wold, S., Sjöström, M., & Eriksson, L. 2001. *PLS-regression: a basic tool of chemometrics*. Chemometrics and Intelligent Laboratory Systems, 58, 109-130.