

ESTIMACIÓN DE BIOMASA EN *PINUS RADIATA* (D. DON) A PARTIR DE ÍNDICES DERIVADOS DE IMÁGENES CCD-CBERS

E. Sevillano-Marco (*), C. Quintano (**), A. Fernández-Manso (*), Y. E. Shimabukuro (***)

(*)Universidad de León. Departamento de Ingeniería y Ciencias Agrarias, Escuela Superior y Técnica de Ingeniería Agraria, Avda. de Astorga SN, 24400 Ponferrada (León). evadevanos@gmail.com

(**)Universidad de Valladolid Departamento Tecnología Electrónica, Escuela Universitaria Politécnica, Francisco Mendizábal, 1, 47014-Valladolid.

(***)INPE- Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais. Av. dos Astronautas, 1758.
12.227-010 São José dos Campos – SP., Brasil.

RESUMEN

La información obtenida a partir de imágenes Charge-Coupled Device (CCD) del satélite Chinese-Brazilian Earth Resources Satellite (CBERS) ha sido escasamente utilizada en España. En este trabajo se estudia el potencial de estas imágenes para la estimación de parámetros forestales, en especial la biomasa aérea y el carbono. El área de estudio comprende 150 km² (noroeste de Castilla y León) y está poblada por masas de *Pinus radiata* (D. Don). Se estableció una red de 45 parcelas permanentes que fueron inventariadas durante el verano de 2003. Resultados preliminares satisfactorios refuerzan la idea de la utilidad de imágenes CCD-CBERS en el estudio de los sistemas forestales españoles.

ABSTRACT

Information from satellite imagery from Charge-Coupled Device (CCD) from the Chinese-Brazilian Earth Resources Satellite (CBERS) has scarcely been used in Spain. In this work, the potential of these images in the estimation of stand variables, especially aboveground biomass and carbon, is analysed. The area of study covers 150 km² (NW of Castilla y León), with an important surface of *Pinus radiata* (D. Don) stands. For the study, a network of 45 permanent sample plots was established and an inventory was carried out during the summer of 2003. Preliminary results are satisfactory and reinforce the conviction of usefulness of CCD-CBERS images in assessing forestry systems in Spain.

Palabras clave: CBERS, *Pinus radiata* (D. Don), índices de vegetación, biomasa, carbono.

INTRODUCCIÓN

La teledetección proporciona información sobre volumen, biomasa y otros parámetros biofísicos de las masas forestales, por lo que las imágenes de satélite son una fuente de datos importante para la gestión forestal. Se ha demostrado su utilidad en la cuantificación del carbono almacenado en los bosques, en un amplio rango de escalas espaciales y ambientes (Håme *et al.* 1997, Laidler y Treitz 2003, Stenberg *et al.* 2004). Aunque los datos obtenidos mediante técnicas de teledetección proporcionen parte de la información requerida para la actualización de los inventarios forestales en bosques gestionados (Danson y Curran 1993, Wulder *et al.* 2004), la relación entre las reflectancias espectrales y las variables de masa más importantes debe comprobarse para confirmar la utilidad de los datos de imágenes de satélite, para las diferentes especies y localizaciones geográficas y bajo diferentes esquemas de gestión. En este sentido, los datos proporcionados por el Chinese-Brazilian Earth Resources Satellite (CBERS) no han sido utilizados apenas en España.

En el presente trabajo se examina el potencial de las imágenes CBERS para la estimación de biomasa aérea de las masas de *Pinus radiata* (D. Don) en la Comarca de El Bierzo (Castilla y León). Para ello, se analizan las relaciones estadísticas entre los datos procesados de parcelas permanentes y las bandas, originales y sintéticas, de la imagen de satélite. Esta especie ha sido elegida porque entre los diferentes ecosistemas terrestres, y de forma general, las especies de crecimiento rápido, sobretudo coníferas, son los principales almacenes de carbono (Laclau 2003).

MATERIAL Y MÉTODOS

La zona de estudio es la comarca castellanoleonesa de El Bierzo (León), en el noroeste de la región, donde el clima y el declive de actividades agrícolas han favorecido el establecimiento de plantaciones comerciales extensivas. A pesar de que la especie ha sido relativamente recientemente introducida, el *Pinus radiata* (D. Don) actualmente ocupa una superficie

estimada de 150 km² (Fernández-Manso *et al.* 2001). (Figura 1).

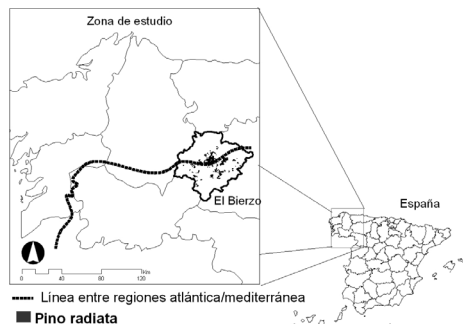


Figura 1. Distribución de *Pinus radiata* (D. Don) en el área de estudio.

Se han empleado dos tipos de información. Por un lado, se han utilizado los datos de campo recogidos en el inventario forestal realizado durante el verano de 2003 en la red de 45 parcelas permanentes establecida por la Universidad de León en masas puras de plantaciones de *Pinus radiata* (D. Don). En este trabajo, se ha considerado únicamente la variable biomasa aérea total (W , t) (Tabla 1).

Tabla 1. Principales estadísticos de W (biomasa).

	Media	Máximo	Mínimo	D.S.
Biomasa (W) (t)	4.6	16.0	0.5	3.3

Por otro lado, se ha empleado la información contenida en la imagen recogida por el sensor Charge-Coupled Device (CCD) a bordo del satélite CBERS el día 5 de noviembre de 2004. Las imágenes CCD CBERS tienen una resolución espacial de 20x20m y 5 bandas espectrales: azul, verde, rojo, infrarrojo cercano y pancromático. Una descripción más detallada del satélite CBERS y de los sensores a bordo de él puede ser consultada en <http://www.cbbers.inpe.br>.

Respecto a la metodología empleada, se han seguido las siguientes etapas:

1-Preprocesamiento. La imagen CCD-CBERS, corregida radiométrica y geoméricamente por Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE) de Brasil, fue registrada con la red de parcelas de campo disponibles utilizando el sistema Universal Transverse Mercator (UTM), ED50-29n, empleando remuestreo mediante la técnica del vecino más próximo, obteniendo un error de desplazamiento

siempre inferior a un píxel. A continuación, se obtuvieron diferentes índices de vegetación para comprobar su relación con las variables de masa consideradas. Los índices seleccionados fueron: Global Environmental Monitoring Index (GEMI), Soil-Adjusted Vegetation Index (SAVI), y Normalized Difference Vegetation Index (NDVI). Dichos índices son función de la reflectividad en las bandas rojo e infrarrojo cercano, bandas que ya han demostrado su utilidad en este tipo de estudios (Lefsky *et al.* 2001, Vázquez 2008). Asimismo dichas imágenes de índices de vegetación fueron filtradas mediante un filtro bajo 3x3, como paso previo a la extracción de los valores digitales que se corresponden con las parcelas de campo consideradas. De este modo, se minimiza el efecto del error de desplazamiento, pequeño pero existente, entre la imagen de satélite y la red de parcelas.

2-Elaboración de la base de datos de trabajo. Se extrajo la información de las bandas originales y de las imágenes SAVI, GEMI, y NDVI en las parcelas consideradas. Estos valores se añadieron a la información obtenida en el inventario de campo para formar la base de datos de trabajo.

3-Construcción y validación de modelo estadístico. Una submuestra de parcelas de ensayo fue aleatoriamente seleccionada para la estimación del modelo que mejor defina la relación entre W y la información obtenida a partir de la imagen de satélite. Las relaciones estadísticas entre W medida en campo y los valores de los índices considerados para cada parcela se analizaron mediante análisis de correlación. Para las pruebas de estimación de parámetros se seleccionaron modelos de regresión lineales y no lineales, entre los propuestos por Heiskanen (2006), Meng *et al.* (2007), y Mukkonen y Heiskanen (2007).

La comparación entre los diferentes modelos ajustados se basó en criterios numéricos, examinándose principalmente el coeficiente de determinación (R^2), que muestra la proporción de la varianza de la variable dependiente explicada por el modelo. El error medio cuadrático (RMSE), que determina la precisión de las estimaciones, y el porcentaje medio del error estándar (S%), que indica el tamaño del error como un porcentaje de la media de la distribución de la variable estimada, también fueron tenidos en cuenta.

Finalmente, para la validación se utilizaron las parcelas de ensayo restantes.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En la Figura 2 puede observarse uno de los índices de vegetación calculados a partir de la imagen CCD-CBERS (concretamente, el índice SAVI) junto con la red de parcelas consideradas en el estudio.

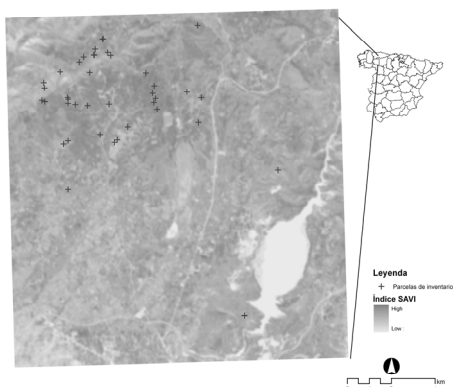


Figura 2. Red de parcelas considerada sobrepuesta a la imagen del índice de vegetación SAVI.

Analizando el subconjunto de parcelas seleccionadas para definir el modelo, las correlaciones que se obtuvieron entre las variables de masa consideradas y los valores digitales obtenidos a partir de las imágenes de satélite fueron, en general, altamente significativas.

Tras probar los modelos predictivos seleccionados, se observó que los modelos de una variable obtuvieron coeficientes de correlación (R^2) menores que los modelos de dos variables (independientemente de la variable considerada). Al considerar los modelos de predicción de dos variables fue el modelo propuesto Muukkonen y Heiskanen (2007) (Ecuación 1) el que permitió obtener los mayores valores para R^2 para todas las combinaciones de variables de entrada consideradas en las parcelas de ensayo.

$$y = (1 + x_1)^b x_2^c \exp^{(a+dx_1+ex_2)} \quad (1)$$

La Tabla 2 muestra los coeficientes del modelo finalmente seleccionado considerando las combinaciones de variables de entrada que permitieron obtener valores de R^2 mayores: SAVI y NIR, NDVI y NIR, y NDVI y banda azul. Dicho modelo utilizando tanto la combinación SAVI y NIR como la NDVI y NIR y NDVI y banda azul fue satisfactoriamente validado en la submuestra de parcelas aleatoriamente seleccionadas con este fin.

En el trabajo de Muukkonen y Heiskanen (2007) las variables empleadas para estimar la biomasa fueron las bandas roja y NIR de imágenes MODIS y/o ASTER, sin embargo en nuestro caso de estudio la sustitución de la banda roja por NDVI o SAVI permitió obtener estimadores más precisos. Además la inclusión de la banda azul de la imagen CCD-CBERS permitió mejorar ligeramente el modelo.

Tabla 2. Coeficientes del modelo propuesto para estimar W y valores de R^2 (sólo se muestran las combinaciones de variables independientes que obtuvieron mayor R^2 mayor)

	SAVI y NIR	NDVI y NIR	NDVI y azul
a	42.083	38.930	70.214
b	-19.397	-21.577	7.986
c	-2.729	-2.816	15.580
d	2.451	3.824	-1.878
e	0.000469	0.0002467	0.049
R²	0.520	0.519	0.560

a, b, c, d, e, f: coeficientes del modelo; *R²:* coeficiente de correlación.

Una vez validado, el modelo propuesto podrá ser aplicado a la superficie de las masas de radiata existentes y permitir determinar las reservas de carbono y biomasa aérea existentes en la zona de estudio. La superficie ocupada por la especie puede ser delimitada mediante fotografías aéreas y el Mapa Forestal Nacional, de forma fiable y evitando posibles problemas de resolución espacial en la identificación de la especie utilizando únicamente la imagen de satélite con este fin. En este sentido los resultados obtenidos coinciden con las conclusiones de trabajos previos (Hyypä *et al.* 2000, Fernández-Manso 2005, Fernández-Manso 2007, entre otros) que afirman que, a pesar de ciertas limitaciones, las imágenes multiespectrales de satélite (en nuestro caso imágenes CCD-CBERS) son válidas para estimar los parámetros forestales a una escala regional.

CONCLUSIONES

Estos resultados preliminares muestran que los datos proporcionados por las imágenes CCD-CBERS son útiles en la estimación de variables de masa biofísicas, concretamente biomasa aérea y reservas de carbono. Los datos procedentes de imágenes de satélite han permitido la obtención de un modelo de regresión estadísticamente significativo que constituye una herramienta útil para la gestión forestal sostenible, especialmente considerando el interés actual en el secuestro y

emisiones de carbono y la lucha contra el cambio climático.

La especie objeto de estudio, y el marco de su introducción en la zona considerada, apuntan a que podría ser de especial interés en cuanto al secuestro de carbono: las plantaciones se localizan principalmente en campos anteriormente agrícolas de áreas rurales marginales, donde sería muy recomendable el cambio de uso hacia los usos forestales.

BIBLIOGRAFÍA

- Danson, B. A. and Curran, P. J. 1993. Factors affecting the remotely sensed response of coniferous forest plantations. *Remote Sensing of Environment*, 1: 43:55-65.
- Fernández-Manso, A., González, J.M. and Ramírez, J. 2001. Radiata pine in El Bierzo County: situation and management proposals. *Proceedings of III Spanish Forestry Congress*, Granada, 5:766-771.
- Fernández-Manso, O., Quintano, C., Fernández-Manso, A., dos Santos, J.R. 2007. Cuantificación de parámetros forestales en masa de pino resinero sobre dunas continentales a nivel tranzón usando imágenes del sensor ASTER. *Anais do XIII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto - SBSR Florianópolis - SC*, 21-26 de abril de 2007, 1663-1665.
- Fernández-Manso, A., Quintano, C., Fernández-Manso, O., dos Santos, J.R., Maldonado, F.D. 2005. *Spectral Mixture Modeling to estimate wood volume in the north of Spain from optical satellite data. Ambiência*. 1: 213-222.
- Häme, T, Salli, A, Andersson, K., and Lohi, A. 1997. A new methodology for the estimation of biomass of conifer-dominated boreal forest using NOAA AVHRR data. *International Journal of Remote Sensing*, 18:3211-3243.
- Heiskanen, J. 2006. Estimating aboveground tree biomass and leaf area index in a mountain birch forest using ASTER satellite data. *International Journal of Remote Sensing*, 27:1135-1158.
- Hyyppä, J., Hyyppä, H., Inkinen, M., Engdahl, M., Linko, S. and Zhu, Y.H., 2000. Accuracy comparison of various remote sensing data sources in the retrieval of forest stand attributes. *Forest Ecology and Management*, 128: 109-120.
- Laclau, P. 2003. Biomass and carbon sequestration of ponderosa pine plantations and native cypress forests in northwestern Patagonia. *Forest Ecology and Management*, 180: 317-333.
- Laidler, G. J. and Treitz, P. 2003 Biophysical remote sensing of arctic environments. *Prog Physical Geography*, 27:44-68.
- Lefsky, M.A., Cohen, W.B. and Spies, T.A., 2001. An evaluation of alternate remote sensing products for forest inventory, monitoring, and mapping of Douglas-fir forest in western Oregon. *Canadian Journal of Forest Research*, 31: 78-87.
- Meng, Q., Cieszewski, C.J., Madden, M. and Borders, B. 2007. A linear mixed-effects model of biomass and volume of trees using Landsat ETM+ images. *Forest Ecology and Management*, 244:93-101.
- Muukkonen, P. and Heiskanen, J. 2007. Biomass estimation over a large area based on standwise forest inventory data and ASTER and MODIS satellite data: A possibility to verify carbon inventories. *Remote Sensing of Environment*, 107: 617-624.
- Stenberg, P., Rautiainen, M., Manninen, T., Voipio, P. and Smolander, H. 2004. Reduced simple ratio better than NDVI for estimating LAI in Finnish pine and spruce stands. *Silva Fennica*, 38:3-14.
- Vázquez, A. 2008. Structural attributes of three forest types in central Spain and Landsat ETM+ information evaluated with redundancy analysis. *International Journal of Remote Sensing*, 29: 5657-5676.
- Wulder, M. A., Skakun, R. S., Kurz, W. A. and White, J. C. 2004. Estimating time since forest harvest using segmented Landsat ETM+ imagery. *Remote Sensing Environment*, 93:179-187.

AGRADECIMIENTOS

Los autores quieren agradecer al Instituto Nacional de Pesquisas Espaciaias (Brasil) la distribución de la imagen CBERS empleada.