

INVENTARIACIÓN DE LAS MASAS DE *PINUS RADIATA* D. DON EN EL BIERZO (LEÓN) EMPLEANDO TELEDETECCIÓN CON IMÁGENES MULTIESPECTRALES DE RESOLUCIÓN MEDIA

J.R. Rodríguez Pérez¹, M.F. Álvarez Taboada¹, A. Asenjo Gómez¹, A. Fernández Manso¹ y C. Quintano Pastor²

¹ Grupo de investigación IPR-Ingeniería y Planificación Rural. Universidad de León. EST. Ingeniería Agraria. Avd. Astorga s/n. 24400-PONFERRADA (León, España)

² Departamento de Tecnología Electrónica. Universidad de Valladolid. EUP. C/Francisco Mendizábal 1. 47014-VALLADOLID (España)

Resumen

En la comarca leonesa de El Bierzo se estima la existencia de unas 15.000-17.000 ha de pino radiata, si bien no se dispone de datos oficiales. La importancia económica de esta especie y el interés de los propietarios y los maderistas en la misma hacen que resulte fundamental conocer sus existencias para poder planificar su gestión. La teledetección se presenta como una alternativa adecuada para la inventariación de estas masas forestales. Mediante el empleo de dos imágenes multiespectrales de resolución media (imágenes Landsat 5 y Landsat 7) de dos fechas diferentes se localizan las masas de *Pinus radiata* D. Don de la comarca. Se han realizado clasificaciones con diferentes algoritmos obteniendo los mejores resultados con algoritmos de máxima probabilidad ($\kappa = 0,7598$). El trabajo ha servido para verificar que la superficie ocupada por la especie se aproxima a las estimaciones realizadas mediante estimaciones de campo.

Palabras clave: *Pino radiata*, *Landsat*, *Teledetección forestal*, *Superficie forestada*

INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS

No son demasiado numerosos los trabajos publicados que estudian masas de *Pinus radiata* mediante técnicas de teledetección. Las investigaciones más relevantes se han llevado a cabo en países del hemisferio sur, puesto que países como Chile, Australia y Nueva Zelanda cuentan con superficies repobladas superiores a 1,5 millones de hectáreas.

Estas investigaciones han tratado de estimar superficies ocupadas por la especie (MUSK et al., 1998; WIJANARTO et al., 1998, TOMPPÖ et al.,

1999), estado de las masas considerando el peligro de incendio (TRINCADO, 2000), estimaciones de la capacidad fotosintética e índice de área foliar como parámetros estimadores de la productividad de la especie (FASSNACHT et al., 1997; COOPS, 1999), capacidad de fijación de carbono por las masas de radiata (ARNETH et al., 1998) y otros de carácter más teóricos como los que tratan de caracterizar la signatura espectral del *P. radiata* (SAN MARTÍN et al., 2000).

Los mayores esfuerzos se han centrado en la estimación del volumen de madera (DE WULF et al., 1990; TROTTER et al., 1997; CHIRICI, 1999;

HOLMSTROM, 2001; WALLERMAN, 2003), aunque los resultados no han sido muy satisfactorios. Sin embargo la utilización de sensores de alta resolución espacial mejora notablemente las estimaciones. En esta línea se han desarrollado trabajos como el realizado por HELD & DAVID (descrito en <http://ftpwww.gsfc.nasa.gov/ISSSR-95/forestm.htm>), que obtuvieron buenos resultados en la inventariación de masas de *Pinus radiata* en Canbera, durante campañas realizadas en 1999 y 2000.

Los objetivos que se han planteado en este trabajo son muy amplios. Por un lado se plantea realizar una estimación de la superficie ocupada por la especie *Pinus radiata* en la Comarca de El Bierzo, puesto que no existen datos estadísticos fiables. Por otro lado se plantea el desarrollo de una metodología que permita la caracterización de las masas mediante imágenes de satélite de resolución espacial media.

MATERIALES Y MÉTODOS

La Comarca de El Bierzo está localizada al oeste de la provincia de León y ocupa unos 3.000 km². Estructuralmente el Bierzo es un conjunto de pequeños valles y una amplia depresión (la Hoya Berciana), que condicionan el medio físico y socioeconómico. En la comarca se distinguen fisiográficamente tres zonas: Bierzo Bajo, Bierzo Alto y Montaña. Esta última zona ejerce de

barrera y se extiende por toda el área nororiental y parte del sureste, conteniendo los picos más altos de la comarca (Cabeza de Yegua 2.135 m y Catoute 2.117 m). El Bierzo Alto, con una altitud media superior a los 800 m, declina como territorio intermedio hacia la zona central de la comarca, que es la Hoya o Bierzo Bajo.

Este relieve confiere al Bierzo un microclima especial con temperaturas suaves y regulado por cierta humedad. La temperatura media anual es 12,3° C, mientras que la media máxima ronda los 23,6° C y la media mínima los 3,6° C. La precipitación media anual es 720 mm, aunque en los bordes de la Hoya Berciana se superan los 900 mm. Los suelos de uso forestal tienen buenas aptitudes para producción de madera de calidad, sin embargo predominan las zonas de matorral y monte bajo, y en las zonas repobladas, las técnicas selvícolas no son las más adecuadas. Por tanto el medio es apropiado para el desarrollo de la especie pero se requiere un importante cambio estructural para conseguir un correcto aprovechamiento.

El material básico para la realización de esta investigación son imágenes tomadas desde los satélites de observación de la tierra Landsat. Concretamente se han utilizado dos subescenas del satélite Landsat correspondientes al WRS Path/Row 203/30: una de ellas fue tomada el 25 de junio de 2000 por el Landsat 5 (sensor TM) y la fecha de adquisición de la segunda (imagen del Landsat 7: sensor ETM+) es el 5 de septiem-

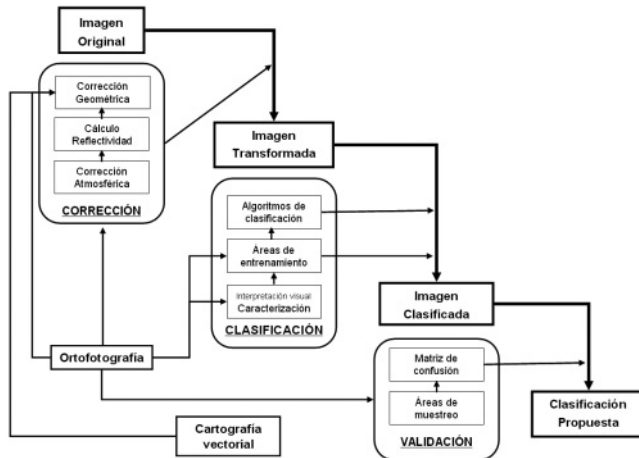


Figura 1. Metodología general de la clasificación

bre de 2000. Para la georreferenciación de las imágenes se ha utilizado cartografía digital, así como ortofotografías en color, creadas para una escala de 1:10.000. Este material también ha resultado crucial para la definición de áreas de entrenamiento y validación de resultados.

Para la consecución de los objetivos se ha seguido el proceso habitual en la clasificación temática de imágenes de satélite (Figura 1). El proceso se inicia con un análisis visual de las imágenes y un preprocesado (corrección atmosférica y geométrica). La corrección atmosférica fue realizada por la sustracción del valor mínimo de cada banda, tomados en el pantano de Bárcena (se encuentra en la parte central de cada imagen). Las correcciones geométricas se hicieron mediante puntos de control probando dos tipos de remuestreo (por convolución cúbica y vecino más próximo). Se han georreferenciado las imágenes antes de la clasificación porque las áreas de entrenamiento se delimitarán sobre ortofotografías y posteriormente se superpondrán sobre las imágenes (para la extracción de las firmas espectrales).

Para clasificar las imágenes se utilizan diversos algoritmos supervisados (mínima distancia, distancia de Mahalanobis, paralelepípedos, máxima probabilidad, etc.). En estas clasificaciones se ha tratado de valorar si la información de las bandas térmicas es relevante para la identificación de cubiertas, si el Análisis de Componentes Principales puede facilitar las clasificaciones al reducir el número de bandas y las mejoras al incluir el NDVI como otro criterio más en las clasificaciones.

La validación de los resultados se realizará comparando las cubiertas clasificadas en ciertas áreas y con las cubiertas reales de esas mismas áreas, generando matrices de confusión. A partir de estas matrices se determinan parámetros como la fiabilidad global (píxeles correctamente clasificados respecto del total de píxeles verificados), el índice kappa (fiabilidad global eliminando la influencia del azar), exactitud del productor (probabilidad de que un píxel clasificado como un tipo de cubierta lo sea realmente en el campo) y exactitud del usuario (probabilidad de que un píxel que realmente pertenezca a un tipo de cubierta haya sido asignado a ese tipo de cobertura en la clasificación).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Para la clasificación se definió una leyenda con dos tipos de coberturas de coníferas: repoblaciones adultas y superficies repobladas recientemente. Además se definieron otras trece clases de coberturas del suelo diferentes: cultivo regadío, cultivo seco, vid, praderas, pastizal, matorral, matorral arbolado, arbolado de frondosas, arbolado de ribera, terreno desnudo, urbano y vías, otros improductivos y superficie de agua. En total se definieron más de 1.000 áreas de entrenamiento, de las que 70 corresponden a las repoblaciones de coníferas (60 ha) y 50 a nuevas repoblaciones (40 ha).

Una vez delimitadas las áreas de entrenamiento se comprobaron los valores de Divergencia Transformada y de Jeffries-Matusita. En ambas imágenes los resultados fueron buenos a excepción de las repoblaciones jóvenes con los terrenos no productivos y el matorral que dieron valores de separabilidad inferiores a 1,3.

Para la verificación de resultados se definió un muestreo sistemático a partir de una malla de 700x700m extendida por toda la comarca. Se verificaron un total de 121 puntos de repoblación adulta de coníferas y 116 de repoblaciones muy recientes (además de otros 2.313 correspondientes al resto de clases de cubierta); los píxeles verificados superan el número exigido para una probabilidad del 95% ($z=1,96$), con un error máximo permitido del 5% y suponiendo que la probabilidad de acierto/error es del 50%.

En la tabla 1 se muestran los resultados obtenidos para algunas de las clasificaciones de la imagen de junio (la validación de las clasificaciones con la imagen de septiembre arrojó unos índices muy similares). Los resultados de los tres primeros clasificadores muestran que los mejores resultados globales se obtienen con el algoritmo de máxima probabilidad, si bien el de mínima distancia tiene la mayor exactitud del productor identificando repoblaciones adultas de coníferas. Como era de esperar, los peores resultados se obtienen en la identificación de las repoblaciones de reciente implantación.

Si no se considera la banda térmica los resultados de kappa y fiabilidad total, se mantienen aunque aumentan las exactitudes de pro-

ductor y usuario para las repoblaciones (con otro tipo de cubiertas, las exactitudes disminuyen cuando no se considera la banda térmica en las clasificaciones).

Si se realiza la clasificación con los tres primeros componentes principales (contienen el 98,7% de la variabilidad de las imágenes), los índices de validación mejoran. Por tanto se reduce el tiempo empleado en las clasificaciones sin disminuir las exactitudes.

La inclusión del NDVI como criterio de clasificación no ha mejorado la discriminación de las cubiertas de repoblación pero sí incrementa las exactitudes de identificación de otros tipos de cubierta (p.e. frondosas o cultivos).

En cuanto a los tipos de cubierta que más interfieren en la identificación de las cubiertas repobladas con coníferas cabe destacar lo siguiente: los errores de omisión de las repoblaciones (adultas y recientes) se producen con zonas de matorral arbolado y pastizales, y los mayores errores de comisión se producen con las cubiertas de matorral, pastizal y terrenos improductivos.

La estimación de la superficie total de pino radiata obtenida a partir de cada tipo de clasificación (Tabla 2) es variable, oscilando entre las 17.255,83 ha (clasificación sin banda térmica de la imagen de junio) y las 23.338,41 ha (clasificación por mínima distancia de la imagen de septiembre). Estos datos no se han podido contrastar con estadísticas oficiales fiables puesto que no existen; sin embargo, algunas estimacio-

nes fiables cifran la superficie de radiata en la comarca entre 15.000 ha y 17.000 ha. Por lo tanto las estimaciones más fiables se obtienen con las clasificaciones sin banda térmica (junio), con los componentes principales e incluyendo el NDVI (septiembre).

CONCLUSIONES

La teledetección se ha mostrado como una buena herramienta para la identificación de *Pinus radiata* en las condiciones de la zona de estudio: se han comparado diversos algoritmos de clasificación y se han obtenido los mejores resultados con el de máxima probabilidad. La superficie obtenida mediante las clasificaciones se aproxima bastante a la considerada como real, si bien no hay datos estadísticos oficiales.

Se propone como continuación del trabajo la estimación de otras variables dasométricas a través de las imágenes de satélite de resolución espacial media. Los datos de campo necesarios se tomarán de la red de parcelas permanentes del Sistema de Información Forestal del *P. radiata* de El Bierzo.

BIBLIOGRAFÍA

ARNETH, A., KELLIHER, F.M.; GOWER, S.T.; SCOTT, N.A.; BYERS, J.N. & MCSEVENY, T.M.; 1998. Environmental variables regulating

Clasificador	kappa	Fiabilidad Global (%)	Exactitud del productor		Exactitud del usuario	
			Repoblación adulta	Repoblación reciente	Repoblación adulta	Repoblación reciente
Mínima Distancia	0,6214	67,35	95,15	44,92	78,71	25,58
Distancia de Mahalanobis	0,6620	70,94	90,74	42,85	76,91	28,11
Máxima						
Probabilidad	0,7598	79,43	93,97	65,00	92,85	67,28
Sin banda térmica	0,7479	78,41	95,04	67,48	85,47	50,63
3 Componentes Principales	0,7591	79,39	93,95	64,71	92,66	72,07
Inclusión del NDVI	0,7374	77,74	95,04	69,17	83,45	44,98

Tabla 1. Validación de las clasificaciones supervisadas (imagen de junio)

- soil carbon dioxide efflux following clear-cutting of a *Pinus radiata* D. Don plantation. *J. Geoph. Res.-Atm.* 103(D5): 5695-5705.
- CHIRICI, G.; MASELLI, F.; BONORA, L.; MARCO BINDI, M.; LORI, C. & LUCA F.; 1999. Integration of remote sensing and GIS technologies for a forest ecosystem modeling application in Tuscany. In: T. ZAWILA-NIEDZWIĘCKI & M. BRACH (eds.), *Proceedings Conference on Remote Sensing and Forest Monitoring, International Union of Forestry Research Organizations (IUFRO)*. Warsaw Agricultural University, Faculty of Forestry. Rogow.
- COOPS, N.C.; 1999. Linking multi-resolution satellite-derived estimates of canopy photosynthetic capacity and meteorological data to assess forest productivity in a *Pinus radiata* (D. Don) stand. *Photogrammetric Eng. Rem. Sens.* 65(10): 1149-1156.
- DE WULF, R.R.; GOOSSENS, R.E.; DE ROOVER, B.P. & BORRY, F.C.; 1990. Extraction of forest stand parameters from panchromatic and multispectral SPOT-1 data. *Int. J. Rem. Sens.* 11: 1571-1588.
- FASSNACHT, K.S.; GOWER, S.T.; MACKENZIE, M.D.; NORDHEIM, E.V. & LILLESAND, T.M.; 1997. Estimating the leaf area of North Central Wisconsin forests using the Landsat Thematic Mapper. *Rem. Sens. Env.* 61 (2): 229-245.
- HOLMSTRÖM, H.; 2001. *Data acquisition for forestry planning by remote sensing based sample plot imputation*. Doctoral thesis.
- Acta Universitatis Agriculturae Sueciae, Silvestria 201. Swedish University of Agricultural Sciences, Department of Forest Resource Management and Geomatics. Umeå. Sweden.
- MUSK, R.A. & OSBORN, J.E.; 1998. Relating a Landsat TM Image to Radiata Pine Plantation Structure. In: *9th Australasian Remote Sensing Photogrammetry Conference*: 22-23. Sydney. Australia.
- SAN MARTÍN C.; IRIBARREN M.; AMTHAUER E. Y HERÁNDEZ R.; 2000. Modelo estadístico de clasificación para espectros de *Pinus radiata* D. Don. En: Comité Editorial CCA (eds.), *Actas del Congreso Chileno de Automática*. Concepción.
- TOMPPU, E.; GOULDING, C. & KATILA, M.; 1999. Adapting Finnish multi-source forest inventory techniques to the New Zealand preharvest inventory. *Scand. J. For. Res.* 14(2): 182-192.
- TRINCADO, G.; 2000. *Efecto período de proyección y esquemas de manejo en las estimaciones de RADIATA PLUS 5.02*. Documento de Trabajo N° 34: Proyecto Modelo Nacional de Simulación de Pino Radiata. Fundación Chile. Santiago. Chile.
- TROTTER, C.M.; DYMOND, J.R. & GOULDING, C.J.; 1997. Estimation of timber volume in a coniferous plantation forest using Landsat tm. *Int. J. Rem. Sens.* 18: 2209-2223.
- WALLERMAN, J.; 2003. *Remote Sensing Aided Spatial Prediction of Forest Stem Volume*. Doctoral thesis.

Clasificador	Imagen de junio (ha)			Imagen de septiembre (ha)		
	Replacación adulta	Replacación reciente	Total	Replacación adulta	Replacación reciente	Total
Mínima Distancia	8.832,70	10.638,88	19.471,58	13.601,53	9.736,88	23.338,41
Distancia de Mahalanobis	9.383,46	10.680,74	20.064,20	14.908,85	5.528,06	20.436,91
Máxima Probabilidad	8.600,40	9.582,51	18.182,91	5.089,17	13.457,43	18.546,60
Sin banda térmica	8.655,04	8.600,79	17.255,83	6.088,15	13.065,04	19.153,19
3 Componentes Principales	8.582,36	9.576,95	18.159,31	5.923,35	11.895,63	17.818,98
Añadiendo NDVI	9.550,76	10.243,50	19.794,26	6.361,45	11.281,44	17.642,89

Tabla 2. Estimación de la superficie (ha) cubierta por las repoblaciones de *Pinus radiata*

ral thesis. Acta Universitatis Agriculturae Sueciae, Silvestria 201. Swedish University of Agricultural Sciences, Department of Forest Resource Management and Geomatics. Umeå.
WIJANARTO, A.B.; WEBSTER, M.J. & OSBORN,

J.E.; 1998. Remote Sensing of Forests: Estimation Canopy Height and Tree Stocking in *Pinus radiata* Plantations. In: *9th Australasian Remote Sensing Photogrammetry Conference*: 43-52. Sydney.