

Uso de imágenes satélite Landsat para la detección de rodales de *Pinus nigra* Arn. y *Pinus sylvestris* L. afectados por escolítidos

E. Blanco^{1*}, J. A. Bonet^{1,2} y M. Eizaguirre²

¹ Centro Tecnológico Forestal de Cataluña (CTFC). Ctra. de Sant Llorenç de Morunys, Km 2 (dirección Port del Comte). 25280 Solsona (Lleida). España.

² Departamento de Producción Vegetal y Ciencia Forestal. Universidad de Lleida. Avd. Alcalde Rovira Roure, 191. 25198 Lleida. España.

Resumen

El uso de imágenes procedentes de sensores multiespectrales de resolución media como es el caso de Landsat TM ha sido ampliamente utilizado desde décadas para detectar, entre otras variables, el decaimiento y la defoliación provocada por plagas y enfermedades forestales. El presente trabajo evalúa la utilidad del uso de estas imágenes en la detección de rodales de pino laricio (*Pinus nigra* Arn.) y pino silvestre (*Pinus sylvestris* L.) afectados por escolítidos. El área de estudio se localizó en el Solsonés (prepirineo de Lleida) seleccionando 34 áreas de entrenamiento (17 rodales afectados por la plaga y 17 rodales sanos). El análisis exploratorio de las imágenes se realizó mediante el programa ERDAS® IMAGINE 8.x. Los resultados del estudio mostraron una significación espectral en 5 de las 7 bandas analizadas, siendo TM5 y TM7 las que mejor comportamiento presentaron. Los niveles digitales obtenidos y los espacios de características creados señalaron sendas tendencias al agrupamiento de rodales afectados *versus* sanos, consiguiéndose plantear mejoras en el procedimiento metodológico.

Palabras clave: Teledetección, plaga forestal, Scolytidae, sanidad forestal, respuesta espectral.

Abstract

Using Landsat satellite imagery to detect small-size forest stands of *Pinus nigra* Arn. and *Pinus sylvestris* L. affected by Scolytidae

Medium resolution images from multispectral sensors like Landsat TM have been extensively used for decades in order to identify decline and defoliation generated by insects and other forest pests. The present work analyses the usefulness of these kinds of images to detect small-size stands of *Pinus nigra* Arn. and *Pinus sylvestris* L. affected by Scolytidae attacks. The study area was located in the Solsones region (Eastern Pyrenees), selecting 34 training zones (17 damaged small-size stands and 17 healthy small-size stands). The exploratory analysis of the images was conducted with the ERDAS® IMAGINE 8.x. program. The results of the study showed significant differences between the affected and non-affected stands in 5 of the 7 spectral bands analysed. TM5 and TM7 bands were identified as those having the highest power to detect damaged stands. The digital levels obtained and the spaces of characteristics created, both showed trends to group small-size affected stands *versus* healthy, achieving improvements in the methodological procedure employed.

Key words: Remote sensing, forest pest, Scolytidae, forest health, spectral response.

Introducción

Los sensores remotos instalados en satélites y los sensores aerotransportados sobre aviones han sido herramientas ampliamente utilizadas durante las últi-

mas décadas para el estudio y el seguimiento de los recursos naturales (Brockhaus y Khorram, 1992 y Dengsheng *et al.*, 2002). El uso de estas técnicas ha ido en aumento debido en parte, al importante número de satélites lanzados a órbita durante los últimos años y por

* Corresponding author: ester.blanco@ctfc.cat
Received: 04-03-09. Accepted: 29-10-09.

otro lado, a la continua aparición y mejora de los programas informáticos para el tratamiento de imágenes (Wulder y Franklin, 2003). La capacidad de estos satélites para captar imágenes de distintas bandas del espectro lumínico es uno de los factores clave que permite que estas herramientas sean utilizadas en el campo de la teledetección y el seguimiento de los procesos naturales (Wulder *et al.*, 2006b). El interés por su uso se incrementa cuando los costes asociados al inventario e identificación de estos procesos son altos como es el caso de las plagas forestales (Holmgren y Thuresson, 1998). En este ámbito, autores como Cielsa *et al.* (1976), Holmgren y Thureson (1998), Bonneau *et al.* (1999), Franklin *et al.* (2003), Bentz y Endreson (2004) y White *et al.* (2006) han centrado sus esfuerzos de investigación en el análisis de los daños provocados por plagas forestales en superficies extensas mediante teledetección, obteniendo resultados notables, observando no obstante, limitaciones en el uso de estos satélites.

Entre la gran diversidad de sistemas y técnicas disponibles, las imágenes procedentes de sensores multispectrales de resolución media como es el caso de Landsat TM han sido usadas para detectar, entre otras variables, el decaimiento y la defoliación provocada por plagas y enfermedades forestales (Brockhaus *et al.*, 1992; Franklin *et al.*, 2003). La defoliación en masas forestales provoca cambios en la reflectancia y estos cambios pueden ser usados para detectar los daños producidos por el ataque de insectos (Álvarez *et al.*, 2005). Otra ventaja del uso de imágenes satélite Landsat es el elevado número de imágenes que pueden llegar a procesarse a lo largo del año (periodicidad de 1 imagen cada 15 días), pudiendo éstas ser empleadas para un seguimiento exhaustivo de los daños ocasionados por una perturbación natural (Wulder *et al.*, 2006a).

Entre las plagas forestales, los escolítidos son uno de los principales grupos de insectos que, bajo condiciones climáticas determinadas, factores intrínsecos del huésped, condicionantes de manejo forestal y perturbaciones, pueden superar los niveles “normales” de población y llegar a convertirse en verdaderas plagas, afectando a grandes extensiones forestales (Gil y Pajares, 1986). Según Hernández (2006), el aumento de los daños producidos por insectos perforadores subcorticales en los pinares se ha visto incrementado de manera importante en las últimas décadas debido en parte, a la progresiva disminución de la población humana en zonas rurales, al cambio y evolución de usos y costumbres, al importante aumento de los costes de explotación y al escaso rendimiento de la madera.

Estas constataciones hacen necesario profundizar en el uso de herramientas como son las basadas en la utilización de imágenes Landsat, las cuales pueden ser efectivas como demuestran los trabajos de Wulder *et al.* (2006b), que estudian la detección y el seguimiento de grandes superficies afectadas por el escolítido *Dendroctonus ponderosae* Hopkins en Canadá. Por su parte, Dottavio y Williams (1983) también usan imágenes satélite Landsat para la detección de grandes extensiones de monte afectadas por lepidópteros como *Lymantria dispar* L. y Franklin *et al.* (2003) que centran sus estudios en la identificación y la clasificación automática de *Pinus contorta* Dougl. ex Loud. atacado por *D. ponderosae* Hopkins en montes del Canadá, mostrando un 73% de acierto en las predicciones del satélite. En dicho estudio, las zonas afectadas por la plaga fueron usadas como áreas de entrenamiento, transformadas en algoritmos y posteriormente, utilizando 360 puntos independientes, validaron los resultados obtenidos, llegando a la conclusión que el uso de imágenes Landsat podía ser un instrumento eficaz tanto para la detección inicial de focos de plagas como para el seguimiento espacial y temporal de éstos.

No obstante, en España son pocos los estudios realizados en el campo del uso de imágenes satélite. En la década de los setenta Cielsa *et al.* (1976) introdujeron el concepto de vigilancia de campo y detección sistemática a través de pequeños aviones de ala alta y sensores remotos como herramientas valiosas en la detección de insectos y enfermedades forestales. Posteriormente, autores como Navarro *et al.* (2000) analizaron la aplicación de las imágenes IRS-WiFS (de resolución también media como el caso de Landsat) para la evaluación de daños producidos por la procesionaria del pino en los pinares de Andalucía oriental, concluyendo que dicha herramienta es una fuente de información útil para el seguimiento del estado fitosanitario de los ecosistemas dominados por coníferas en Andalucía, en particular para la banda del infrarrojo próximo. Por su parte, Álvarez *et al.* (2005) también aplicaron técnicas de teledetección y sistemas de información geográfica para la detección de masas de eucalipto en Galicia atacadas por *Gonipterus scutellatus* Gyll. utilizando imágenes multispectrales de resolución media (Landsat TM), llegando a la conclusión de que para obtener buenos resultados era necesario disponer de información de cada una de las parcelas analizadas y recopilar los datos en las fechas próximas a la toma de las imágenes. A diferencia de los anteriores autores, los cuales utilizaban únicamente satélites de resolución media, Cano *et al.* (2005) evaluaron la defoliación en masas de

Quercus suber L. en el sur de España mediante imágenes de alta resolución IKONOS mostrando que la información obtenida a partir de las bandas espectrales del sensor (banda 4 e infrarrojo cercano) mostraba una buena correlación con la defoliación, sugiriendo que en la región mediterránea, el bajo coeficiente de determinación ($R^2=0,25$) obtenido para las parcelas de *Quercus* sp. era atribuible a la alta heterogeneidad propia del área de estudio y al uso de imágenes de resolución media como es el caso de Landsat.

El escaso número de referencias bibliográficas españolas sobre la utilización de la teledetección como herramienta para la identificación y el seguimiento de plagas y enfermedades contrasta con la necesidad de disponer de herramientas fiables para la detección de enfermedades y plagas, las cuales podrían verse acrecentadas en un futuro, por el aumento de los niveles poblacionales de escolítidos tanto debido a las condiciones climáticas como por la disponibilidad de alimento en el monte (Woods *et al.*, 2005). La generalización del uso de imágenes satélite a través de herramientas que minimicen costes de inventario como es el caso de las imágenes Landsat, supondría un cambio metodológico relevante no sólo para el diagnóstico, sino también para el seguimiento de grandes extensiones forestales previsiblemente afectadas y la evolución de los ataques, invitando a profundizar en el estudio de estos métodos. En este sentido, mediante diferentes casos de estudio, es necesario profundizar la metodología que permita definir el campo de uso de estas imágenes de satélite para su posterior aplicación.

El objetivo del estudio es evaluar la viabilidad del uso de imágenes satélite Landsat para la detección de rodales de coníferas afectados por escolítidos, mediante la delimitación de las bandas espectrales óptimas que permitan fijar la metodología de utilización del satélite.

Material y Métodos

Zona de estudio

A partir del episodio de sequía ocurrido en la zona central de Cataluña el verano de 2005, se identificaron en el centro y norte del Solsonés (Prepirineo leridano), rodales de coníferas afectados por el ataque de escolítidos, principalmente por las especies *Ips sexdentatus* e *I. acuminatus* y el género *Tomicus*. En estas áreas, el pino silvestre (*Pinus sylvestris* L.) y el pino laricio (*Pinus nigra salzmannii* Arn.) tienen sus rangos de dis-

tribución óptimos. Estos rodales estaban conformados por pequeños grupos de árboles (10-25) localizados a menudo en exposiciones de solana y en terrenos con escasa profundidad de suelo.

Toma de datos

El trabajo de campo fue realizado entre julio y agosto de 2007, identificando en campo áreas de entrenamiento (conjunto de pequeños rodales de árboles afectados por escolítidos potencialmente detectables mediante satélite Landsat) y haciendo coincidir la adquisición de la imagen satélite también en verano de 2007 para que la información se correspondiera el máximo posible (Star y Estes, 1990). Un análisis prospectivo previo de la zona objeto de estudio permitió identificar tres grados de afectación de los rodales, estableciendo una serie de premisas en la selección de estos grupos de árboles considerados como “áreas de entrenamiento”. Las premisas iniciales en la selección de rodales de coníferas afectados por el ataque de escolítidos fueron las siguientes:

- dimensión mínima 900-1000 m²
- separados de infraestructuras (pistas forestales, casas, ...) un mínimo de 50 metros para evitar un posible efecto margen que pudiera distorsionar la respuesta espectral
- monoespecíficos (más del 80% de pies de una especie, tanto para los rodales de *P. sylvestris* como para los de *P. nigra*)
- con distintos grados de afectación (Figura 1), identificándose niveles de afectación de árboles atacados por escolítidos. Nivel 1 de afectación: árboles de color amarillento, poco vigorosos con síntomas y signos por “ataque de colonización de adultos en curso”. Nivel 2: árboles con las acículas rojizas con signos evidentes por “ataque en curso con desarrollo larvario con o sin emergencia de nuevos adultos”. Nivel 3: árboles secos, muertos, sin acículas en copa, de color grisáceo y con signos por “ataque del año anterior con adultos emergidos”.

A partir del análisis prospectivo y una vez fijadas las premisas iniciales para identificar los rodales afectados (áreas de entrenamiento), de entre la población fueron seleccionados de forma aleatoria, 17 rodales afectados por escolítidos y 17 rodales control (sanos) que fueron



Figura 1. Niveles de afectación de árboles atacados por escolítidos: De izquierda a derecha, las imágenes corresponden al *Nivel 1* de afectación: árboles de color amarillento, poco vigorosos con síntomas y signos por “ataque de colonización de adultos en curso”. *Nivel 2*: árboles con las acículas rojizas con signos evidentes por “ataque en curso con desarrollo larvario con o sin emergencia de nuevos adultos”. *Nivel 3*: árboles secos, muertos, sin acículas en copa, de color grisáceo y con signos por “ataque del año anterior con adultos emergidos”.

seleccionados del mismo modo que los afectados (Tabla 1). Los rodales control estaban compuestos por pino laricio o pino silvestre, localizándose la mayoría de ellos próximos a los rodales afectados, con una dimensión mínima entre 900-1000 m² y procurando respetar una distancia también mínima entre los afectados y los rodales control dos veces la resolución espectral de la imagen Landsat (30 x 30 m).

La gran mayoría de los rodales afectados (Tabla 1) fueron localizados en zonas de cumbre, exposiciones preferentemente de solana y con poca profundidad de suelo. Los árboles que formaban parte de estos rodales afectados, mayoritariamente presentaron unas clases diamétricas 10 y 20. En conjunto, de los 17 rodales atacados por escolítidos, la mayoría mostró unos niveles de afectación 2 y 3 (Tabla 1).

La identificación de los rodales afectados y de los controles se realizó mediante GPS modelo *Garmin etrex*® con un error de posicionamiento del orden de $\pm$ 5-10 metros, suficiente para que éste quedara absorbido por el ancho del píxel (30x30 metros).

Análisis de los datos

La imagen usada para el estudio provino del satélite Landsat 5 sensor TM multibanda con una resolución de 30 metros. La fecha de creación de los datos fue del 29/06/2007. El modelo de datos fue de tipo ráster y la ubicación de la imagen correspondió a la zona Lleida-Tarragona. Las correcciones radiométricas y geométricas de la imagen fueron subsanadas a partir de la ficha técnica de la imagen por ESA-ESRIN (Italia). Así

mismo, el procesamiento de la imagen fue realizado por el Centro de Investigación Ecológica y Aplicaciones Forestales (CREAF, 2007).

Durante el proceso de clasificación multispectral, el primer paso a realizar es el “entrenamiento de áreas”. El sistema o programa es “entrenado” para que reconozca los patrones de los valores obtenidos en campo (Hord, 1982). Este proceso puede ser realizado de forma supervisada o no supervisada. En el caso de este estudio se realizó de forma supervisada, siendo el analista quien controló todo el proceso de entrenamiento. El resultado de este entrenamiento es un conjunto de firmas espectrales que definieron una muestra de entrenamiento o conglomerado, a menudo siendo éste un proceso iterativo.

El análisis exploratorio de las imágenes a partir de la identificación de las áreas de entrenamiento supervisadas se realizó mediante el programa ERDAS® IMAGINE 8.x (ERDAS® Field Guide, 1999). El procesamiento de estas bandas permitió generar firmas no paramétricas basadas en objetos discretos conformando el espacio de características de la imagen (AIOs), espacio utilizado para definir los límites de las clases obtenidas (Kloer, 1994). Generalmente, la clasificación supervisada suele emplearse cuando se desean clasificar pocas clases como es este caso y cuando han podido ser seleccionadas áreas de entrenamiento que pueden ser fácilmente verificadas de nuevo en campo (ERDAS® Field Guide, 1999).

Un análisis de la varianza (ANOVA) de un factor permitió determinar si existían o no diferencias significativas entre la respuesta espectral del conjunto de rodales afectados y los niveles digitales de los rodales control, estudiando también la respuesta espectral (ND) para

Tabla 1. Identificación de los rodales afectados y sanos. Id_Rodal: identificador del rodal (RI: rodal afectado; C: rodal sano (control), Sp. principal: especie principal del rodal (>80% de pies de esa especie). Pn: *Pinus nigra salzmannii*; Ps: *Pinus sylvestris*). Nivel af.: corresponde al nivel de afectación del rodal (1, 2 y 3)

Id_Rodal	Sp. principal	Nivel af.	Características generales del rodal
RI1a	Pn	1-2	Rodales afectados de 900-1000 m ² de dimensión cada uno, localizados en zonas de cumbre, exposiciones preferentemente
RI12		2-3	de solana y con poca profundidad de suelo. Altitudes comprendidas entre los 750 y los 1.100 m. Los rodales,
RI10a, RI10b		3	mayoritariamente presentaron unos diámetros normales entre las clases diamétricas 10-20 cm. Eran rodales homogéneos en
RI10c, RI11a, RI11b			cuanto a composición de especies y cuanto mayor era su nivel
RI2, RI8	Ps	1-2	de afectación más claramente quedaban diferenciados del resto
RI3, RI4,		2	de la vegetación sana adyacente. Los rodales RI1a y RI12
RI5, RI6,			presentaron niveles de recubrimiento inferiores al resto y estaban
RI7b, RI7c		2-3	mezclados puntualmente con vegetación sana (tanto arbórea
RI7a, RI9			como arbustiva).
C1, C2, C3, C4	Pn		Rodales control, con una dimensión mínima entre 900-1000 m ² .
C5, C6, C7, C8			Diámetros medios alrededor de los 20 cm.
C9, C10, C11	Ps	—	Rodales con buena conformación de los pies, homogéneos en
C12, C14, C15			cuanto a especie arbórea y localizados entre los 750 y los
C16, C17, C20			1.100 m de altitud.

cada una de las 7 bandas temáticas que Landsat dispone para los 34 rodales seleccionados como áreas de entrenamiento.

Resultados

Los resultados obtenidos de los niveles digitales (ND: cada píxel de la imagen Landsat viene definido por un número entero, traducción de la radiancia recibida por el sensor para una determinada parcela de la superficie terrestre y en una determinada banda del espectro. A este valor numérico se le denomina nivel digital) muestran que existe un patrón similar de comportamiento para los 34 rodales estudiados y para las 7 bandas analizadas (Figura 2). Las bandas que aportaron una mayor resolución espectral a la discriminación de los dos grupos de rodales (sanos y afectados) fueron las bandas TM2, TM3 y TM4 y, especialmente la TM5 y la TM7.

En la Figura 2 se observa que tanto para la banda TM5 como para la TM7 los 17 rodales afectados quedan separados en su mayoría de los rodales sanos.

El estudio de la combinación de las bandas temáticas 4, 5 y 7 muestra los espacios de características (resultado de procesar las bandas temáticas, expresado en forma de objetos discretos: polígonos utilizados para definir los límites de una clase o grupo (Kloer, 1994)). En este caso, el programa ERDAS® permite asignar píxeles a una clase u otra basándose en su localización dentro o fuera del área en la imagen del espacio de características. Los resultados obtenidos se detallan en las Figuras 3, 4 y 5.

Los resultados obtenidos en los espacios de características (Figuras 3, 4 y 5) indican que combinando las bandas 4 y 7, 4 y 5 y 5 con 7, los diagramas de dispersión creados representarían los valores que toman los píxeles (ND:niveles digitales) en la imagen Landsat para cada una de las áreas de entrenamiento analizadas (entrenar el sistema o programa para que reconozca patrones a partir de los datos obtenidos en campo).

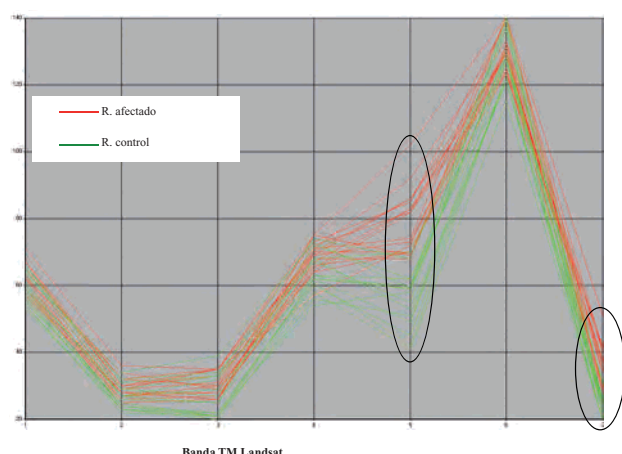


Figura 2. Niveles digitales (ND) para cada uno de los 34 rodales analizados y para cada una de las 7 bandas del sensor Landsat. ERDAS IMAGINE 8.x.

El espacio creado en cada uno de los tres casos no deja de ser una regla de decisión que determina si un píxel está o no dentro de una firma espectral (elipse que engloba el conjunto de rodales, atendiendo si pertenecen al grupo de afectados o sanos). Esto significa que en cada uno de los tres casos analizados, se han creado respectivamente dos firmas con unas características similares respecto la posición que ocupan, a través de la combinación de las dos bandas analizadas respectivamente, pero también se crea un espacio de intersección donde conviven rodales afectados y rodales control.

En la combinación de las bandas TM4 y TM7 (Figura 3), las áreas de entrenamiento de rodales control se sitúan mayoritariamente en el espacio inferior del diagrama de dispersión. En cambio, los rodales afectados muestran una tendencia a agruparse en el extremo superior del espacio de características de los niveles digitales. De igual forma ocurre en las combinaciones de las bandas 4 con 5 y 5 con 7 (Figuras 4 y 5). Cuanto más separados y definidas sean estas dos firmas espectrales, más diferencias y más fácil sería poder llegar a establecer una regla de decisión que permita que de forma automática el programa pueda discriminar si un rodal está sano o afectado. A todo este proceso se le llama clasificación supervisada con la selección “a priori” de estas áreas de entrenamiento.

En la Figura 3 se aprecia como quedan clasificados dentro del espacio de características de los niveles digitales los 7 rodales afectados identificados como RI2, RI3, RI5, RI7c, RI10c, RI11a y RI12. De la misma forma, en la combinación de las bandas 4 con 5 y 5 con

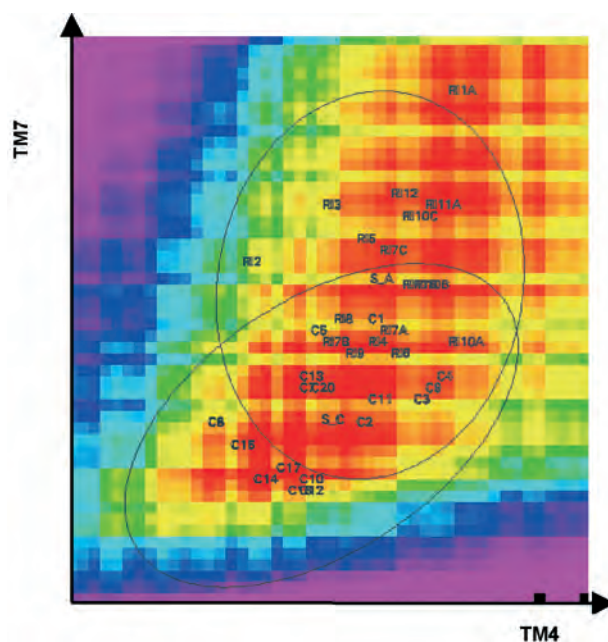


Figura 3. Imagen del espacio de características de los niveles digitales (ND) de la banda 4 frente a la 7.

7, coinciden en la clasificación de los espacios de características de los niveles digitales la mayoría de los mismos rodales mencionados anteriormente (Figuras 4 y 5). Gran parte de estos rodales afectados correspondieron tanto a pino laricio como a pino silvestre, presentando como características comunes que los niveles de afectación solían estar comprendidos entre 2 y 3 (más del 50% de los rodales clasificados dentro de este espacio presentaron unos niveles de afectación de orden 3). Por tanto, la mayoría de estos rodales fueron claramente identificables en campo, con signos evidentes de defoliación y grados de humedad en la vegetación bajos y por lo general, con unas fracciones de cabida de cubierta (fcc: grado de recubrimiento del suelo por la proyección vertical de las copas del arbolado) también inferiores al resto de los rodales analizados.

En el caso de los rodales sanos (control), los espacios de características creados para las 3 combinaciones de bandas (Figuras 3, 4 y 5) mostraron también una coincidencia a la hora de agrupar estos rodales. Así, los rodales C8, C10, C12, C14, C15 y C17 se clasificaron de forma similar para las 3 combinaciones de bandas estudiadas. Todos ellos correspondieron, excepto el rodal C8, a pino silvestre de buenas conformaciones (diámetro medio igual o superior a 20 cm), con una estructura del rodal bien identificada y diferenciada del resto de vegetación adyacente.

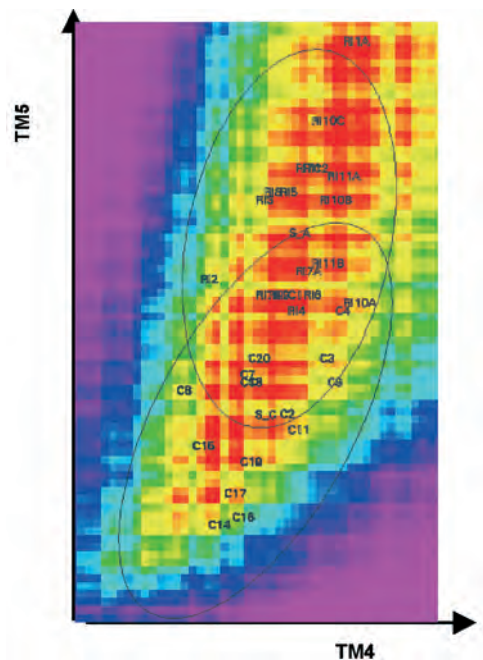


Figura 4. Imagen del espacio de características de los niveles digitales (ND) para las bandas 4 y 5.

El rodal C17 de pino silvestre es un ejemplo representativo de rodal control, bien identificado dentro del espacio de características y por tanto, con una respuesta espectral distinta respecto la tipología de rodales afectados. Este rodal también se caracteriza por ser homogéneo, formado por árboles de dimensión considerable ($CD > 25$ cm) y con una extensión lo suficientemente representativa como para haber podido destacar en los resultados obtenidos mediante satélite Landsat (>1000 m²), en referencia al resto de áreas de entrenamiento seleccionadas.

Alrededor del 50% de los rodales control quedaron clasificados en la intersección de los espacios de características para las tres combinaciones de bandas, destacando C1, C3, C4 (rodal de pino laricio mezclado con algo de roble), C7, C8, C9 y C13. De la misma forma, alrededor del 50% de rodales afectados se localizaron en la intersección de los espacios de características, destacando los rodales, RI7a de pino silvestre y RI10a, de pino laricio.

En las 3 combinaciones de bandas espectrales (Figuras 3, 4 y 5) apareció el rodal RI1a fuera de toda clasificación de espacios de características. Este rodal fue uno de los pocos (junto con el rodal RI2) clasificado con el nivel de afectación 1-2, con un diámetro medio de los pies de laricio inferior a los 20 cm y con un patrón de rodal aunque en principio, aceptable dentro de las premisas iniciales de selección de rodales (entre 900 y 1000

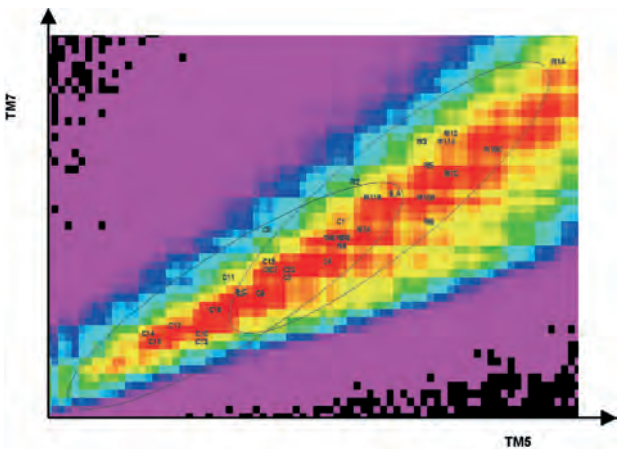


Figura 5. Imagen del espacio de características de los niveles digitales (ND) para las bandas 5 y 7.

m²), por el contrario, entremezclado con pies sanos y con niveles de fracción de cabida de cubierta (fcc) inferiores a los del resto de rodales analizados ($< 70\%$).

El análisis de la varianza (ANOVA) para cada una de las 7 bandas temáticas del sensor Landsat a un nivel de confianza del 95% (Tabla 2), mostró y acabó de confirmar los resultados obtenidos en el análisis de los niveles digitales (Figura 2), en que las bandas TM2, TM3, TM4, TM5 y TM7 del sensor eran las que daban una mayor respuesta significativa por lo que se refiere a las diferencias entre el comportamiento (o respuesta espectral) de los rodales afectados *versus* los rodales control.

Tabla 2. Cuadro resumen de los valores (niveles digitales: ND) obtenidos en la ANOVA para cada una de las 7 bandas analizadas y para cada conjunto de rodales (control y afectado) a un nivel de significación de $\alpha=0.05$. (Pr: probabilidad)

BANDA		FACTOR: TIPO DE RODAL	
		AFECTADO	CONTROL
TM1	ND	0,34502	0,33537
	Pr	0,16029	
TM2	ND	0,37396	0,35983
	Pr	0,01556	
TM3	ND	0,35312	0,33624
	Pr	0,02523	
TM4	ND	0,34040	0,31426
	Pr	0,01028	
TM5	ND	0,32404	0,21744
	Pr	<0,00001	
TM6	ND	0,45994	0,43040
	Pr	0,14252	
TM7	ND	0,36471	0,29956
	Pr	<0,00001	

De estas 5 bandas, las que mayor respuesta espectral mostraron fueron la TM5 y la TM7 ($p < 0.01$).

Discusión

Los resultados obtenidos en el análisis estadístico, confirman la hipótesis inicial sobre la viabilidad de la utilización Landsat en la detección de plagas forestales que también ha sido avalada por otros autores como Bentz y Endreson (2004), Wulder *et al.* (2006b) y White *et al.* (2006). En este sentido, trabajos como el de Franklin y Raske (1994) lograron clasificaciones bastante precisas empleando una única imagen, aunque los mejores resultados fueron obtenidos a partir del análisis de series multitemporales de imágenes (Franklin *et al.*, 1995). Así, aunque la respuesta espectral en nuestro caso haya sido significativa para las bandas TM2, TM3, TM4, TM5 y TM7, aquellas bandas que han mostrado una mayor relevancia han sido la TM5 y la TM7. Estas dos últimas bandas, detectan el contenido de humedad de la vegetación y por tanto, estarían informando del grado de humedad, del grado de verdor del árbol en cuestión e indirectamente informarnos sobre el estado de salud del árbol.

Para el resto de bandas espectrales (Figura 2), los resultados de los niveles digitales no han sido tan evidentes, circunstancia lógica si tenemos en cuenta que estas bandas corresponden al espectro visible e infrarrojo cercano (banda 4) y son frecuentemente utilizadas para estudiar comportamientos de suelo y agua. Por otro lado, la falta de significación estadística ($p > 0,05$) para las bandas TM1 y TM6 parecería razonable si tenemos en cuenta que la primera banda es usada a menudo para identificar espacios urbanos y la TM6 es una banda térmica.

De los resultados obtenidos en los espacios de características de los niveles digitales se observa que aparecen áreas de intersección entre las dos firmas creadas lo que significaría que no todas las áreas de entrenamiento escogidas a priori, como rodales representativos control y afectados servirían para discriminar y/o clasificar automáticamente en una etapa posterior, las imágenes Landsat. Los resultados obtenidos muestran que alrededor del 50% de las áreas de entrenamiento iniciales escogidas servirían para este fin. A la vista de los resultados sería deseable depurar aún más estas áreas de entrenamiento para una clasificación automática óptima y fiable, tal como han establecido diferentes autores. Navarro *et al.* (2000) agrupan los rodales afectados en

función de los niveles de afectación llegando a establecer cinco categorías, con unos resultados del 50% de fiabilidad por lo que respecta a la validación de la cartografía a través de la clasificación automática. Las causas que dan lugar a esta pérdida de fiabilidad podrían agruparse en tres tipos: errores cometidos durante el trabajo de campo, errores provenientes de un mal planteamiento inicial del problema (respuestas espectrales diferentes en función de la composición del rodal, por ejemplo) o bien debidos a un tratamiento insuficiente de la imagen. No obstante, parte de estos problemas derivados de la imagen podrían resolverse mediante el uso de una fuente de alta resolución espacial (Wulder *et al.*, 2006a).

En este sentido, las áreas afectadas clasificadas en la intersección del espacio de características, a pesar que se trataban de niveles de afectación de los tipos 2 y 3, presentaron una superficie de afectación escasa (en el límite de las premisas consideradas en la selección de rodales), con mezcla de otro tipo de vegetación sana entremezclada (herbácea y arbustiva) y sin una tan evidente distribución homogénea del grado de afectación. Por tanto, esta heterogeneidad en la composición específica de los rodales podría explicar en parte, esta falta de fiabilidad tal como también exponen Navarro *et al.* (2000).

En los espacios de intersección están presentes entre otros, los rodales C2, C3, C4, RI7a RI11b i C20. Interpretando los resultados obtenidos (las posiciones de estos rodales dentro de los respectivos espacios de características) y relacionándolos con la tipología de rodales identificados en campo, se observa que los rodales que han quedado mejor identificados dentro de los espacios de características como áreas afectadas son grupos de coníferas de diámetro normal por lo general superior a 20 cm, con una superficie del rodal del orden mínimo de 1000 m², homogéneo en sí, con grado de afectación nivel 3 (por tanto, árboles completamente defoliados) y rodeados de áreas sanas.

Analizando las fichas de campo de los rodales control dispuestos en las intersecciones de cada uno de los espacios de características para las 3 combinaciones de bandas estudiadas, éstas representan un tipo de zonas que no se corresponden completamente ni por orientación ni por características orográficas ni selvícolas a sus homólogos afectados. Este hecho ha podido ser también una de las causas de esta falta de clasificación como rodales sanos, segregándolos del resto de sus homólogos clasificados como “buenas áreas de entrenamiento de rodales sanos”. En el extremo opuesto; es decir, en la firma del conjunto de rodales control aparecen de forma

clara el grupo formado, entre otros, por C1, C10, C11, C12, C14, C15 i C17. Son rodales formados por pino silvestre, en su mayoría, de buenas conformaciones (diámetro medio igual o superior a 20 cm), con una estructura del rodal bien identificada y diferenciada del resto de vegetación adyacente. Por tanto, rodales que podríamos considerar como “buenas áreas de entrenamiento” de zonas sanas, bien identificadas dentro de los espacios de características y por tanto, con una respuesta espectral distinta al resto de rodales afectados.

El hecho que el rodal R11a no haya quedado englobado dentro de ninguna firma espectral, se explicaría probablemente, por tratarse de una zona que agrupa distintos árboles con diferentes niveles de afectación, mezclados a la vez con vegetación sana (tanto arbustiva como arbórea) y escasa fracción de cabida de cubierta (fcc). Ello puede haber sido en parte, la causa por la cual el análisis de clasificación de espacios de características haya resultado negativo para el caso de este rodal, básicamente por la gran dispersión y la falta de homogeneidad en él.

En conjunto, los resultados apuntan que el satélite Landsat puede ser una buena herramienta para la detección de plagas en el caso de rodales homogéneos, con grados de afectación de nivel 3, bien identificados y caracterizados en campo, distintos del resto de vegetación adyacente sana. Del mismo modo, nuestros resultados también sugieren que habría que usar sensores de alta resolución en el caso que la extensión de estas masas afectadas por escolítidos no fuera tan grande (menos de 1000 m²) ni fácilmente reconocible en campo debido en parte, al elevado grado de heterogeneidad tanto en composición específica del arbolado como en el recubrimiento de la masa. Esta apreciación también es observada por Wulder *et al.* (2006a), quienes en su trabajo realizado en el oeste de los Estados Unidos, proponen el uso de imágenes satélite como una oportunidad para la detección, el seguimiento y la obtención de información para la gestión de grandes superficies afectadas por plagas forestales. Los autores diferencian el uso de sensores en función de la escala de análisis, recomendando el uso de Landsat a escala de paisaje y para detectar signos ya evidentes de una vegetación con problemas sanitarios.

Para otros casos de detección precoz, los mismos autores aconsejan el uso de sensores de alta resolución, con más bandas multispectrales y capaces de afinar en las observaciones de campo. Sería en consecuencia, un tema más de detección precoz tal como apuntan Wulder *et al.* (2006a), y con ello la necesidad de usar satélites

de alta resolución. Ello explicaría en parte el porqué Landsat no tendría esta capacidad de “afinar” tanto para detectar rodales de escasa afectación como lo tendrían satélites de más alta resolución y de allí, derivar a una clasificación automática.

El hecho de seleccionar también la época o épocas más adecuadas para las observaciones en campo y los respectivos análisis espectrales de las imágenes también condicionaría en gran medida la mejora de los resultados obtenidos. En nuestro estudio, los datos de campo y la imagen de satélite Landsat provienen del verano de 2007 del mismo modo como proponen otros autores como Curran *et al.* (1992), Ekstrand (1994) y Navarro *et al.* (2000), los cuales proponen que la época más adecuada para discriminar características de la vegetación a partir de información procedente de imágenes satélite suele coincidir con las fechas de verano, dado que es entonces cuando las masas pueden presentar una mayor variación de la superficie foliar, debida a cambios de su estado sanitario o de vigor y no a cambios fenológicos importantes. Sin embargo, Navarro *et al.* (2000) apuntan que esto no es así en el caso de las masas afectadas por procesionaria, ya que los daños se concentran fundamentalmente durante el final del invierno (enero a marzo), aconsejando la utilización de imágenes correspondientes a estas fechas para el caso particular de esta aplicación.

Por otro lado, en nuestro estudio, el hecho que un conjunto de rodales afectados y control quedaran clasificados en la intersección de los espacios de características podría ser explicado en parte, por tratarse de áreas con composiciones específicas más heterogéneas respecto al resto de rodales analizados, con recubrimientos inferiores y con mayor presencia de sotobosque tal como también señalan Álvarez *et al.* (2005), los cuales en su trabajo exponen que en el caso de fracciones de cabida de cubierta (fcc) densas (>80%), la influencia del suelo y del sotobosque es pequeña pero en caso contrario, esta influencia aumenta cuando se reduce la fracción de cabida cubierta (fcc), convirtiéndose en un factor relevante para la discriminación y selección de áreas de entrenamiento. Los mismos autores añaden que otro aspecto a considerar es que las características dasométricas y selvícolas de las masas forestales afectan también a la respuesta espectral. Por ello, aconsejan la estratificación en función de la especie, la densidad arbórea, la edad o la selvicultura practicada. De este modo, los resultados podrían ser más precisos y se minimizarían los errores provenientes de la estructura de la masa (riesgo de confundir una masa joven o poco densa con una defoliada).

Nuestros datos también muestran resultados similares a los obtenidos por Bentz y Endreson (2004) cuando sugieren que la resolución espectral de Landsat no es suficiente para detectar niveles incipientes de ataque de escolítidos. Del mismo modo que hemos observado en nuestro trabajo, estos autores encontraron buenos resultados para el caso de píxeles que incluían grupos de árboles muertos afectados por escolítidos, siempre y cuando estos rodales fueran de un tamaño que incluyeran más de 25 árboles muertos por cada 30 metros de píxel, concluyendo que las imágenes Landsat son más apropiadas para la detección de poblaciones en fase ya avanzada de colonización o bien de epidemia. Los mismos autores señalan que utilizando imágenes de resolución espacial alta como es el caso de IKONOS (4m), la detección de grupos de árboles pequeños o grandes afectados por escolítidos podría llegar a ser asumida con una mayor precisión. Así pues, posiblemente, casi el 50% de los rodales que han quedado clasificados en la intersección de los espacios de características y que a través de Landsat no han podido ser utilizados como “áreas de entrenamiento”, podrían ser identificados y clasificados correctamente como tales, usando estos

satélites de mayor resolución espacial, ampliando por tanto, la fiabilidad del estudio.

Factores como las propiedades reflectantes, la orientación de las hojas, la geometría de la cubierta, las propiedades del suelo, la disposición de los árboles y las perturbaciones causadas por las condiciones atmosféricas durante la toma de imágenes serían también elementos que se sumarían a esta baja fiabilidad de las imágenes Landsat para la detección de rodales “incipientes” (nivel 1, 2) afectados por escolítidos, tal como también apunta en su estudio Ardö (1998).

Atendiendo a las observaciones de los anteriores autores, ampliando el número de áreas de entrenamiento del presente estudio y clasificándolas según composición específica, densidades, edades y creando una máscara de la cubierta vegetal, posiblemente los resultados obtenidos mostrarían una mejora substancial en la clasificación de las áreas de entrenamiento en los espacios de características y en consecuencia, aportarían una mayor claridad y fiabilidad a la identificación y clasificación automática de zonas afectadas por escolítidos. En esta línea, Moré *et al.* (2005) concluyen que creando una “máscara” estrictamente de la cubierta vegetal obje-

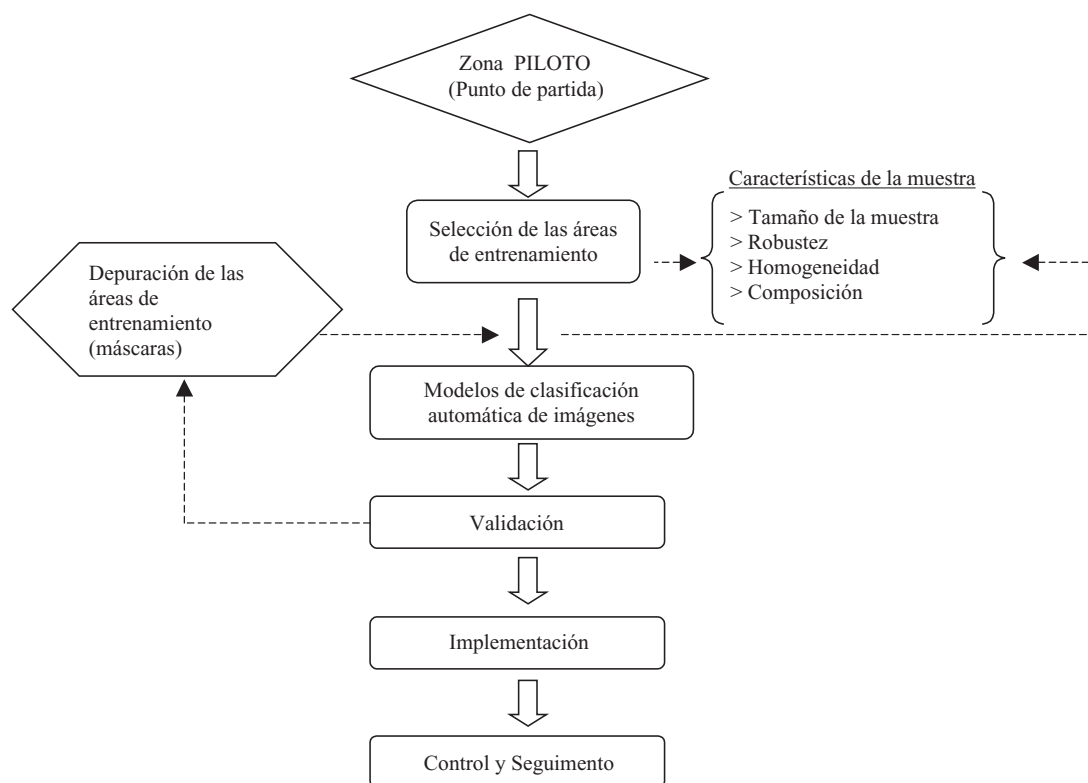


Figura 6. Esquema del procedimiento metodológico para mejorar la robustez de las áreas de entrenamiento y conseguir una clasificación automática de rodales afectados por plaga.

to de estudio, se reducía la variabilidad espectral de las imágenes y en consecuencia, disminuía la probabilidad de confusión entre categorías.

Esta revisión de las áreas de entrenamiento implicaría un mayor tamaño de muestras (áreas de entrenamiento), más homogéneas tanto en superficie, composición específica, edades y selvicultura aplicada, para así poder asegurar que las variaciones debidas, sean estrictamente causadas por la afectación y no por otros parámetros que añadirían “ruido” a la experiencia. La Figura 6 muestra el proceso metodológico a seguir que se desprendería a partir de nuestro estudio y que permitiría mejorar el uso de las imágenes satélite Landsat para la identificación de rodales afectados por escolítidos.

A partir de estos primeros resultados, se abre un gran abanico de oportunidades para la prospección, detección y seguimiento de afecciones bióticas para que los gestores de espacios forestales (rurales, periurbanos y urbanos) con unos gastos relativamente asumibles, pudieran obtener información precisa del estado sanitario de la vegetación, y en consecuencia, avanzarse a la toma de decisiones.

Agradecimientos

Los autores agradecen a Sònia Navarro, Silvia Busquet, Òscar García, Juan Martínez de Aragón, Odile Koua y Joan Pere Garrido el apoyo técnico en el trabajo de campo y los comentarios en el análisis de la información digital.

Referencias bibliográficas

- ÁLVAREZ M.F., LORENZO H., RODRÍGUEZ J.R., PICOS J., VALERO E., 2005. Detección de áreas forestales afectadas por el ataque de insectos empleando teledetección y sistemas de información geográfica. Aplicación a las masas de eucalipto afectadas por *Gonipterus scutellatus* en Galicia. Actas de la I Reunión de Inventario y Teledetección Forestal. Cuadernos de la Sociedad Española de Ciencias Forestales. 19: 27-33.
- ARDÖ J., 1998. Remote Sensing of Forest Decline in the Czech Republic. Lund University Press. Lund.
- BENTZ B.J., ENDRESON D., 2004. Evaluating satellite imagery for estimating mountain pine beetle-caused lodgepole pine mortality: current status. Information Report. Pacific Forestry Centre. Canadian Forest Service (no. BC-X-399): 154-163.
- BONNEAU L.R., SHIELDS K.S., CIVCO D.L., 1999. Using satellite images to classify and analyze the health of hemlock forests infested by the hemlock woolly adelgid. Biological Invasions 1(2/3): 255-267.
- BROCKHAUS JA., KHORRAM S., 1992. A comparison of Spot and Landsat TM data for use in conducting inventories of forest resources. International Journal of Remote Sensing 13(16): 3035-3043.
- BROCKHAUS JA., KHORRAM S., BRUCK RI., CAMPBELL MV., STALLINGS C., 1992. A comparison of Landsat TM and Spot HRV data for use in the development of forest defoliation models. International Journal of Remote Sensing 13 (16): 3235-3240.
- CANO F., NAVARRO R.Mª., GARCÍA A., SÁNCHEZ DE LA ORDEN M., 2005. Evaluación de la defoliación mediante imágenes IKONOS en masas de *Quercus suber* L. en el sur de España. Investigación Agraria: Sistemas y Recursos Forestales (2005) 14(2), 242-252.
- CIESLA W.M., CADAHÍA D., ROBREDO F., 1976. La detección de plagas de insectos y enfermedades forestales. Boletín de Sanidad Vegetal: Plagas, 2:37-53.
- CREAF, 2007. Centro de Investigación Ecológica y Aplicaciones Forestales. Campus de Bellaterra. Universidad Autónoma de Barcelona (UAB). Cerdanyola del Vallès. <http://www.creaf.uab.es/cat/index.htm>.
- CURRAN P.J., DUNGAN J.L., GHOL H.L., 1992. Seasonal LAI in Flash Pine Estimated with Landsat TM Remote Sensing of Environment 39: 3-13.
- DENGSHENG L.U., MAUSEL P., BRONDIZIO E., MORAN E., 2002. Above-Ground Biomass Estimation of Successional and Mature Forests Using TM Images in the Amazon Basin. Symposium on Geospatial Theory, Processing and Applications. Ottawa.
- DOTTA VIO C.L., WILLIAMS D.L., 1983. Satellite technology: an improved means for monitoring forest insect defoliation. Journal of Forest Research. 81(1):30-34.
- EKSTRAND S., 1994. Assessment of forest damage with LANDSAT-TM: correction for varying forest stand characteristics. Remote Sensing of Environment 47: 291-302.
- ERDAS® Field Guide, 1999. Atlanta pp 217-260.
- ESRI, 1989: Users Guide. Arc/Info. Volume 2. Command References. Environmental Systems Research Institute. Redlands, California.
- FRANKIN S.E., RASKE A.G., 1994. Satellite remote sensing of spruce budworm forest defoliation in Western Newfoundland. Canadian Journal of Remote Sensing. 20: 37-48.
- FRANKLIN S.E., WARING R.H., MCREIGHT R.W., CHEN W.B., FIORELLA M., 1995. Aerial and satellite sensor detection and classification of western spruce bud-

- worm forest defoliation in a subalpin forest. *Canadian Journal of Remote Sensing* . 21: 299-308.
- FRANKLIN S.E., WULDER M.A., SKAKUN R.S., CARROLL A.L., 2003. Mountain pine beetle red-attack forest damage classification using stratified Landsat TM data in British Columbia, Canada. *PE&RS, Photogrammetric Engineering & Remote Sensing* 69 (3): 283-288.
- GIL L.A., PAJARES J.A., 1986. Los escolítidos de las coníferas en la Península Ibérica. Instituto Nacional de Investigaciones Agrarias. Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación. Madrid. 194 pp.
- HERNÁNDEZ R., 2006. Diagnóstico. Principales agentes nocivos y síndromes complejos de decaimiento en el área mediterránea. Curso Avanzado: Diagnóstico, Seguimiento y gestión de la salud de los bosques. CIHEAM-IAMZ. Zaragoza 20-25 febrero.
- HOLMGREN P., THURESSON T., 1998. Satellite remote sensing for forestry planning- a review. *Scandinavian Journal of Forest Research* 13(1), 90-110.
- HORD R.M., 1982. *Digital Image Processing of Remotely Sensed Data*. Academic Press. New York.
- KLOER B.R., 1994. Hybrid parametric / non-parametric image classification. *ASPRS/ACSM*.
- MORÉ G., PONS X., BURRIEL J.A., CASTELLS R., IBÁÑEZ J.J., ROIJALS X., 2005. Diferenciación de cubiertas forestales para el MCSC a partir de la clasificación de imágenes Landsat. *Actas de la I Reunión de Inventario y Tele-detección Forestal*. Cuadernos de la Sociedad Española de Ciencias Forestales. 19:153-162.
- NAVARRO R., BLANCO P., FERNÁNDEZ P., 2000. Aplicación de las imágenes IRS-WiFS al análisis y evaluación de daños producidos por la procesionaria del pino (*Thaumetopoea pityocampa* Den&Schiff.) en los pinares de Andalucía oriental. *Mapping Interactivo. Revista Internacional de Ciencias de la Tierra*. 66: 26-36.
- STAR J., ESTES J., 1990. *Geographic information system: an introduction*. New Jersey: Prentice Hall. 303p.
- WHITE J.C., WULDER M.A., GRILLS D., 2006. Detecting and mapping mountain pine beetle red-attack damage with SPOT-5 10m multispectral imagery. *BC Journal of Ecosystems and Management* 7(2): 105-118.
- WOODS A., COATES K.D., HAMANN A., 2005. Is an unprecedented *Dothistroma* needle blight epidemic related to climate change?. *Bioscience*, 55(9): 761-769.
- WULDER M.A., FRANKLIN S.E., 2003. *Remote sensing of forest environments: Concepts and Case Studies*, Kluwer Academic Publishers, Boston (2003). 519 pp.
- WULDER M.A., DYMOND C.C., WHITE J.C., LECKIE D.G., CARROLL A.L., 2006a. Surveying mountain pine beetle damage of forests: A review of remote sensing opportunities. *Forest Ecology and Management*. 221 (1-3): 27-41.
- WULDER M.A., WHITE J.C., COOPS N.C., HAN T., ALVAREZ M.F., BUTSON C.R., YUAN X., 2006b. A procedure for Mapping and Monitoring Mountain Pine Beetle Red Attack Forest Damage using Landsat Imagery. *Natural Resources Canada. Canadian Forest Service (CFS). Pacific Forestry Centre*. Victoria, British Columbia. Information Report BC-X-404.