

RELACIÓN ENTRE LA INFORMACIÓN DE UNA IMAGEN DE SATÉLITE IRS-1C WIFS Y PARÁMETROS FORESTALES EN EL ÁREA DEL PINSAPAR DE GRAZALEMA

J. M. CUEVAS¹, F. GONZÁLEZ-ALONSO¹ Y S. MERINO DE MIGUEL¹

RESUMEN

Se estudia el abeto mediterráneo *Abies pinsapo* Boiss., pinsapo, en la sierra del Pinar, Cádiz, a partir de la información de una imagen captada por el sensor WiFS del satélite indio IRS-1C y de datos de las parcelas de campo del Segundo Inventario Forestal Nacional de España. Como parámetros forestales se han utilizado el número de pies, el área basimétrica y el volumen de fuste con corteza. En el caso de todas las parcelas de campo del Segundo Inventario Forestal Nacional en el área en estudio la relación entre el volumen de fuste con corteza y el NDVI de WiFS es significativa al 90%. En el caso de las parcelas de campo con abundancia de pinsapo, hay una relación significativa al 95% entre el NDVI de WiFS y, tanto el volumen de fuste con corteza de todas las especies, como el volumen de fuste con corteza de pinsapo. Se obtienen imágenes de potencialidad para el área en estudio de volumen de fuste con corteza de todas las especies, de volumen de fuste con corteza de pinsapo, y de porcentaje de volumen de fuste con corteza de pinsapo, y se analiza en el área potencialmente con pinsapo la relación entre el porcentaje de volumen de fuste de pinsapo y la superficie ocupada.

Palabras clave: *Pinsapo, IRS-1C WiFS, NDVI, Segundo Inventario Forestal Nacional de España, volumen de fuste con corteza*

SUMMARY

The Mediterranean fir *Abies pinsapo* Boiss. in sierra del Pinar, province of Cádiz, Spain, is studied using the information of an IRS-1C WiFS satellite image and data derived from ground plots of the Second National Forest Inventory of Spain. As forest parameters have been used the number of trees, the basal area and the stem wood volume with bark. For all the ground plots in the study area there is an statistically significant relationship between stem wood volume with bark of all species and WiFS NDVI at the 90% confidence level. In the case of the plots with appreciable presence of *Abies pinsapo* there is an statistically significant relationship at the 95% confidence level between WiFS NDVI and both stem wood volume with bark of all species and stem wood volume with bark of *Abies pinsapo*. Stem wood volume with bark images were obtained for the study area,

¹Laboratorio de Teledetección, CIFOR-INIA. Ctra. de A Coruña, km 7,5, 28040, Madrid cuevas@inia.es

one using data from all the ground plots and other using only data from the ground plots with appreciable presence of *Abies pinsapo*. The relationship between the estimated percent of stem wood volume with bark of *Abies pinsapo* and its potentially occupied area was later analysed.

Key words: *Abies pinsapo*, IRS-1C WiFS, NDVI, Second National Forest Inventory of Spain, stem volume with bark

INTRODUCCIÓN

Los pinsapares son, junto a los sabinares albares, una de las formaciones forestales más originales de la península Ibérica (COSTA *et al.* 1997), debido al carácter casi endémico de la especie arbórea dominante, el pinsapo (*Abies pinsapo* Boiss.), abeto de gran valor biogeográfico y paisajístico. El pinsapo es uno de los abetos circum-mediterráneos que forman un grupo de especies que están genéticamente muy relacionadas, pero que ocupan áreas alrededor del Mediterráneo desconectadas y a menudo de pequeña superficie.

Las especies de abetos estrictamente circum-mediterráneos son: *Abies pinsapo* Boiss., *Abies numidica* Carrière, *Abies nebrodensis* (Lojac), *Abies cilicica* de Lannoy y *Abies cephalonica* Loud. Según AUSSENAC (2002) un posible aumento de la sequía, debido a la subida de las temperaturas sin un incremento de las precipitaciones, generaría un gran riesgo para las áreas ocupadas por los abetos circum-mediterráneos, excepto en el caso de *Abies pinsapo* y *Abies numidica*.

El área de distribución natural del pinsapo se reduce a las sierras altas del extremo occidental de la cordillera Bética, y a la cadena caliza de Yebala en el norte de Marruecos, donde aparecen las variedades, o especies, *marocana* (Ceb. & M. Bol.) y *tazaotana* (S. Cóz.), que marcan la transición hacia el *Abies numidica* Carrière que ocupa una superficie bastante reducida en los montes Babor y Tababor de la Pequeña Kabylia (Argelia).

El área española de distribución natural del pinsapo queda incluida en la serranía de Ronda, con tres núcleos principales: sierra de

las Nieves y sierra Bermeja, o de los Reales, en la provincia de Málaga, y sierra del Pinar, en el término municipal de Grazalema, provincia de Cádiz. Es sobre las masas de pinsapo de la sierra del Pinar sobre las que se ha realizado este estudio. Manchas menores aparecen también en las sierras del Alcor, Caparaín, Real, Istán, Río Verde y Gialda en la provincia de Málaga, y Monte Prieto, Montón, Zafalgar y de los Pinos en la provincia de Cádiz. Las masas españolas de pinsapo se localizan en la zona con mayor precipitación anual de la península Ibérica, que oscila entre 2000 y 3000 mm, superando ciertos años los 4000 (Grazalema en 1963). Las precipitaciones estivales son superiores a 100 mm, en Grazalema a 150 mm. Según COSTA *et al.* (1997) el pinsapo actualmente cubre en torno a 3600 ha y según el Segundo Inventario Forestal Nacional de España (DGCONA 1998) el pinsapo ocupa como especie forestal dominante 2307,57 ha.

Las masas de pinsapo de la sierra del Pinar están situadas dentro del Parque Natural de la Sierra de Grazalema, creado en 1984 y con una superficie protegida de 51695 ha. Declarado en 1977 Reserva de la Biosfera por la Unesco, el Parque Natural de la Sierra de Grazalema se localiza en las provincias de Cádiz y Málaga, comprendiendo 13 municipios: Grazalema, Zahara de la Sierra, Villaluenga del Rosario, Benaocaz, Ubrique, El Bosque, Prado del Rey y el Gastor de la provincia de Cádiz, y Benaoján, Montejaque, Cortes de la Frontera, Jimena de Líbar y Ronda en la provincia de Málaga. En 1988 se aprobó el Plan de Uso y Protección del Parque Natural que incluye el pinsapar en el Área de Reserva del Parque (2747 ha).

Este pinsapar sufrió a comienzos del siglo XX una corta salvaje que, gracias a una reducción

de la presión del ganado en décadas posteriores, ha dado lugar a una espléndida renovación de la masa (RUIZ de la TORRE 1994) constituyendo actualmente masas con ejemplares jóvenes y vigorosos, especialmente en la vertiente norte (COSTA *et al.* 1997). En las Jornadas sobre Gestión y Conservación de los Pinsapares Andaluces (VV.AA. 1994) se presentaron diversos trabajos sobre las características, estado y gestión de las masas de pinsapo andaluzas, y entre sus conclusiones figura el que “se deben identificar áreas potenciales del pinsapar en las Sierras Béticas”, línea en que se encuadra este estudio cuyo objetivo fundamental es obtener en base a una imagen de satélite IRS-1C WiFS y los datos de las parcelas de campo del Segundo Inventario Forestal Nacional de España (IFN2) la potencialidad para el pinsapo en la sierra del Pinar.

El pinsapar de la sierra del Pinar aparece en altitudes entre 1000 y 1650 m. y sobre sustratos calizos del Lías y Jura. ARISTA (1995) ha estudiado la composición y estructura de estos bosques, y la relación entre edad y diámetro de los pinsapos, y sus resultados indican que los bosques de pinsapo de la sierra del Pinar están en equilibrio y que su dinámica está condicionada por la reducida presencia de brinzales y por la formación de huecos en la cubierta de copas.

Los pinsapares andaluces han sido objeto de numerosos estudios, ARISTA *et al.* (1997), si bien hasta ahora el único realizado utilizando imágenes de satélite sobre áreas con presencia de pinsapo es el de OJEDA *et al.* (1986), que buscaba utilizando imágenes Landsat TM el análisis de unidades edáficas, de vegetación y la delimitación de unidades de paisaje en dos hojas del Mapa Topográfico Nacional a escala 1:50000, una de las cuales, la 1050 (Ubrique), incluye un amplia extensión del Parque Natural de la Sierra de Grazalema. Según estos autores la banda 5 de Landsat TM permite definir con bastante exactitud el espacio ocupado por los pinsapos, individualizando en él zonas con diferente densidad de ocupación.

MATERIAL Y MÉTODOS

Imagen IRS-1C WiFS empleada

Son varios los satélites puestos en órbita por el programa espacial indio de teledetección (Bhaskara 1 y 2, IRS 1A y 1B, IRS-P2, IRS-1C, IRS-1D). El satélite IRS-1C fue puesto en órbita el 28 de diciembre de 1995. En KASTURIRANGAN *et al.* (1996) y en IRS-1C Satellite (2002) se encuentra información sobre este satélite y sus sensores. Este satélite tiene una órbita heliosíncrona a una altura de 817 km y dispone de tres sensores: una cámara pancromática de alta resolución espacial nominal (5,8 m), el sensor LISS-III (Linear Imaging and Self Scanning Sensor) con dos bandas en el visible, una en el infrarrojo cercano y una en el infrarrojo medio, y una resolución espacial nominal de 23,5 m en el visible e infrarrojo cercano y 70,5 m en el infrarrojo medio, y el sensor WiFS (Wide Field Sensor) con dos bandas espectrales correspondientes al visible (0,62 - 0,68 μ) y al infrarrojo cercano (0,77 - 0,86 μ), una resolución espacial nominal de 188,3 m y una resolución temporal de cinco días. TOMPO *et al.* (2002) han estudiado el uso combinado de información Landsat TM e IRS-1C WiFS junto a datos de los inventarios forestales nacionales de Suecia y Finlandia para construir modelos para el volumen de fuste y la biomasa forestal aérea en función de los datos WiFS. ROY *et al.* (2002) han estudiado mediante imágenes IRS-1C WiFS la deforestación en el Este de la India obteniendo que la cubierta forestal es bastante inferior a la estimada por el Inventario Forestal de India.

La imagen IRS-1C WiFS utilizada fue captada el 17 de agosto de 1996 y cubre gran parte de la península Ibérica excepto los sectores más septentrionales y occidentales. La cubierta nubosa en esta imagen es bastante escasa, siendo nula en el área de la sierra del Pinar, aunque las otras áreas españolas con presencia de pinsapo están parcialmente cubiertas, por lo que este estudio se ha limitado a la sierra del Pinar. Esta misma imagen se ha utilizado en otros estudios relacionados con masas forestales

mediterráneas haciendo uso de los datos de campo del Segundo Inventario Forestal Nacional de España, como en los casos de los pinares de pino piñonero de Barbate (CUEVAS *et al.* 2000a) y del Parque Natural de los Alcornocales (CUEVAS *et al.* 2000b). En el primero de estos estudios se estimó la superficie cubierta por las copas de pino piñonero y en el segundo se desarrolló una metodología que permitió delimitar zonas geográficas con área basimétrica significativamente diferente entre sí, basándose en la división por rangos del NDVI de WiFS, aun cuando no se prestó atención a la caracterización de las diversas especies forestales presentes, principalmente alcornoque (*Quercus suber* L.), quejigo andaluz (*Quercus canariensis* Willd.) y acebuche (*Olea europaea* L.).

Un sector de esta imagen fue georeferenciado adoptando como tamaño de píxel 180 m, utilizando para ello una digitalización de los límites de la Provincia de Cádiz. Se han usado 22 puntos de control, todos ellos situados en la costa (Mar Mediterráneo y Océano Atlántico), obteniéndose un error cuadrático medio de 0,88. En la Fig. 1 de CUEVAS *et al.* (2000a) aparece representado un sector de esta imagen IRS-1C WiFS cubriendo el Parque Natural de los Alcornocales en el que la sierra del Pinar aparece en el extremo nororiental. Dado que la sierra del Pinar dista en su parte central aproximadamente 45 km del Mar Mediterráneo y 75 km del Océano Atlántico y que los puntos de control utilizados están todos situados en la costa, se aplicó una calibración local a este sector de imagen para lo que se desplazó 100 m al este y 200 m al sur.

Se ha seleccionado un sector rectangular de la imagen IRS-1C WiFS una vez georeferenciada cubriendo la sierra del Pinar (Grazalema) en el que quedan incluidas las masas de pinsapo presentes en esta sierra y todas las parcelas del IFN2 con presencia de pinsapo. Este sector de imagen cubre una superficie de 6829,92 ha, teniendo una anchura de 11610 m y una altura de 6120 m, y está formado por 34 filas y 62 columnas. Como información WiFS se ha utilizado sus dos bandas, visible e infrarrojo cer-

cano, así como el Índice de Vegetación Normalizado o NDVI (TUCKER 1979). El NDVI tiene como expresión:

$$\text{NDVI} = (\text{infrarrojo cercano} - \text{visible}) / (\text{infrarrojo cercano} + \text{visible})$$

El NDVI es un buen indicador de la capacidad de la vegetación para absorber la radiación solar fotosintéticamente activa y está muy correlacionado con el índice de superficie foliar, la productividad neta primaria y la biomasa. En la tabla 1 aparecen diversos parámetros estadísticos de este sector utilizado de imagen IRS-1C WiFS.

	Media	Mínimo	Máximo	Desviación típica
Visible	76,88	43	140	19,553
Infrarrojo cercano	129,05	98	156	9,163
NDVI	0,263	-0,048689	0,50785	0,118

Tabla 1. Valores del sector de imagen IRS-1C WiFS utilizado.

Table 1. Values of the sector of IRS-1C WiFS image used.

El Segundo Inventario Forestal Nacional de España en el área de la sierra del Pinar

El Segundo Inventario Forestal Nacional de España adoptó como diseño un muestreo sistemático (ICONA 1990) utilizando como centro de las parcelas de muestreo de campo los vértices de una malla cuadrada de 1 km de lado en las zonas consideradas como inventariables que se obtuvieron a partir de la digitalización de las hojas a escala 1:50.000 del Mapa de Cultivos y Aprovechamientos.

En cada parcela de campo se anotaron diversos datos relativos a la estación y se midió el diámetro normal de los pies mayores, aquellos árboles con diámetro normal igual o superior a 75 mm, en cuatro círculos concéntricos de 5, 10, 15 y 25 m de radio. En cada uno de estos círculos se midió el diámetro normal y otros parámetros de los pies mayores cuyo diámetro normal fuese inferior a 125, 225, 425, e igual o

superior a 425 mm respectivamente. Los pies menores, aquellos árboles con diámetro normal mayor de 24 mm y menor de 75 mm, se contaron por especies en un círculo de 5 m de radio.

En el terreno cubierto por el sector de imagen WiFS utilizado se dispone de 19 parcelas de campo del IFN2 con datos completos. Estas parcelas de campo se realizaron de septiembre a noviembre de 1996, es decir, son bastante coetáneas con la imagen WiFS empleada que fue captada el 17 de agosto de 1996. Para estas parcelas de campo se han obtenido diversos

	Media	Mínimo	Máximo	Desviación típica
Número de pies por hectárea	279,6	0	1134,5	407,4
Área basimétrica (m ² /ha)	14,9	0	68,1	17,2
Volumen de fuste con corteza (m ³ /ha)	59,6	0	412,8	105,5

Tabla 2. Parámetros dasométricos de todas las parcelas de campo del Segundo Inventario Forestal Nacional de España en la Sierra del Pinar.

Table 2. Dasometric parameters of all Second National Forest Inventory of Spain ground plots in Sierra del Pinar.

parámetros dasométricos: número de pies mayores por hectárea, área basimétrica (suma de las secciones de los pies mayores a 1,3 m del suelo expresada en metros cuadrados por hectárea) y volúmenes de fuste con corteza por hectárea, todos ellos a nivel de especie, que aparecen en la tabla 2. De estas 19 parcelas cuatro no tienen pies mayores y, por tanto, su área basimétrica y su volumen de fuste con corteza son nulos.

El pinsapo aparece solamente en ocho de las 19 parcelas de campo del IFN2 presentes en el área en estudio. Este número de parcelas del IFN2 con presencia de pinsapo en la sierra del pinar es bastante reducido, siendo consecuencia de la pequeña superficie ocupada por los pinsapares. La encina (*Quercus ilex*) aparece en once de estas 19 parcelas, con un área basimétrica media en estas once parcelas de 8,57, un mínimo de 2,21 y un máximo de 18,34 m²/ha, y

con un volumen de fuste con corteza medio en estas once parcelas de 19,8, un mínimo de 4,48 y un máximo de 47,24 m³/ha. El quejigo (*Quercus faginea*) aparece en cinco de las 19 parcelas de campo del IFN2, con un área basimétrica media en estas cinco parcelas de 6,38, un mínimo de 2,64 y un máximo de 12,42 m²/ha, y con un volumen de fuste con corteza medio en estas cinco parcelas de 14,88, un mínimo de 5,99 y un máximo de 28,99 m³/ha. Otras especies forestales presentes en las parcelas de campo del IFN2 en el área en estudio son *Quercus suber*, *Olea europaea* y *Ceratonia siliqua* presentes en dos parcelas, y *Crataegus monogyna*, *Pinus pinaster*, *Juniperus phoenicea*, *Phillyrea latifolia* y *Quercus canariensis* presentes en una parcela.

Para caracterizar espectralmente a las masas de pinsapo en base a la información WiFS se decidió excluir a dos de las ocho parcelas del IFN2 con presencia de pinsapo en la sierra del Pinar por tener exclusivamente un pie mayor de pinsapo cada una, de diámetro normal 32 y 50 cm, un porcentaje de número de pies de pinsapo muy bajo (9,98 y 4,97%), un área basimétrica de pinsapo muy baja (0,95 y 0,91 m²/ha), un porcentaje de área basimétrica de pinsapo muy bajo (3,23 y 6,66%), un volumen de fuste con corteza de pinsapo muy bajo (4,81 y 5,09 m³/ha) y un porcentaje de volumen de fuste con corteza de pinsapo bastante bajo (6,21 y 14,76%), siendo de las parcelas de campo con presencia de pinsapo las dos parcelas con menor porcentaje de volumen de fuste con corteza de pinsapo. En estas dos parcelas las especies forestales dominantes son *Quercus faginea* y *Quercus ilex* en una, y *Quercus ilex* en otra. Por tanto, aunque en estas dos parcelas del IFN2 esté presente el pinsapo no parece razonable utilizarlas para caracterizar espectralmente mediante una imagen IRS-1C WiFS a las masas de pinsapo.

En la tabla 3 figuran diversos parámetros dasométricos de las seis parcelas de campo del IFN2 con abundancia de pinsapo en el área en estudio. El porcentaje medio de volumen de fuste con corteza de pinsapo en estas parcelas de campo del IFN2 es 73,5, con un mínimo de 23,9

y un máximo de 100%. Dos de estas parcelas de campo del IFN2 tienen como única especie con pies mayores el pinsapo, siendo sus volúmenes de fuste con corteza 26,19 y 269,14 m³/ha. En cuatro de estas parcelas el porcentaje de volumen con corteza de pinsapo es superior al 87,92%. En tres de estas parcelas también están presentes la encina y el quejigo, y en una el quejigo. El mayor diámetro normal de los pies de

pinsapo en estas parcelas es 77,0 cm. El grupo de parcelas del IFN2 con abundancia de pinsapo es significativamente diferente al 99% respecto al área basimétrica ($F = 11,51$) y el volumen de fuste con corteza ($F = 8,92$) del grupo de las restantes parcelas del IFN2 en el área en estudio. Pero estos dos grupos de parcelas sólo son significativamente diferentes al 66% respecto al número de pies mayores ($F=1,17$).

	Media	Mínimo	Máximo	Desviación típica
Número de pies de todas las especies/ha	457,3	79,4	1083,2	432,2
Número de pies de pinsapo/ha	415,5	43,6	1083,2	447,1
Porcentaje de número de pies de pinsapo	80,9	28,7	100	27,6
Número de pies de encina/ha, tres parcelas	50,9	20,4	98,2	39,2
Número de pies de quejigo/ha, cuatro parcelas	20,4	5,1	50,9	20,8
Área basimétrica de todas las especies (m ² /ha)	34,0	5,1	68,1	21,2
Área basimétrica de pinsapo (m ² /ha)	21,9	4,0	47,3	19,2
Porcentaje de área basimétrica de pinsapo	63,7	15,8	100	35,9
Área basimétrica de encina (m ² /ha), tres parcelas	12,2	5,6	18,3	6,4
Área basimétrica de quejigo (m ² /ha), cuatro parcelas	9,0	2,6	20,8	8,1
Volumen de fuste con corteza de todas las especies (m ³ /ha)	186,3	26,2	412,8	148,6
Volumen de fuste con corteza de pinsapo (m ³ /ha)	151,4	16,7	333,9	139,4
Porcentaje de volumen de fuste con corteza de pinsapo	73,5	23,9	100	30,9
Volumen de fuste con corteza de encina (m ³ /ha), tres parcelas	31,7	13,7	47,2	16,9
Volumen de fuste con corteza de quejigo (m ³ /ha), cuatro parcelas	28,5	6,0	79,0	33,9

Tabla 3. Parámetros dasométricos de las parcelas de campo del Segundo Inventario Forestal Nacional de España con abundancia de pinsapo en la Sierra del Pinar.

Table 3. Dasometric parameters of the Second National Forest Inventory of Spain ground plots with remarkable presence of *abies pinsapo* in Sierra del Pinar.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Relación entre la información IRS-1C WiFS y los parámetros dasométricos de las parcelas de campo del Segundo Inventario Forestal Nacional de España

A las 19 parcelas de campo del IFN2 presentes en el área en estudio les corresponde la información WiFS que aparece en la tabla 4.

Los coeficientes de correlación entre la información WiFS y los parámetros dasométricos de estas 19 parcelas de campo figuran en la tabla 5. En la tabla 6 aparecen los valores de la información WiFS que corresponden al centro de las parcelas de campo del IFN2 con abundancia de pinsapo. Hay una diferencia significativa al 66% entre el NDVI ($F = 2,53$) y el visible ($F=1,17$) de estos dos grupos de parcelas, y al 90% entre el infrarrojo ($F=3,62$).

	Media	Mínimo	Máximo	Desviación típica
Visible	69,6	48	115	19,44
Infrarrojo cercano	131,0	113	149	9,03
NDVI	0,318	0,053	0,490	0,123

Tabla 4. Valores IRS-1C WiFS correspondientes a todas las parcelas de campo del Segundo Inventario Forestal Nacional de España en la Sierra del Pinar.

Table 4. IRS-1C WiFS values of all Second National Forest Inventory of Spain ground plots in Sierra del Pinar.

	Visible	Infrarrojo cercano	NDVI
Número de pies	-0,395*	-0,011	0,393*
Área basimétrica	-0,364	0,436*	0,461**
Volumen de fuste con corteza	-0,362*	0,332*	0,446*

* = Relación significativa al 90%

** = Relación significativa al 95%

Tabla 5. Coeficientes de correlación entre la información IRS-1C WiFS y los parámetros dasométricos de todas las parcelas de campo del Segundo Inventario Forestal Nacional de España en la Sierra del Pinar.

Table 5. Correlation coefficients among the IRS-1C WiFS information and the dasometric parameters of the Second National Forest Inventory of Spain ground plots in Sierra del Pinar.

Los coeficientes de correlación entre la información WiFS correspondiente a las parcelas de campo con abundancia de pinsapo y sus parámetros dasométricos figuran en la tabla 7, y son bastante mayores que los obtenidos en el caso de utilizar todas las parcelas de campo del IFN2 (tabla 5). Igualmente estos coeficientes de correlación son superiores a los que se obtienen en caso de utilizar todas las parcelas del IFN2 con presencia de pinsapo, sea éste la especie dominante o no, y que aparecen en la tabla 8.

Los coeficientes de correlación en el caso de las parcelas del IFN2 con abundancia de pinsapo son bastante altos en el caso del NDVI y el visible, en tanto que son muy bajos en el caso del infrarrojo cercano. Los coeficientes de correlación obtenidos en el caso de las 19 parcelas de campo del IFN2 presentes en el área en estudio tienen valores semejantes a los de algunos estudios realizados utilizando imáge-

	Media	Mínimo	Máximo	Desviación típica
Visible	68,5	48	94	17,0
Infrarrojo cercano	138,5	121	149	11,3
NDVI	0,345	0,210	0,490	0,100

Tabla 6. Valores IRS-1C WiFS correspondientes a las parcelas de campo del Segundo Inventario Forestal Nacional de España con abundancia de pinsapo en la Sierra del Pinar.

Table 6. IRS-1C WiFS values of the Second National Forest Inventory of Spain ground plots with remarkable presence of *abies pinsapo* in Sierra del Pinar.

	Visible	Infrarrojo cercano	NDVI
Número de pies de todas las especies	-0,821**	-0,265	0,849**
Número de pies de pinsapo	-0,833**	-0,328	0,839**
Área basimétrica de todas las especies	-0,533	0,421	0,748**
Área basimétrica de pinsapo	-0,814**	-0,022	0,896**
Volumen de fuste con corteza de todas las especies	-0,722*	0,184	0,867**
Volumen de fuste con corteza de pinsapo	-0,808*	-0,009	0,893**

* = Relación significativa al 90%

** = Relación significativa al 95%

Tabla 7. Coeficientes de correlación entre la información IRS-1C WiFS y los parámetros dasométricos de las parcelas de campo del Segundo Inventario Forestal Nacional de España con abundancia de pinsapo en la Sierra del Pinar.

Table 7. Correlation coefficients among the IRS-1C WiFS information and the dasometric parameters of the Second National Forest Inventory of Spain ground plots with remarkable presence of *abies pinsapo* in Sierra del Pinar.

	Visible	Infrarrojo cercano	NDVI
Número de pies de todas las especies	-0,654*	-0,203	0,709**
Número de pies de pinsapo	-0,655*	-0,346	0,645*
Área basimétrica de todas las especies	-0,502	0,269	0,694*
Área basimétrica de pinsapo	-0,602	-0,091	0,650
Volumen de fuste con corteza de todas las especies	-0,574	0,138	0,720**
Volumen de fuste con corteza de pinsapo	-0,606	-0,078	0,657*

* = Relación significativa al 90%

** = Relación significativa al 95%

Tabla 8. Coeficientes de correlación entre la información IRS-1C WiFS y los parámetros dasométricos de todas las parcelas de campo del Segundo Inventario Forestal Nacional de España con presencia de pinsapo en la Sierra del Pinar.

Table 8. Correlation coefficients among the IRS-1C WiFS information and the dasometric parameters of all the Second National Forest Inventory of Spain ground plots with presence of *abies pinsapo* in Sierra del Pinar.

nes de satélite de mayor resolución espacial (MALLINIS *et al.*, 2004; RAHMAN *et al.* 2005), y son muy similares a los obtenidos en el Parque Natural de Los Alcornocales (CUEVAS *et al.*, 2000b) usando esta misma imagen WiFS y también datos de campo del IFN2, aunque en este caso las masas forestales están formadas básicamente por quercíneas. Los coeficientes de correlación obtenidos en el caso de utilizar exclusivamente a las parcelas del IFN2 con abundancia de pinsapo son bastante superiores a los habituales entre parámetros de biomasa forestal e información espectral, lo que es atribuible al hecho de tratarse de parcelas con una única especie forestal dominante, el pinsapo, que supone de media el 80,9% del número de pies mayores, el 63,7% del área basimétrica y el 73,5% del volumen de fuste con corteza de estas parcelas (tabla 3).

La pareja de parámetros dasométricos, de todas las especies y exclusivamente de pinsapo, con mayores coeficientes de correlación con la información WiFS son los volúmenes, que los tienen con el NDVI (tabla 7). Tanto en el caso del volumen de fuste con corteza de todas las especies como en el caso del volumen de fuste con corteza de pinsapo existe una relación significativa al 95% con el NDVI. Es por ello, que son los volúmenes de fuste con corteza los que se estiman haciendo uso del NDVI de IRS-1C WiFS.

El valor máximo del NDVI de WiFS correspondiente a las parcelas de campo del IFN2 con presencia de pinsapo es 0,49, en tanto que el máximo NDVI en el sector de imagen IRS-1C WiFS utilizado es 0,50785, es decir muy ligeramente superior. La superficie con un NDVI superior a 0,49 es solamente 19,44 ha (ocho píxeles). Es decir, la superficie con un NDVI mayor que el correspondiente a las parcelas de campo del IFN2 con presencia de pinsapo es muy reducida.

Entre el volumen de fuste con corteza (Vfc) de todas las especies de todas las parcelas de campo del IFN2 en el área en estudio, con pinsapo o sin pinsapo, y el NDVI de WiFS el coeficiente de correlación es 0,446, existiendo

entre ellos una relación débil y significativa al 90%. Por regresión lineal se obtiene:

$$(1) \text{ Vfc de todas las especies} = -61,9237 + 382,446 \text{ NDVI}$$

$$R^2 = 19,888\%$$

Entre el volumen de fuste con corteza de todas las especies de las parcelas de campo del IFN2 con abundancia de pinsapo y el NDVI de WiFS el coeficiente de correlación es 0,867, existiendo una relación significativa al 95%. Por regresión lineal se obtiene:

$$(2) \text{ Vfc de todas las especies} = -257,719 + 1286,56 \text{ NDVI}$$

$$R^2 = 75,21\%$$

Este último modelo es de una calidad muy superior al obtenido utilizando todas las parcelas de campo del IFN2 presentes en el área en estudio, con pinsapo o sin pinsapo. Estas dos rectas se cruzan para un NDVI = 0,217 y un volumen de fuste con corteza de 20,9 m³/ha. Es decir, solamente para valores de NDVI inferiores a 0,217 es mayor el volumen de fuste con corteza de todas las especies estimado utilizando todas las parcelas de campo, con pinsapo o sin pinsapo (1). Para el valor máximo del NDVI en el área en estudio (0,50785) se obtiene con este ajuste (2) un valor de volumen de fuste con corteza de todas las especies de 395,7 m³/ha, valor muy semejante al máximo de las parcelas de campo del IFN2 en el área en estudio (tabla 7) que es 412,84 m³/ha, y que corresponde a una parcela en la que el porcentaje de volumen de fuste con corteza de pinsapo es 80,87, siendo el resto de *Quercus faginea*.

Entre el volumen de fuste con corteza de pinsapo de las parcelas de campo del IFN2 con abundancia de pinsapo y el NDVI de WiFS el coeficiente de correlación es bastante alto, 0,893, existiendo entre ellos una relación significativa al 95%. Este coeficiente de correlación es ligeramente superior al obtenido en el caso de utilizar el volumen de fuste de todas las

	Volumen de fuste con corteza de todas las especies estimado utilizando todas las parcelas de campo del IFN2 en el área en estudio	Volumen de fuste con corteza de todas las especies estimado utilizando las parcelas de campo del IFN2 con abundancia de pinsapo en el área en estudio	Volumen de fuste con corteza de pinsapo estimado utilizando las parcelas de campo del IFN2 con abundancia de pinsapo en el área en estudio
Media (m ³ /ha)	146,9	165,8	144,0
Mínimo (m ³ /ha)	0,02	1,7	0,02
Máximo (m ³ /ha)	395,7	395,7	353,6
Desviación típica (m ³ /ha)	101,4	93,9	83,3

Tabla 9. Volúmenes de fuste con corteza estimados en el área en estudio usando la información IRS-1C WiFS.

Table 9. Stem volumes with bark estimated in the study area making use of the IRS-1C WiFS information.

especies (0,867). Esto mismo sucede en el caso del número de pies mayores y del área básica. Por regresión lineal se obtiene:

$$V_{fc} \text{ de pinsapo} = -277,449 + 1242,59 \text{ NDVI}$$

$$R^2 = 79,74\%$$

Con esta ecuación se estima un volumen de fuste con corteza de pinsapo igual a cero para un NDVI igual a 0,224. Para este valor de NDVI la relación anterior (2) da un volumen de fuste con corteza de todas las especies de 29,5 m³/ha, y para el valor máximo del NDVI en el área en estudio, 0,50785, se obtiene un volumen de fuste con corteza de pinsapo de 353,6 m³/ha,

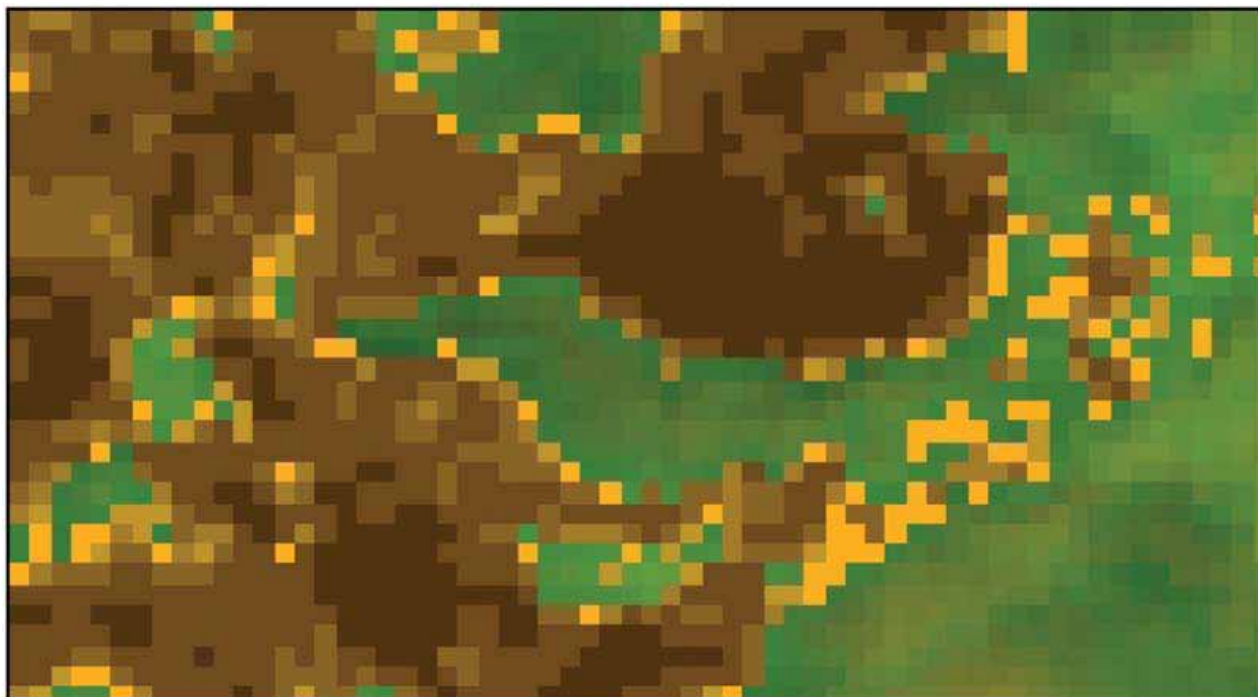


Figura 1 - Porcentaje estimado de volumen de fuste con corteza de pinsapo por niveles (< 45, 45-55, 55-65, 65-75, 75-85 y > 85%) superpuesto al sector de imagen IRS-1C WiFS empleado (visible en rojo, infrarrojo cercano en verde).

Figure 1 - Estimated percent of *Abies pinsapo* stem volume with bark by levels (< 45, 45-55, 55-65, 65-75, 75-85 and > 85%) over the sector of the IRS-1C WiFS image used (visible in red, near-infrared in green).

valor bastante próximo al máximo valor del volumen de fuste con corteza de pinsapo en las parcelas de campo del IFN2 con presencia de pinsapo (tabla 3), que es 333,9 m³/ha.

Haciendo uso de estas ecuaciones se han obtenido las imágenes de volumen de fuste con corteza de todas las especies en base a todas parcelas de campo del IFN2, con pinsapo o sin pinsapo, y de volumen de fuste con corteza de todas las especies y de pinsapo en base a las parcelas de campo del IFN2 con abundancia de pinsapo.

El volumen estimado de fuste con corteza de todas las especies en base a todas las parcelas es mayor que el volumen estimado de fuste con corteza de todas especies en base a las parcelas con abundancia de pinsapo en solamente 813,24 ha. Como volumen de fuste con corteza de todas las especies se ha adoptado el valor mayor de ellos (1) y (2). En la tabla 9 aparecen el volumen de fuste con corteza estimado utilizando la información WiFS de todas las especies en todo el área en estudio, y de todas las especies y de sólo pinsapo a partir de las parcelas del IFN2 con abundancia de pinsapo. La superficie del área en que el volumen estimado de fuste con corteza de pinsapo es mayor de cero es 4263,8 ha. Esta superficie es bastante similar a la que NEVA (1994) estima como área de distribución dispersa o potencial del pinsapo en el Parque Natural de la sierra de Grazalema que es de "hasta 5000 ha aproximadamente".

El porcentaje estimado de volumen de fuste con corteza de pinsapo tiene una media de 72,98, un mínimo de 0,076 y un máximo de 89,37%. Las parcelas de campo del IFN2 con abundancia de pinsapo utilizadas tienen un porcentaje medio de volumen de fuste con corteza de pinsapo de 73,46, muy similar al obtenido, con un mínimo de 23,91 y un máximo de 100%. La zona donde el porcentaje obtenido de volumen de fuste con corteza de pinsapo es inferior al 23,91% es de sólo 158,76 ha (49 píxeles IRS-1C WiFS) y su situación siempre es periférica, es decir, en los bordes de las áreas caracterizadas por su potencialidad para el pinsapo.

Sin embargo, las ocho parcelas de campo con presencia de pinsapo en el área en estudio, de las que dos no se han utilizado para caracterizar espectralmente a los pinsapares por la muy reducida abundancia de pinsapo, tienen un porcentaje medio de volumen de fuste con corteza de pinsapo de 57,72, con un mínimo de 6,21 y un máximo de 100%. La superficie de la zona donde el porcentaje estimado de volumen de fuste con corteza de pinsapo es inferior a 6,21% es de sólo 35,64 ha (once píxeles IRS-1C WiFS).

En la figura 1 aparece el porcentaje estimado de volumen de fuste con corteza de pinsapo respecto al volumen de fuste con corteza de todas las especies por niveles (< 45, 45-55, 55-65, 65-75, 75-85 y > 85%) superpuesto al sector de imagen IRS-1C WiFS empleado.

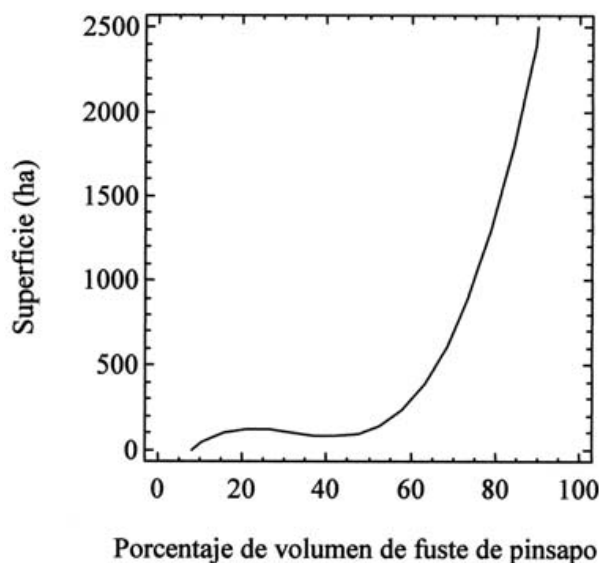


Figura 2 - Relación entre el porcentaje de volumen de fuste con corteza de pinsapo estimado y la superficie ocupada.

Figure 2 - Relationship between obtained percent of *Abies pinsapo* stem volume with bark and surface occupied.

El coeficiente de correlación entre el porcentaje obtenido de volumen de fuste con corteza de pinsapo respecto al volumen de fuste con

corteza de todas las especies (% Vfc Pin) y la superficie ocupada es bastante alto: 0,818. Entre estos dos conceptos se puede establecer la siguiente relación polinomial (Figura 2), que tiene un coeficiente de determinación muy alto, 99,59%, y todos sus términos significativos al 99%:

$$\text{Superficie (ha)} = -218,085 + 37,2729 \% \text{ Vfc Pin} - 1,27777 \% \text{ Vfc Pin}^2 + 0,0132807 \% \text{ Vfc Pin}^3$$

Como se puede observar en la figura 2 la superficie ocupada por las zonas en que el porcentaje obtenido de volumen de fuste con corteza de pinsapo respecto al volumen de fuste con corteza de todas las especies aumenta muy notablemente a partir de que este porcentaje supera el 50%. La zona donde el volumen de fuste con corteza de pinsapo estimado es igual o superior al 50% del volumen de fuste con corteza de todas las especies estimado, es decir donde se podría considerar como especie potencialmente codominante o dominante al pinsapo, tiene una superficie de 3888,0 ha (1200 píxeles), el 90,77%, y donde el volumen de fuste con corteza de pinsapo estimado es igual o superior al 70% del volumen de fuste con corteza de todas las especies estimado, es decir, donde se podría considerar claramente como especie potencialmente dominante al pinsapo, tiene una superficie de 3259,44 ha (1006 píxeles), el 76,09%. Las áreas potenciales obtenidas con masas propiamente mixtas de pinsapo y otras especies forestales no son muy abundantes. Así, la zona donde el

pinsapo supone más del 30% y menos del 70% del volumen de fuste con corteza de todas las especies estimado tiene una superficie de sólo 826,20 ha (255 píxeles), el 19,29%.

CONCLUSIONES

Se ha comprobado el interés de la información de las imágenes de satélite de resolución espacial media IRS-1C WiFS, para determinar la potencialidad geográfica de una especie forestal endémica como el pinsapo. El NDVI de IRS-1C WiFS tiene una relación significativa al 95% con el volumen de fuste de pinsapo y con el volumen de fuste de todas las especies en el caso de las parcelas de campo del Segundo Inventario Forestal Nacional con abundancia de pinsapo. La metodología desarrollada ha permitido estimar en el área en estudio el porcentaje de volumen de fuste con corteza de pinsapo respecto al volumen de fuste con corteza del conjunto de las especies forestales.

AGRADECIMIENTOS

Se agradece al Banco de Datos de la Naturaleza de la Dirección General de la Biodiversidad, Ministerio de Medio Ambiente, por haber facilitado los datos de las parcelas de campo del Segundo Inventario Forestal Nacional empleados en este estudio.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ARISTA M. 1995: The structure and dynamics of an *Abies pinsapo* forest in southern Spain. For. Ecol. Manage., 74, 81-89.
- ARISTA, M., HERRERA F.J. & TALAVERA S., 1997: Biología del pinsapo. Consejería de Medio Ambiente, Junta de Andalucía, Sevilla.
- AUSSENAC, G. 2002: Ecology and ecophysiology of circum-Mediterranean firs in the context of climatic change. Ann. For. Sci., 59 (8), 823-832.
- COSTA, M., MORLA, C. & SÁINZ, H. (Eds.) 1997: Los bosques ibéricos. Una interpretación geobotánica. Ed. Planeta.

- CUEVAS, J.M., GONZÁLEZ-ALONSO, F. & VÁZQUEZ, A. 2000a: Estimación de la superficie cubierta por las copas en los pinares de pino piñonero de Barbate (Cádiz) a partir de una imagen IRS-1C WiFS y los datos de campo del Segundo Inventario Forestal Nacional. *Revista de Teledetección*, 13: 51-58.
- CUEVAS, J.M., VÁZQUEZ, A. & GONZÁLEZ-ALONSO, F. 2000b: Análisis de la utilidad de la información WiFS del satélite indio IRS-1C para el Inventario Forestal Nacional de España. *Ecología*, 14: 169-179.
- DGCONA 1998: Segundo Inventario Forestal Nacional, 1986-1996, España. Madrid.
- ICONA 1990: Segundo Inventario Forestal Nacional. Explicaciones y métodos. Madrid.
- IRS-1C Satellite 2002: <http://www.csre.iitb.ac.in/isro/irs-1c.html>
- KASTURIRANGAN, K., ARAVAMUDAN R., DEEKSHATULU B.L., & GEORGE J. 1996: Indian Remote Sensing satellite IRS-1C—the beginning of a new era. *Current Science*, 70(7): 495-500.
- MALLINIS G., KOUTSIAS N., MAKRAS A., KARTERIS M., 2004: Forest parameters estimation in a European mediterranean landscape using remotely sensed data. *Forest Science*, 50(4), 450-460.
- NEVA, J.C. 1994: Evaluación de la gestión y manejo de las masas de *Abies pinsapo* en el Parque Natural de la Sierra de Grazalema. En: *Gestión y conservación de los pinsapares andaluces*, Monografías Forestales Andaluzas, 1, 41-46. Ed. Asociación Forestal Andaluza.
- OJEDA, J., MOREIRA, J. M., SARTORI, G., DESBARRES, A. 1986: Las imágenes Landsat/TM en la caracterización de suelos, vegetación y unidades paisajísticas. I Reunión Científica del Grupo de Trabajo en Teledetección, 271-288, Barcelona.
- RAHMANN, M. M., CSPLOVICS, E., KOCH, B. 2005: An efficient regression strategy for extracting forest biomass from satellite sensor data. *International Journal of Remote Sensing*, Vol. 26, No. 7, 1511-1519.
- ROY P. S., JOSHI P. K., 2002: Forest cover assessment in north-east India—the potential of temporal wide swath satellite sensor data (IRS-1C WiFS). *International Journal of Remote Sensing*, Vol. 23, No. 22, 4881-4896.
- RUIZ de la TORRE, J. 1994: Los pinsapares andaluces. En: *Gestión y conservación de los pinsapares andaluces*, Monografías Forestales Andaluzas, 1, 11-25. Ed. Asociación Forestal Andaluza.
- TOMPPO, E., NILSSON, M., ROSENGREN, M., AALTO P., KENNEDY, P. 2002: Simultaneous use of Landsat TM and IRS-1C WiFS data in estimating large area tree stem volume and above-ground biomass. *Remote Sensing of Environment*, 82: 156-171.
- TUCKER, C.J. 1979: Red and photographic infrared linear combinations for monitoring vegetation. *Remote Sensing of Environment*, 8: 127-150.
- VV.AA. 1994: *Gestión y conservación de los pinsapares andaluces*. Monografías Forestales Andaluzas, 1, Ed. Asociación Forestal Andaluza.