

Clasificación de la vegetación en un monte alcornocal mediante imágenes Ikonos

F. Cano¹, R.M. Navarro² y A. García-Ferrer³

¹ AURENSA (fcano@aurensa.es). ² Departamento de Ingeniería Forestal-UCO (irInacer@uco.es)

³ Departamento de Ingeniería Gráfica-UCO

RESUMEN

Se ha realizado una clasificación supervisada de la vegetación existente en un monte alcornocal (San Roque-Cádiz), a partir de dos imágenes Ikonos Geo, una imagen pancromática y otra imagen multiespectral.

La aplicación de este sensor a la clasificación supervisada de vegetación mediterránea, en el caso de monte alcornocal, permite destacar el alto valor obtenido tanto para la fiabilidad global (87,14 %) como para el Índice Kappa (0,8512). El análisis visual de la imagen permite diferenciar fácilmente las categorías *Matorral*, *Alcornocal* y *Pinar*, pero las fiabilidades obtenidas para estas clases no superan por término medio el 80 %. A pesar de la mejora en la resolución espacial que supone el satélite Ikonos, siguen presentándose problemas de *píxeles de mezcla* en la imagen. Es necesario abordar estudios de clasificación más profundos utilizando imágenes del sensor Ikonos, con la idea de superar las limitaciones que presenta la clasificación por píxel. En este punto la información de texturas en la imagen o la clasificación orientada a objetos, parecen perfilarse como soluciones idóneas.

PALABRAS CLAVE: seca de *Quercus*, clasificación supervisada, Ikonos-Geo.

ABSTRACT

A supervised classification of vegetation of a cork oak woodland (San Roque-Cádiz), has been realised from two Ikonos Geo images, one panchromatic and the other multi-spectral.

The application of this sensor for the supervised classification of cork oak woodland, allows the emphasis of the highest value obtained as much for the global reliability (87.14%) as for the Kappa Index (0.8512). The visual analysis of the image permits easy differentiation of the categories scrubland, cork oak woodland and pine forest, but reliabilities for these classes do not exceed on average 80%. Despite the improvement in spatial resolution supposed by the Ikonos satellite, problems of mixed pixels in the image continue to appear. It is necessary to tackle classification studies more deeply using Ikonos sensor images, with the idea of overcoming the limitations that classification by pixel presents. For this, texture information or classification orientated to objects, look to be ideal solutions.

KEY WORDS: decline of *Quercus*, supervised classification, Ikonos-Geo.

INTRODUCCIÓN

La teledetección es una técnica cada vez más aplicada para los estudios de vegetación al reducir el coste y el tiempo invertido en la interpretación de cubiertas forestales (Casanova *et al*, 1999). Así por ejemplo, son muchos los estudios que revelan la utilidad de imágenes Landsat en el seguimiento de la dinámica forestal (Nemani *et al*, 1993, Varjo, 1995), tasas e índices de deforestación, caracterización de coberturas vegetales, áreas incendiadas, patrones de regeneración forestal o dinámica de cuencas (Lucas *et al*, 1993; Chuvieco, 1996; Apan, 1997).

Los ecosistemas formados por vegetación dispersa, típica de algunas formaciones mediterráneas como la dehesa y el monte alcornocal, presentan varios estratos que se combinan de forma irregular. La densidad del arbolado dificulta el uso de la teledetección en estos paisajes, dada la baja coberturas de la vegetación y la influencia del suelo en la respuesta espectral. Algunas propuestas para el estudio de este tipo de cubiertas se han basado en índices modificados como el índice SAVI (Huete, 1988) y modificaciones posteriores (Baret y Guyot, 1991; Qi *et al*, 1994), aunque su aplicación en zonas semiáridas de vegetación natural no ha sido tan satisfactoria (McGwire *et al*, 2000). La mayor parte

de estos trabajos se han realizado con sensores de baja resolución espacial (MSS, TM Landsat, NOAA). El desarrollo tecnológico ofrece al mercado nuevas fuentes de información del territorio, como el sensor Ikonos y las ortofotografías digitales que pueden ser aplicadas al ámbito forestal. En la actualidad los nuevos sensores remotos de alta resolución, como los montados en el SPOT 4 recientemente lanzados con resolución espacial de 20 m en multiespectral y 10 m en pancromática o Ikonos de hasta 1 m en pancromático y 4 m en multiespectral, permitirán vencer las limitaciones que ahora los hacen sólo parcialmente útiles en el campo de la inventariación a escala de terreno. El inventario forestal mediante teledetección, utilizando estos sensores de alta resolución, puede ser una de las líneas de futuro en la inventariación de superficies forestales con baja densidad de arbolado, como es el caso de la dehesa.

El objetivo general de este trabajo es estudiar la utilidad de las imágenes del sensor Ikonos en la evaluación de cubiertas vegetales en un monte alcornoal de la provincia de Cádiz.

MATERIAL Y MÉTODOS

Descripción del área de trabajo

El monte "La Alcaldesa" se encuentra situado dentro de los límites de los términos municipales de Castellar de la Frontera y San Roque (Cádiz) (Figura 1). La extensión total del monte es de 1.302,6 ha, correspondiendo a la hoja 1075 escala 1:50.000 del Servicio Geográfico del Ejército, serie L y a las hojas 2-1, 2-2 y 3-3 del Mapa Topográfico de Andalucía a escala 1:10.000.



Figura 1. Mapa de localización. Vista parcial de la hoja 1075 (1:50.000) del Servicio Geográfico del Ejército.

La altitud no es excesivamente elevada, las cotas oscilan entre los 70 m y los 250 m de la Sierra del Arca. El relieve es, en general, poco pronunciado, las menores pendientes se encuentran en la parte noroccidental, y no superan el 10%; y los mayores superan el 30%. La clase fitoclimática a la cual pertenece la zona en estudio, se corresponde con el grupo IV₂ 4, que se identifica con el clima mediterráneo genuino. Desde el punto de vista edafológico el tipo de suelo predominante para la finca es el fersialítico pardo sobre materiales silíceos sin presencia de caliza, en los que se asientan preferentemente los alcornoques. Se ubican en zonas de moderada o poca pendiente. Se tratan de suelos evolucionados con tres horizontes, A;B;C, con presencia de arcilla en el horizonte intermedio, lo que permite caracterizarlo como B_w. En los fondos de valles llegan a aparecer algunos suelos ácidos con horizonte B_t, en los que tiende a predominar el quejigal. Aparecen también vertisoles litomorfos, formados sobre arcillas y margas, "bujeos", poco permeables y con abundancia de arcilla.

La vegetación natural dominante corresponde a la Serie termomediterránea gaditana húmedo de *Quercus suber* L. o alcornoque, apareciendo en el arbustivo y subarbustivo *Teucrium baeticum* Boiss. & Reuter, *Arbutus unedo* L. y *Phillyrea angustifolia* L. entre otros. En las zonas más cálidas aparece la Serie termomediterránea bético-gaditana subhúmedo-húmeda verticícola de *Olea europaea* L. var. *sylvestris* (Miller) Lehr. o acebuche, apareciendo como acompañantes coscoja (*Quercus coccifera* L.), espino negro (*Rhamnus oleoides* L.), palmito (*Chamaerops humilis* L.).

Imagen Ikonos y procesado previo

La elaboración de este estudio se ha hecho a partir de dos imágenes Ikonos Geo, una imagen pancromática y otra imagen multiespectral. Ambas recubren exactamente la misma porción de territorio de 11 x 11 Km y han sido tomadas en el mismo instante. Dichas imágenes fueron captadas el 2 de octubre del año 2000 a las 11:10 con un ángulo de elevación en la adquisición de 65.39091°. La finca objeto de interés en este estudio queda totalmente cubierta en ambas imágenes. A partir de las 2 imágenes originales disponibles se optó por realizar un corte de ambas para limitar la extensión al área de estudio, facilitando así el tratamiento digital posterior de los ficheros de la imagen y mejorando la

velocidad de procesamiento. La cobertura de estas imágenes cortadas recogen un cuadro de aproximadamente 5 x 5 Km que engloba completamente la zona a estudiar.

Dada la existencia de estudios anteriores que apuntan sobre la mejora en las posibilidades de explotación de imágenes fusionadas a distinta resolución espacial (Shettigara, 1989; Conese *et al*, 1992; Chavez *et al*, 1991; Grasso, 1993) se realizó la fusión entre la imagen compuesta por las 4 bandas multiespectrales de resolución espacial de 4 m con la imagen de la banda pancromática de 1 m. El algoritmo usado en la fusión de estas imágenes ha sido el PCA (Principal Components Analysis) sobre el que se han desarrollado numerosos estudios (Chavez *et al*, 1991, Conese *et al*, 1992).

El proceso de fusión de imágenes se realizó a través de un modelo desarrollado en ERDAS Imagine (Figura 2). Esta fusión crea una imagen de salida con las características espectrales de la imagen MSI y con la resolución espacial aportada por la banda PAN.

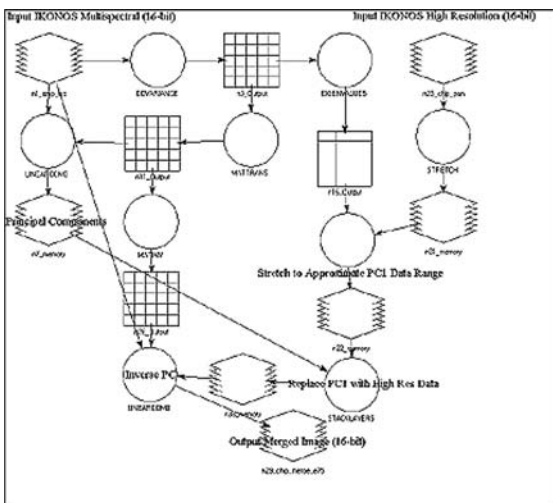


Figura 2. Esquema de las fases que siguen las imágenes cuando se ejecuta el modelo sobre el programa ERDAS.

Esta imagen ha sido rectificada geoméricamente con el módulo *Geometric Correction* de ERDAS 8.3, empleando como matriz de transformación una ecuación polinomial no lineal. Este tipo de proceso en la corrección de la imagen no permite introducir información orográfica a partir de un modelo digital de elevaciones, con lo que el nivel de precisión conseguida en la imagen fusionada es función del relieve de la zona que se considere.

Las dos imágenes disponibles para este estudio, poseen una corrección geométrica estándar, con lo

que teóricamente la precisión geométrica que presentan es de 50 m de Error Circular para una fiabilidad del 90%. En el caso concreto de las imágenes con las que se está trabajando este error aumenta considerablemente por dos razones:

- La orografía del terreno.-En nuestro caso para la zona de interés, de aproximadamente 5 x 5 Km, la cota del terreno fluctúa entre los 70 m en la zona Suroeste y los 240 m en la Sierra del Arca.
- El ángulo de toma del sensor, que en este caso es de 65.39091°.

La información de partida para llevar a cabo el proceso de ortorrectificación de una imagen es la siguiente: Orientación interior de la cámara, Imagen digital y Modelo digital de elevaciones y Puntos de control (o de apoyo). Para el caso concreto de Ikonos la información sobre los parámetros del sensor no se encuentra liberalizada. Sin esta información no es posible simular, con la mayoría de los programas de tratamiento de imágenes, el modelo geométrico del instante de toma de la imagen necesario para generar la ortoimagen.

Así, para la generación de la ortoimagen Ikonos se recurrió al programa informático *PCI Geomatics*, el cual incorpora un módulo específico para generar ortoimágenes a partir de imágenes Ikonos Geo. Este módulo denominado *OrthoEngine Ikonos Orthorectificacion* lleva implementado un modelo paramétrico que se basa en información incluida en los metadatos y en el fichero imagen. Ha sido desarrollado por el CCRS (Canada Centre for Remote Sensing) perteneciente al Natural Resources Canada. Este modelo tiene en cuenta los principios de la Fotogrametría, Geodesia y Cartografía además de los relativos a la órbita del satélite simulando la geometría de toma de la imagen en el momento de la adquisición y corrigiendo la distorsiones debidas al sensor, la plataforma, la Tierra y la proyección cartográfica (Toutin y Cheng, 2000).

Se han utilizado en este proceso 11 puntos de control cuyas coordenadas se miden sobre la fuente disponible de mayor precisión, esto es la ortofoto en formato digital de SIG Oleícola. El modelo digital de elevaciones requerido a su vez en el proceso de ortorrectificación se generó también dentro de este programa a partir de las curvas de nivel digitalizadas previamente sobre el Mapa Topográfico de Andalucía escala 1:10.000.

El Error Medio Cuadrático (RMS) con el que se lleva a cabo este proceso de ortorrectificación de la imagen es presentado por el programa antes de

comenzar la transferencia de los ND a su posición corregida, siendo en nuestro caso el RMS Total de 3.85 m, el RMS en X igual a 3.74 y el correspondiente al eje Y igual a 0.38 m. El grado de ajuste de la imagen ortorrectificada con respecto a la cartografía básica de referencia para el área de estudio (Mapa Topográfico de Andalucía escala 1:10.000) puede apreciarse en la Figura 3.

Debido a problemas externos solo se pudo ortorrectificar con fiabilidad la banda pancromática de Ikonos, procediéndose posteriormente a realizar una rectificación de las bandas multiespectrales en la que no se utiliza información de elevaciones del terreno. En la rectificación de la imagen multiespectral se utilizó el módulo *Geometric Correction* de ERDAS, introduciendo 42 puntos de control cuyas coordenadas de referencia proceden también de la ortofotografía del SIG Oleícola. El nivel de ajuste entre la imagen pancromática ortorrectificada y la imagen multiespectral rectificada varía en función del relieve existente cada zona.

Estudio de campo

La “verdad terreno” está representada por el resultado de un inventario forestal sistemático realizado por la Consejería de Medio Ambiente (julio-agosto de 2000), y de la fotointerpretación de la propia imagen Ikonos fusión. Esta información junto con el análisis visual se consigue con este tipo de imágenes. La información procedente del inventario se ha integrado en un SIG como cobertura vectorial de puntos en formato shape de ArcView 3.2, quedando toda la información recogida en los estadillos de campo en forma de datos con una componente espacial, lo que permite superponer y analizar esta con capas raster en las posteriores fases de este proyecto.

Clasificación supervisada de la imagen

La imagen de partida que se usó en este tipo de clasificación fue la imagen multiespectral de 4 m sin corregir geoméricamente con la idea de alterar, lo menos posible, los valores de los Niveles Digitales (ND) originales tomados por el sensor. La existencia de un trabajo de campo previo en la zona de estudio, de fecha próxima a la de la toma de la imagen, justifica la elección de la clasificación supervisada.

A partir de la información procedente del trabajo de campo se ha elaborado una leyenda que recoge las categorías principales observadas (Tabla 1).

Clase de cobertura	Parcelas entrenamiento	
	Nº píxeles	Nº de recintos
Alcornocal	938	165
Pinar	958	194
Matorral	1.235	19
Vegetación de arroyo	192	25
Pastizal	14.843	18
Superficie con escasa vegetación	1271	18
Masas de agua	681	3
Sombra	443	156
Total	20.561	598

Tabla 1. Leyenda de trabajo para la clasificación supervisada de la imagen junto con el número de recintos y píxeles de entrenamiento seleccionados.

Las condiciones de toma de la imagen (ángulos de elevación solar y del sensor) y la estructura propia de la masa, dan como resultado que la imagen contenga un enorme número de píxeles que recogen sombras de árboles individuales. A ello hay que añadirle un número aún mayor de píxeles de “mezcla”. Cuanto mayor es el detalle registrado en la imagen, mayor será también su sensibilidad para detectar las variaciones internas de una categoría. A mayor heterogeneidad, mayor riesgo de confusiones en la asignación posterior y un incremento en la resolución espacial puede complicar la clasificación digital (Chuvieco, 1996).

En los píxeles de “mezcla” el valor del Nivel Digital no se corresponde a la respuesta de una única cubierta sino a dos o más. Como ejemplo más frecuente en la imagen aparecen los píxeles de mezcla entre la respuesta radiométrica de copa de un pie, la sombra que este proyecta y el suelo.

Así, se hace necesario seleccionar como áreas de entrenamiento píxeles lo más puros posibles para cada una de las categorías de leyenda. Esta fase se lleva a cabo mediante interpretación visual de la imagen. La sombra será considerada como una categoría más de la leyenda evitando así que sea asignada erróneamente a otras categorías. Las categorías alcornocal y pinar se crean mediante delimitación de árboles individuales para cada una de estas categorías. De esta forma se definen firmas espectrales para estas especies y no para masas continuas (que incluirían píxeles correspondientes a sombras, pastizal, etc).



Figura 3a. Superposición de la imagen Ikonos Geo pancromática con el Mapa Topográfico de Andalucía escala 1:10.000. En esta figura puede observarse el grado de desajuste geométrico entre ambas coberturas. Escala de la figura 1:5.000.



Figura 3b. Superposición de la imagen Ikonos pancromática ortorrectificada con el Mapa Topográfico de Andalucía escala 1:10.000. El nivel de precisión geométrica logrado se considera aceptable para la metodología que se sigue en este proyecto. Escala de la figura 1:5.000

Una vez llegados a este punto se procede a realizar una clasificación supervisada de la imagen por análisis del conjunto de sus bandas 1, 2, 3, 4. Como capa adicional se generó la banda de textura de la banda infrarroja (para una ventana de 3x3) mediante la opción texture de ERDAS. La clasificación supervisada de la imagen se ha realizado mediante el algoritmo de Máxima Probabilidad. Se ha realizado el análisis de separabilidad y la matriz de contingencia.

El proceso de clasificación terminó con la elaboración de la cartografía temática correspondiente a la finca La Alcaidesa y su correspondiente validación. Se aplicó la imagen temática resultado de la clasificación, un filtro de mayoría mediante una ventana móvil de 3x3, reasignándose los píxeles aislados o poco representativos a las categorías adyacentes.

La validación de la clasificación se ha realizado siguiendo el criterio propuesto por Chuvieco (1996). Así, se recomienda un mínimo de 50 píxeles por cada clase temática para obtener una estimación fiable del error, criterio que ha sido seguido en este trabajo excepto para las categorías *Masa de agua* y *Vegetación de arroyo* dada su reducida representación en la imagen. La localización de los píxeles de validación se llevó a cabo a partir de la "verdad terreno" así como del análisis visual de la propia imagen. Para este análisis visual se empleó, como imagen adicional, la imagen Ikonos fusionada y georreferenciada.

RESULTADOS

Los resultados correspondientes a la clasificación supervisada de coberturas quedan recogidos en la Figura 4 y la Tabla 2. A partir de los mismos, se observa en la zona de estudio un predominio de la categoría *Matorral* con un 22% de la superficie total, seguido de *Alcornocal* y *Pinar*.

Respecto a la caracterización espectral de las clases consideradas y a la vista de los valores medios y desviación estándar obtenidos de las parcelas de entrenamiento (Tabla 3), deben destacarse los siguientes aspectos:

- Las clases correspondientes a vegetación forestal (*Alcornocal*, *Pinar*, *Matorral* y *Vegetación de arroyo*) presentan un comportamiento, respecto a su signatura espectral, muy similar para el conjunto de bandas consideradas. Este hecho era de esperar a la vista de la matriz de contingencia.

- La categoría *Pinar* alcanza un máximo sobre el resto de categorías de vegetación en la banda 2 (Verde) correspondiente con el rango 0.52 - 0.60 μm del espectro. Esta es la razón del color típico que presentan las coníferas en el análisis visual de la imagen.
- Aparentemente no se prevén excesivas confusiones entre las clases *Pastizal*, *Superficie con escasa vegetación*, *Sombras* y *Masas de agua*; ya que presentan un comportamiento espectral característico, para la combinación de bandas consideradas.
- A pesar de la tendencia común de las clases para la banda de textura del infrarrojo cercano, se observa para la clase *Matorral* un valor relativamente bajo y separado del resto de categorías de vegetación.

La matriz de contingencia obtenida en la clasificación presenta una proporción de píxeles correctamente asignados respecto al total (diagonal principal de la matriz) bastante elevado. Las clases correspondientes a coberturas de vegetación forestal son las que presentan mayores problemas de asignación sobre los píxeles de las parcelas de entrenamiento, siendo el porcentaje de asignación más bajo el correspondiente con la categoría *Vegetación de arroyo* con un 56%, seguido de la de *Pinar* con un 72% (Tabla 3). Para las categorías *Pastizal*, *Superficie con escasa vegetación*, *Masa de agua* y *Sombra* los porcentajes recogidos como de asignación correcta están en torno al 98% de lo que se deduce que para estos casos no se deben presentar excesivos problemas en la clasificación.

La matriz de confusión creada en la validación (Tabla 4) recoge las categorías *Pastizal*, *Superficie con escasa vegetación*, *Masas de agua* y *Sombra* como de asignación totalmente correcta para la clasificación realizada (todos los valores están concentrados en la diagonal principal para estas clases). En consecuencia tanto la exactitud del productor como del usuario, así como el Índice Kappa para estas clases son óptimos (Tabla 5). A la vista de la matriz de contingencia y el comportamiento de las signaturas espectrales en el conjunto de las bandas consideradas, la fiabilidad más baja se produce para la categoría *Vegetación de arroyo* que presenta una exactitud del usuario de tan solo un 32%, es decir el error de comisión de esta categoría es medio-alto (hay bastantes píxeles asignados a esta categoría que realmente no lo son). Las mayores confusiones se producen por asignación de píxeles a *Vegetación*

de arroyo mientras que en la “verdad terreno” se comprueba que pertenecen realmente a la categoría *Alcornocal* y en menor medida a *Matorral* y *Pinar*. Por otro lado la fiabilidad del productor es bastante alta, con un 80% lo que me indica que 8 de cada 10 píxeles pertenecientes a esta cubierta fueron discriminadas adecuadamente en la clasificación. El Índice Kappa obtenido para esta categoría es de 0,3 lo que indica que la clasificación realizada para *Vegetación de arroyo* es sólo un 30% mejor que la esperada al azar. Como causas posibles a esta baja

discriminación de la *Vegetación de arroyo*, sobre todo frente a *Alcornocal*, se apunta una incorrecta delimitación de las áreas de entrenamiento por la propia heterogeneidad de especies a lo largo del arroyo, situándose en algunos casos pies de alcornoque dentro del propio cauce.

Para el resto de categorías de la leyenda de trabajo, la fiabilidad obtenida se puede considerar buena, ya que tanto la exactitud del productor como del usuario están por encima del 70%, consiguiéndose una fiabilidad global para el conjunto de todas las clases del 87,14%. Además el Índice Kappa total es del 0,8512 lo que indica que la fiabilidad obtenida es notablemente superior a la esperada al azar.



*Figura 4. Resultado de la clasificación supervisada de coberturas de vegetación a partir de la composición de bandas 1, 2, 3, 4, textura de la banda 4. Escala de representación de la figura 1: 60.000.

Clase de cobertura		Superficie	
		ha	(%)
1	Alcornocal	226,36	17,47
2	Pinar	210,25	16,22
3	Matorral	293,83	22,67
4	Vegetación arroyo	4,94	0,38
5	Pastizal	181,03	13,97
6	Superficie con escasa vegetación. (Caminos, cortafuegos, roquedos).	206,63	15,94
7	Masas de agua	1,34	0,10
8	Sombra	171,53	13,24
Superficie Total		1295,95	100,00

Tabla 2. Superficie de cada una de las categorías de la leyenda establecidos mediante el método supervisado sobre la imagen de bandas 1, 2, 3, 4, textura de la banda 4.

Banda	Alcorn.		Pin.		Mat.		Veg. arr	
	Media	Desv. Est.	Media	Desv. Est.	Media	Desv. Est.	Media	Desv. Est.
1	108.453	24.919	146.667	39.243	117.510	28.539	111.599	21.729
2	210.221	42.711	373.023	81.683	255.138	57.213	259.870	70.999
3	189.225	31.798	255.248	72.964	220.833	54.702	203.698	45.424
4	1253.042	118.513	1182.739	100.170	1092.169	147.545	1394.797	78.884
Tex. B4	239.082	106.822	234.411	138.847	89.887	42.115	225.844	101.735

Banda	Past.		S. e. v.		M. ag.		Somb.	
	Media	Desv. Est.	Media	Desv. Est.	Media	Desv. Est.	Media	Desv. Est.
1	743.713	153.267	944.938	207.332	929.595	436.216	63.147	25.984
2	839.193	143.331	1190.617	193.299	1149.598	509.490	103.036	39.057
3	915.608	135.854	1291.442	173.405	1000.436	458.104	110.190	43.164
4	851.247	155.876	1293.135	172.593	248.614	79.828	256.456	102.332
tex. B4	47.917	24.460	103.228	77.541	19.261	34.763	353.023	84.426

Leyenda: 1.- Alcorn.: Alcornocal, 2.- Pin.: Pinar, 3.- Mat.: Matorral, 4.- Veg. arr.: Vegetación arroyo, 5.- Past.: Pastizal, 6.- S.e.v.: Superficie con escasa vegetación, 7.- M. ag.: Masa de agua, 8.- Somb.: Sombras.

Tabla 3. Caracterización espectral de las parcelas de entrenamiento para las clases de cobertura de interés por sus valores medios de ND y las desviaciones estándar.

Todas las figuras precedidas de asterisco se incluyen en el cuadernillo anexo de color

Datos clasif.	Datos de referencia								
	Alcorn.	Pin.	Mat.	Veg. arr	Past.	S. e. v.	M. ag.	Somb.	Total
Alcorn.	812	102	143	79	0	0	0	0	1136
Pin.	25	698	34	3	1	0	0	0	761
Mat.	28	119	1030	2	1	0	0	0	1180
Veg. Arr	73	39	28	108	0	0	0	0	248
Past.	0	0	0	0	14517	24	0	0	14541
S. e. v.	0	0	0	0	324	1247	0	0	1571
M. ag.	0	0	0	0	0	0	678	3	681
Somb.	0	0	0	0	0	0	3	440	443
Total	938	958	1235	192	14843	1271	681	443	20561

Legenda: 1.- **Alcorn.:** Alcornocal, 2.- **Pin.:** Pinar, 3.- **Mat.:** Matorral, 4.- **Veg. arr.:** Vegetación arroyo, 5.- **Past.:** Pastizal, 6.- **S.e.v.:** Superficie con escasa vegetación, 7.- **M. ag.:** Masa de agua, 8.- **Somb.:** Sombras.

Tabla 4. Matriz de contingencia de la clasificación supervisada de coberturas de vegetación sobre la imagen Ikonos. Bandas empleadas en la clasificación 1, 2, 3, 4, textura de la banda 4.

Datos clasif.	Datos de referencia								
	Alcorn.	Pin.	Mat.	Veg. arr	Past.	S. e. v.	M. ag.	Somb.	Total
Alcorn.	46	0	2	2	0	0	0	0	50
Pin.	6	38	6	0	0	0	0	0	50
Mat.	1	11	38	0	0	0	0	0	50
Veg. Arr	10	3	4	8	0	0	0	0	25
Past.	0	0	0	0	50	0	0	0	50
S. e. v.	0	0	0	0	0	50	0	0	50
M. ag.	0	0	0	0	0	0	25	0	25
Somb.	0	0	0	0	0	0	0	50	50
Total	63	52	50	10	50	50	25	50	350

Tabla 5. Matriz de confusión de la clasificación supervisada de coberturas de vegetación sobre la imagen Ikonos. Bandas empleadas en la clasificación 1, 2, 3, 4, textura de la banda 4.

DISCUSIÓN

El nivel tecnológico actual ha posibilitado la puesta a punto de nuevas técnicas para la obtención de datos de mayor detalle de la superficie terrestre hasta llegar a los satélites de alta resolución como es el caso del satélite Ikonos o del QuickBird, de 1 y 0.60 metros de resolución espacial, respectivamente. Son muy recientes los estudios que sobre clasificación digital de imágenes de satélite Ikonos se han desarrollado (Blaschke *et al*, 2000).

La aplicación de este sensor a la clasificación supervisada de vegetación mediterránea, en el caso de monte alcornocal, permite destacar el alto valor obtenido tanto para la fiabilidad global (87,14%)

como para el Índice Kappa (0,8512). Hasta el momento no se han encontrado en bibliografía estudios de clasificación de imágenes Ikonos en ambientes forestales mediterráneos. En otros contextos ecológicos, sin embargo, los resultados son similares a los obtenidos en recientes investigaciones sobre la utilidad de distintos tipos de clasificación digital de imágenes Ikonos, entre los que cabe destacar el trabajo de Sande (2001). Este autor obtiene una fiabilidad global del 74% y un Índice Kappa del 0.70% utilizando 17 categorías de vegetación, sin considerar distintos tipos de especies vegetales, en una zona residencial del sur de Holanda.

El análisis visual de la imagen permite diferenciar fácilmente las categorías *Matorral*, *Alcornocal*

Clase	Píxeles referencia	Fiabilidad Global		Índice Kappa por clases		
		Píxeles clasificados	Número correcto	Exactitud del Producto	Exactitud del Usuario	Índice Kappa
Alcorn.	63	50	46	73.02%	92.00%	0.9024
Pin.	52	50	38	73.08%	76.00%	0.7181
Mat.	50	50	38	76.00%	76.00%	0.7200
Veg. Arr	10	25	8	80.00%	32.00%	0.3000
Past.	50	50	50	100.00%	100.00%	1.0000
S. e. v.	50	50	50	100.00%	100.00%	1.0000
M. ag.	25	25	25	100.00%	100.00%	1.0000
Somb.	50	50	50	100.00%	100.00%	1.0000
Total	350	350	305	—	—	

Fiabilidad global general = 87.14%
Índice Kappa Total = 0.8512

Legenda: 1.- **Alcorn.:** Alcornocal, 2.- **Pin.:** Pinar, 3.- **Mat.:** Matorral, 4.- **Veg. arr.:** Vegetación arroyo, 5.- **Past.:** Pastizal, 6.- **S.e.v.:** Superficie con escasa vegetación, 7.- **M. ag.:** Masa de agua, 8.- **Somb.:** Sombras.

Tabla 6. Fiabilidad Global e Índices Kappa para cada clase considerada en la clasificación supervisada de la imagen.

y *Pinar*, pero las fiabilidades obtenidas para estas clases no superan por término medio el 80%. Esta facilidad de discriminación en el proceso de fotointerpretación se basa en el reconocimiento de diferencias en tono e intensidad pero, sobre todo, en textura. Según Lillesand y Kiefer (1987) la textura es un criterio clave para interpretar información sobre la distribución de la vegetación forestal, criterio que se hace potencialmente útil gracias a los nuevos sensores de alta resolución espacial (Green, 2000). En la metodología seguida en este trabajo, la información de textura se introduce a través de una banda adicional que mide la variabilidad sobre una ventana de 3x3, generada a partir de la banda infrarroja (banda 4) de la imagen. Franklin *et al.* (2001), utilizando una imagen Ikonos pancromática, combinan en varios ensayos diferentes algoritmos para definir la textura con distintos tamaños de ventana, obteniendo la mayor separación entre clases de edad en masas homogéneas de pino Douglas, con una ventana de 25x25. Aunque la zona de estudio en este trabajo no presenta la homogeneidad estructural de las masas consideradas en este ensayo, sus resultados apuntan hacia una posible mejora en la clasificación a través de información específica de textura.

Así se cuestionan dos aspectos importantes en la clasificación digital de imágenes de alta resolución espacial:

- La clasificación “tradicional” *por píxel* llevada a cabo en este trabajo, presenta la limitación de considerar como la mínima unidad de

asignación el píxel, prescindiendo de las relaciones de proximidad o de vecindad dentro del grupo de píxeles que le rodean. De esta manera los resultados de la clasificación presentan el efecto de “sal y pimienta”, según el cual los píxeles individuales son clasificados a categorías diferentes que los del área que le rodea, con lo que no se generan regiones homogéneas en la imagen clasificada. En este punto, la única forma posible de suavizar la cartografía temática obtenida, creando recintos homogéneos, es a través del uso de filtros, pero presentan el inconveniente de no tener en cuenta la información original presente en la imagen de partida. Blaschke *et al.* (2001) realizan un estudio sobre las mejoras que ofrece la *clasificación orientada a objetos* frente a clasificación *por píxel*. La *clasificación orientada a objetos*, en una primera fase, delimita regiones homogéneas en la imagen en función de la información de contexto (objetos presentes en la imagen), para posteriormente aplicar las reglas de clasificación a los objetos definidos. La incorporación al mercado de los nuevos satélites de alta resolución espacial están potenciando el interés de la comunidad científica de estos nuevos clasificadores.

- A pesar de la mejora en la resolución espacial que supone el satélite Ikonos, siguen presentándose problemas de *píxeles de mezcla* en la imagen, acentuándose en situaciones donde la

frecuencia de variación sobre el terreno de las coberturas del suelo, es del mismo tamaño que la resolución espacial de la imagen (Aplin y Atkinson, 2001). Este fenómeno se produce en la finca de estudio debido a que la densidad de pies presentes no origina una cobertura continua de copas, alternándose píxeles que recogen reflectividad de copas con los que lo hacen de suelo desnudo o pastizal. Cracknell (1998) plantea la presencia de píxeles de mezcla en la imagen como una limitación para la clasificación *por píxel*, por la pérdida de información que origina al confundirse en único ND del píxel varias cubiertas. Esta limitación puede ser superada mediante una “*Soft classification*” que es capaz de predecir la proporción que ocupa en cada píxel cada clase (Foody, 1996).

Recientemente se han desarrollado potentes programas específicamente creados para la clasificación digital de imágenes de alta resolución espacial como Ikonos. Es el caso del programa *eCognition* que se basa en el concepto de gran parte de la información semántica necesaria la interpretación de una imagen no está contenida en el píxel, sino en el conjunto de objetos de la imagen que la conforman y en sus relaciones espaciales (de proximidad, interrelación, etc.).

Como conclusión de este trabajo puede decirse que mediante clasificación por píxel utilizando el algoritmo de máxima probabilidad, se consigue generar una cartografía temática con una buena fiabilidad global (87,14%), discriminándose en el área de estudio siete categorías de interés para este trabajo. La clasificación por píxel presenta limitaciones debido al gran número de píxeles de mezcla que recoge la imagen Ikonos. Es necesario abordar estudios de clasificación más profundos utilizando imágenes del sensor Ikonos, con la idea de superar las limitaciones que presenta la clasificación por píxel. En este punto la información de texturas en la imagen o la clasificación orientada a reconocer “objetos”, parecen perfilarse como soluciones idóneas.

BIBLIOGRAFIA

APAN, A.A. 1997. Land cover mapping for tropical forest rehabilitation planning using remotely sensed data. *International Journal of Remote Sensing*. 18: 1029-1049.

APLIN, P. and ATKINSON, P.M. 2001. Sub-pixel land cover mapping for per-field classification. *International Journal of Remote Sensing*. 22: 2853-2858.

BARET, F. and GUYOT, G. 1991. Potentials and limits of vegetation indices for LAI or APAR assessment. *Remote Sens. Environ.* 35: 161-173.

BLASCHKE, T. LANG, S. LORUP, E. STROBL, J. ZEIL, P. 2001. ZGIS. Department of Geography and Geoinformation. University of Salzburg.

CASANOVA, J.L. and LOUAKFAOUI, E.M., 1999. Un índice de vegetación para el seguimiento por satélite de la masa forestal. En: *Avances y Aplicaciones*. Servicio de Publicaciones de la Diputación de Albacete.

CHAVEZ, P.S. SIDES, S.C. and ANDERSON, J.A. 1991. Comparison of three different methods to merge multiresolution and multispectral data: Landsat TM and SPOT panchromatic. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*. 57: 295-303.

CHUVIECO, E. 1996. *Fundamentos de Teledetección Espacial*. Rialp. Madrid, España.

CONESE, C. MASELLI, M. and FILIPPIS, T. 1992. A new method for the integration of Landsat TM and SPOT panchromatic data. *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing*. ISPRS Commission 3, 29 (Patr B3): 892-895.

CRACKNELL, A.P. 1998. Synergy in remote sensing- what's in a pixel?. *International Journal of Remote Sensing*. 19: 2025-2047.

ERDAS, 1997. The ERDAS Field Guide. Atlanta. USA. 656 pp.

FODDY, G.M. 1996. Approaches for the production and evaluation of fuzzy land cover classifications from remotely sensed data. *International Journal of Remote Sensing*. 17: 1317-1340.

FRANKLIN, S.E., WULDER, M.A. and GERYLO, G.R. 2001. Texture analysis of IKONOS panchromatic data for Douglas-fir forest age class separability in British Columbia. *International Journal of Remote Sensing*. 22: 2627-2632.

GRASSO, D.N. 1993. Applications of the IHS colour transformation for 1:24,000 scale geologic mapping: a low cost SPOT alternative. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*. 59: 73-80.

GREEN, K. 2000. Selecting and interpreting high-resolution images. *Journal of Forestry*. 98: 37-39.

HUETE, A.R. 1988 A Soil Adjusted Vegetation Index (SAVI). *Remote Sens. Environ.* 25: 295-309.

- LILLESAND, T.M. and KIEFER, R.W. 1987. Remote sensing and image interpretation. Wiley, New York.
- LUCAS, R.M. HONZAK, M. FOODY, G.M. CURRAN, P.J. and CORVERS, C. 1993. Characterizing tropical secondary forest using multitemporal Landsat sensor imagery. *International Journal of Remote Sensing*. 14: 3061-3067.
- McGWIRE, K. MINOR, T. and FENSTERMAKER, L. 2000. Hyperspectral mixture modelling for quantifying sparse vegetation cover in arid environments. *Remote Sens. Environ.* 72: 360-374.
- NEMANI, R. PIERCE, L. and RUNNING, S. 1993. Forest Ecosystem at the Watershed Scale: Sensitivity to Remotely sensed Leaf Area Index Estimated. *International Journal of Remote Sensing*. 14 (13): 2519-2534.
- QI, J., CHEHBOUNI, A. HUETE, R. and KERR, Y. 1994. Modified Soil Adjusted Vegetation Index (MSAVI). *Remote Sens. Environ.* 48: 119-126.
- SANDE, C. 2001. River flood damage assessment using Ikonos imagery. *Space Application Institute*. Canada.
- SHETTIGARA, K.V. 1989. A linear transformation technique for spatial enhancement of multispectral images using a higher resolution data set. *International Geosciences and Remote Sensing Symposium (IGARS) Digest*. 4: 2615-2618.
- TOUTIN, T and CHENG, P. 2000. Demystification of Ikonos. *EOM*. 9 (7): 17-21.
- VARJO, J. 1995. Forest change detection by satellite remote sensing in Eastern Finland. *EARSSEL Advances in Remote Sensing*. 4(3)XII.

