

MASTER OF SCIENCE EN OLIVICULTURA Y ELAIOTECNIA



TESIS DE MASTER

Estimación de Variables Biofísicas en Olivar mediante Métodos de Teledetección por Satélite y Sensores Aerotransportados para su Integración en Agricultura de Precisión

João da Gama Minas

DIRECTOR:

Dr. Pablo J. Zarco Tejada

Córdoba, Noviembre de 2005

Estimación de Variables Biofísicas en Olivar mediante Métodos de Teledetección por Satélite y Sensores Aerotransportados para su Integración en Agricultura de Precisión

Tesis de Master presentada para optar al título de Master en Olivicultura y Elaiotecnia por João da Gama Minas, bajo la dirección del Doctor Pablo J. Zarco Tejada.

Vº.Bº. del Director:

Alumno:

Dr. Pablo J. Zarco Tejada

João da Gama Minas

Córdoba, Noviembre de 2005

“La teledetección consiste en la adquisición, a distancia, de los datos físicos de un objeto, sin la necesidad de tocarlo”

(Lintz y Simonett, 1976)

A mis Padres

Agradecimientos

Deseo expresar mis más sinceros agradecimientos a todas aquellas personas que han hecho posible la realización de este trabajo:

a mi Director, Pablo J. Zarco Tejada, con quien ha sido un gran honor haber trabajado, por el tiempo que me ha dedicado, por su profesionalidad, rigor científico y por todo lo que me ha enseñado;

a M^a Auxiliadora Soriano, por los consejos y explicaciones que me ha dado ayudándome a resolver cualquier duda;

a Paula Martins, mi compañera en todo el momento, por la paciencia que ha tenido conmigo, por la gran compañía que me ha hecho, estando siempre ahí para ayudarme. Sin ti y tus buenos consejos, no habría sido posible realizar este trabajo, “Obrigado por tudo”;

a los compañeros que tuve el privilegio de conocer; Óscar, Guadalupe, Gabriel, Iñaki, Antonio, Fernando, Marga, Almudena, Simona por la amistad, por todo el apoyo que siempre me han dado, y las horas buenas que hemos pasados juntos;

a Manuel Muñoz, por la simpatía y ayuda técnica que me ha dado para ayudarme a resolver los problemas que he tenido con el ordenador;

a todos mis amigos del Master, en especial a Paula, Jacobo, José, Francisco, Nazaret, Conchi, Jesús, Sergio y Hicran por tantos y buenos momentos que hemos pasados juntos;

Mí mayor agradecimiento es para mis padres, Ilda y Agnelo, por su gran esfuerzo, dedicación, comprensión, y total apoyo que me han dado a lo largo de mi estancia en Córdoba. A mis hermanos, Miguel, Nuno, Teresa y Luis que siempre me han dado la mano en los momentos menos buenos por los que he pasado. “Muito Obrigado por tudo o que têm feito por mim”.

A todos, gracias.

RESUMEN

El presente trabajo tiene por objetivo avanzar en la investigación de métodos para la estimación correcta de la distribución espacial de parámetros biofísicos en el cultivo de olivar mediante técnicas de teledetección. Durante 2003 y 2004 se realizaron medidas de campo para el cálculo del Índice de Área de Planta (IAP), que incluyeron la densidad de área de planta, definida por las medidas de transmitancia de copa y espesor de copa, el área proyectada de copa y volumen de copa en un olivar extensivo y otro intensivo situados en las fincas “El Tobazo” (Jaén) y “Alameda del Obispo, CIFA” (Córdoba), en España.

Los datos de campo para validación se tomaron de 95 árboles seleccionados con alta variabilidad de volumen y superficie proyectada de copa e índice de área foliar. Se utilizaron metodologías automatizadas de estimación de variables biofísicas a escala de árbol a partir de imágenes de alta resolución espacial y espectral, consistentes en imágenes multispectrales del sensor aerotransportado CASI (1 m de resolución espacial y 7 bandas espectrales), estudiando su aplicabilidad a imágenes multispectrales (2,5 m de resolución espacial y 4 bandas espectrales) y pancromáticas (0,6 m de resolución espacial y 1 banda) del satélite QUICKBIRD.

La imagen multispectral del CASI y la pancromática del QUICKBIRD permitieron la aplicación de algoritmos automáticos de identificación y delineación de las copas de olivo para la estimación del área proyectada por copa, con resultados que demuestran la viabilidad de los métodos propuestos tanto en sensores de tipo multispectral aerotransportados como en satélites operativos de alta resolución, obteniendo coeficientes de determinación (r^2) entre 0,83 y 0,53, y errores cuadráticos medios (RMSE) entre 5 y 9 m². El volumen de copa estimado a partir del área proyectada de copa estimada mediante las imágenes del sensor CASI y satélite QUICKBIRD se correlacionó con el medido en campo, con coeficientes de determinación (r^2) entre 0,79 y 0,46, y errores cuadráticos medios (RMSE) entre 11,5 y 20 m³. En la estimación de la transmitancia de copa a partir del cálculo de los índices de vegetación estructurales (NDVI, RDVI, MSR y SR) mediante las imágenes multispectrales del CASI y QUICKBIRD, los resultados fueron de $r^2=0,71$ y $r^2=0,68$, respectivamente, obteniendo una relación con IAP de $r^2=0,55$.

La metodología propuesta permite la generación de forma operativa de mapas de distribución espacial de área proyectada, transmitancia de copa y IAP en olivares de tipo extensivo, elaborados a partir de imágenes del satélite QUICKBIRD, mostrando la viabilidad de transferir estos métodos a escala de satélite para la realización del seguimiento global de grandes extensiones de olivar.

Palabras clave: teledetección, índice de vegetación, CASI, QUICKBIRD, área proyectada, transmitancia, índice de área planta, multiespectral.

ABSTRACT

This research work makes progress on the development of remote sensing methods for the correct estimation of the spatial distribution of biophysical parameters in olive groves. Field campaigns were conducted to measure Plant Area Index (IAP) in 2003 and 2004. They included measuring plant area density, defined by crown transmittance and crown depth, projected crown area, and crown volume in two olive groves located in “El Tobazo” (Jaén) and “Alameda del Obispo, CIFA” (Córdoba), in Spain. Field measurements for validation were collected from 95 trees selected to provide high variability and a large gradient in crown volume, projected crown area, and leaf area index. Automatic methods for estimating biophysical parameters at the crown level were tested using high-spatial and -spectral resolution remote sensing imagery. Multispectral images were acquired with the CASI airborne imaging spectrometer at 1 m spatial resolution and 7 spectral bands, studying the potential for transferring these methods to QUICKBIRD satellite images of 2.5 m spatial resolution and 4 spectral bands (multispectral mode) and 0.6 m spatial resolution and 1 spectral band (panchromatic mode).

The multispectral and panchromatic CASI and QUICKBIRD images enabled the application of automatic algorithms for olive crown identification and delineation, studying the validity for estimating projected crown area. Results demonstrate that the methods proposed in this study were successful for both multispectral and panchromatic imagery at the satellite scale, obtaining determination coefficients (r^2) in the range 0,83-0,53, and root mean square errors (RMSE) between 5 and 9 m². The crown volume parameter was estimated using image-derived projected crown area values from CASI and QUICKBIRD satellite imagery, yielding determination coefficients (r^2) ranging between 0,79 and 0,46, with root mean square errors (RMSE) between 11,5 and 20 m³.

Olive crown transmittance was estimated using structural vegetation indices such as NDVI, RDVI, MSR and SR, testing their performance on CASI and QUICKBIRD multispectral imagery, yielding $r^2=0,71$ and $r^2=0,68$, respectively, and obtaining a relationship with plant area index of $r^2=0,55$. These methods enable obtaining maps of biophysical parameters in an operational way, including projected

crown area, crown transmittance, and plant area index, demonstrating the validity of the methods when applied to satellite scales.

Keywords: remote sensing, vegetation index, CASI, QUICKBIRD, projected crown area, transmittance, plant area index, multispectral.

I. ÍNDICE

	Página
II. LISTA DE TABLAS	III
III. LISTA DE FIGURAS	V
1. INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS	1
2. MATERIALES Y MÉTODOS	25
2.1 Datos de Campo	25
2.1.1 Descripción de las Parcelas Experimentales de Olivar	25
2.1.2 Medidas de Transmitancia de Copa y Cálculo de la Densidad de Área de Planta	29
2.1.3 Cálculo del Volumen de Copa	33
2.1.4 Cálculo del Área Proyectada de Copa	34
2.1.5 Cálculo del Índice de Área de Planta	35
2.2 Datos de Teledetección	36
2.2.1 Procesamiento de Imágenes obtenidas con el Sensor CASI	36
2.2.2 Procesamiento de Imágenes obtenidas con el Satélite QUICKBIRD	41
2.3 Métodos de Estimación de Área Proyectada y Transmitancia de Copa mediante imágenes de Teledetección	46
2.3.1 Algoritmos de Delineación de Copa	46
2.3.2 Cálculo de Índices de Vegetación	50
3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	53
3.1 Estimación de Área Proyectada de Copa mediante técnicas de Teledetección	53
3.2 Estimación de Volumen de Copa	56

3.3 Estimación de Transmitancia de Copa mediante Índices de Vegetación Estructurales	61
3.4 Estimación de Índice de Área de Planta mediante Índices de Vegetación Estructurales	66
4. CONCLUSIONES	71
5. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	73
6. ANEXO: Artículo presentado en el V Congreso Ibérico de Ciencias Hortícolas realizado entre 22 y 27 de Mayo de 2005 en Porto, Portugal.....	87

II. LISTA DE TABLAS

	Página
Tabla 1- Índices Ópticos Hiperspectrales.....	8
Tabla 2- Coeficientes de calibración utilizados en la calibración radiométrica de las imágenes del satélite QUICKBIRD obtenidas en los años 2003 y 2004.....	42
Tabla 3- Descripción de los parámetros de entrada del algoritmo TD_LWS.....	47
Tabla 4- Descripción de los parámetros de entrada del algoritmo TD_GF_REF.....	48
Tabla 5- Valores de los parámetros de entrada de los algoritmos automáticos (TD_LWS - TD_GF_REF) de identificación y delineación de copas de los olivos.	49
Tabla 6- Resumen de los valores mínimo y máximo, media y desviación típica del Área proyectada de copa, obtenidos en los años de 2003 y 2004 para el olivar extensivo, y en 2004 para el olivar intensivo.	53
Tabla 7- Valores mínimo y máximo, media y desviación típica del volumen de copa, obtenidos en los años 2003 y 2004 para el olivar extensivo y en 2004 para el olivar intensivo.	57
Tabla 8- Valores mínimo y máximo, media y desviación típica de Transmitancia de copa obtenidos en los años 2003 y 2004 para el olivar extensivo y en 2004 para el olivar intensivo.	61
Tabla 9- Coeficientes de determinación (r^2) resultantes de la relación entre las medidas de transmitancia de copa obtenidas en campo (olivar extensivo e intensivo) con el sensor PCA y los valores promedios de los índices obtenidos mediante las imágenes del sensor CASI y del satélite QUICKBIRD de tipo multiespectral: n=95 árboles, año 2003; n=20 árboles, año 2004); y n=115 árboles, años 2003 / 2004).....	62

Tabla 10- Valores mínimo y máximo, media y desviación típica del Índice de Área de Planta obtenidos en los años 2003 y 2004 para el olivar extensivo y en 2004 para el olivar intensivo. 66

Tabla 11- Coeficientes de determinación (r^2) resultantes de la relación entre las medidas de IAP obtenidas en campo (olivar extensivo e intensivo) con el sensor PCA y los valores promedios de los índices obtenidos mediante las imágenes del sensor CASI y del satélite QUICKBIRD de tipo multiespectral: n=95 árboles, año 2003; n=20 árboles, año 2004; y n=115 árboles, años 2003 / 2004. 67

III. LISTA DE FIGURAS

	Página
Figura 1- Mapa de situación de las parcelas experimentales, localizadas en Andalucía, España. El olivar extensivo está situado en la provincia de Jaén, municipio de Alcaudete y el intensivo se encuentra localizado en Córdoba capital.	25
Figura 2- Aspecto general del olivar extensivo (arriba) y la imagen obtenida por el sensor aerotransportado CASI (abajo). Finca “El Tobazo”, en Alcaudete (Jaén).	27
Figura 3- Aspecto general del olivar intensivo (arriba), mostrando la imagen obtenida por el sensor aerotransportado CASI (abajo). Finca “Alameda del Obispo”, C.I.F.A. de Córdoba.	28
Figura 4- Esquema del sensor óptico, con los intervalos de medida de los cinco anillos concéntricos.	30
Figura 5- Aspecto general del instrumento PCA (a la izquierda) y esquema de medición de los valores de radiación transmitida por el sensor óptico (a la derecha).	31
Figura 6- Esquema de un olivo, con cuatro u ocho transectos, según el protocolo de medidas realizadas en el olivar intensivo o extensivo respectivamente, sobre los que se sitúan los puntos de medida de la radiación bajo la copa.	32
Figura 7- Esquema de la silueta formada en un eje, con los puntos de medida.	34
Figura 8- Esquema de los cuatro u ocho sectores elípticos creados por los ejes, dependiendo del protocolo utilizado para olivar intensivo o extensivo, respectivamente.	35
Figura 9- Imagen obtenida por el sensor CASI, con la parcela del olivar intensivo identificada (Finca “Alameda del Obispo”).	37

- Figura 10-** Mosaico de imágenes obtenida por el sensor CASI, con la zona de estudio para realización de medidas en la parcela del olivar extensivo (Finca “El Tobazo”). ... 37
- Figura 11-** Perfiles espectrales sobre vegetación, sombra, suelo brillante y suelo oscuro en la imagen multiespectral obtenida por el sensor CASI relativa a la parcela del olivar intensivo (arriba) y extensivo (abajo)..... 38
- Figura 12-** Imagen del sensor CASI simulando una imagen de tipo pancromático (a la izquierda) y la representación del nuevo centro y ancho de banda tras realizar la transformación de multiespectral a pancromático, mostrando también las bandas multiespectrales del sensor CASI para un olivo (a la derecha). 39
- Figura 13-** Perfiles espectrales sobre vegetación, sombra, suelo brillante y suelo oscuro en la imagen multiespectral obtenida por el sensor CASI no rectificadas de radiancia (arriba), georeferenciadas de radiancia (centro) y georeferenciadas de reflectancia (abajo). 40
- Figura 14-** Imágenes del satélite QUICKBIRD en modo multiespectral (arriba) y en modo pancromático (abajo) obtenidas en el año de 2003. 41
- Figura 15-** Perfiles espectrales sobre vegetación, sombra, suelo brillante y oscuro, en la imagen multiespectral obtenida en el año de 2003 por el satélite QUICKBIRD sin corregir (arriba), corregida radiométricamente (centro) y corregida atmosféricamente (abajo)..... 44
- Figura 16-** Imagen completa de la parcela de olivar extensivo de tipo multiespectral obtenida por el QUICKBIRD en 2003 (a la izquierda) y la de tipo pancromático obtenida en el año 2004 (a la derecha), con los olivos identificados donde se realizaron medidas de campo. 45
- Figura 17-** Ejecución de la delimitación de las copas de los olivos por el algoritmo en las imágenes del sensor CASI multiespectral (arriba) y del satélite QUICKBIRD de tipo pancromático (abajo). 48

Figura 18- Imagen CASI de tipo multiespectral, con la identificación y delineación de las copas ejecutada por el algoritmo.....	49
Figura 19- Imagen QUICKBIRD de tipo pancromático del año de 2003 con la identificación y delineación de las copas ejecutada por el algoritmo.....	50
Figura 20- Relación entre el área proyectada por la copa medida en campo y la estimada mediante los algoritmos TD_LWS - TD_GF_REF, a partir de las imágenes de tipo multiespectral (a) y pancromática (b) obtenidas con el sensor CASI en el año 2003; y a partir de las imágenes de tipo pancromático obtenidas con el satélite QUICKBIRD en los años 2003 (c) y 2004 (d).	55
Figura 21- Relación existente entre las medidas del volumen de copa y el área proyectada obtenidas en el año 2003 en las parcelas de olivar extensivo e intensivo (a); en el año 2004 solamente en la parcela de olivar extensivo (b); en los años 2003 y 2004 en las parcelas de olivar extensivo e intensivo (c).....	58
Figura 22- Relación entre el volumen medido en campo y el estimado a partir del área proyectada de copa estimada en las imágenes de tipo multiespectral (a) y pancromático (b) obtenidas con el sensor CASI en el año 2003, así como en las imágenes de tipo pancromático obtenidas con el satélite QUICKBIRD en los años 2003 (c) y 2003 / 2004 (d).	60
Figura 23- Relación entre las medidas de transmitancia de copa obtenidas en campo (olivar extensivo e intensivo) con el PCA y los valores del índice NDVI obtenido mediante las imágenes de tipo multiespectral del sensor CASI (a); del satélite QUICKBIRD en el año 2003 (b), y en 2003 / 2004 (c).....	63
Figura 24- Mapa de la variabilidad de la transmitancia de copa en la parcela de olivar extensivo (Finca “El Tobazo”).	64
Figura 25- Mapa de la variabilidad de la transmitancia de copa en toda la zona de 8 km x 8 km cubierta por la imagen de satélite QUICKBIRD obtenida en el año 2003.....	65

Figura 26- Mapas de la variabilidad de la transmitancia de copa en pequeñas zonas de la imagen de satélite QUICKBIRD obtenida en el año de 2003, con baja transmitancia (a) y alta transmitancia de copa (b).	65
Figura 27- Relación entre las medidas de IAP obtenidas en campo (olivar extensivo e intensivo) y los valores del índice NDVI obtenido mediante las imágenes de tipo multiespectral del sensor CASI (a), del satélite QUICKBIRD en el año 2003 (b), y en 2003 / 2004 (c).....	68
Figura 28- Mapa de la variabilidad de IAP en la parcela de olivar extensivo (Finca “El Tobazo”).....	69
Figura 29- Mapa de la variabilidad de IAP en una zona extensa (8 Km x 8 Km) a partir de la imagen de satélite QUICKBIRD obtenida en el año 2003.	70

1. INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS

El olivo cultivado (*Olea europea var. europaea*) es un árbol de la familia de las oleáceas que procede de la variedad silvestre, acebuche (*Olea europaea var. Sylvestris*) siendo muy longevo y pudiendo ser productivo durante cientos de años. Su tamaño es mediano, y aunque varíe dependiendo de la variedad y de las condiciones de cultivo, puede oscilar entre 4 y 8 metros de altura. Su tronco es grueso, lleno de protuberancias y fisuras (especialmente a medida que envejece) y el color de la corteza es gris a verde grisáceo. El porte natural de la especie es abierto, mientras que la forma de la copa es redondeada (hemisférica) y la tendencia natural de la especie es a producir una copa densa.

El patrimonio oleícola existente se estima en aproximadamente 960 millones de olivos, de los que unos 945 millones -el 98% del total- se sitúan en los países de la cuenca mediterránea (España, Grecia, Italia, Túnez, Turquía, Siria, Marruecos, Portugal, Jordania) ocupando una superficie de 9,5 millones de hectáreas (COI, 2003). España cuenta con 2,4 millones de hectáreas de olivar, encontrándose una parte muy considerable, 1.490.000 ha (62% de la superficie total), en la región más meridional de la Península Ibérica, Andalucía (MAPA, 2003). Además, España es también el principal país productor de aceite de oliva del mundo, por lo que las últimas estimaciones del Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación (MAPA, 2003), sitúan la producción de aceituna para almazara en la campaña 2004/2005 en 7.058.000 toneladas y la de aceite en 1.447.700 toneladas, de las que el 83,2 % se obtuvieron en Andalucía.

Por otro lado, la contribución de los productos derivados del olivar al valor de la Producción Final Agraria Española oscila entre el 3 y el 5 %, dependiendo de los años. Esta cifra se eleva considerablemente si restringimos el marco de referencia a Andalucía, donde se sitúa en el entorno del 20 %, alcanzando niveles altamente significativos en algunas provincias de la Comunidad Autónoma.

Estos datos son indicadores de la importancia del sector oleícola, siendo el olivar un recurso esencial a conservar y mejorar debido a la gran aportación de beneficios que genera desde la mano de obra que implementa para su mantenimiento hasta el efecto de

protección medioambiental que ejerce a nivel de la protección del suelo y de la lucha contra la erosión.

Una plantación de olivos constituye una cubierta heterogénea, en la que la superficie foliar se localiza dentro de una zona envolvente (copa del árbol) distribuida en el espacio según el diseño de plantación. Tradicionalmente, los olivos están separados entre ellos en un marco entre 6 y 12 m, y la gestión del suelo se basa principalmente en operaciones culturales (labranza del suelo), las cuales afectan drásticamente la capa superficial del suelo. El olivar es por tanto, uno de los sistemas agrícolas andaluces que presenta mayor riesgo de erosión, debido al bajo porcentaje de cobertura de suelo como consecuencia de las intensas labranzas que se vienen practicando, y también a su localización preferente en zonas en pendiente (Gómez *et al.*, 2003). En la actualidad se han desarrollado técnicas de conservación que consisten fundamentalmente en alterar lo mínimo posible los suelos naturales y protegerlos con cubiertas vegetales (García-Torres, 2001; Peña-Barragán *et al.*, 2003) porque la presencia de éstas en los suelos es uno de los factores más importantes a la hora de prevenir la erosión hídrica, debido al efecto protector de la superficie del suelo frente al impacto de las gotas de lluvia y la escorrentía superficial. El aumento de la cobertura de suelo tiene otros efectos hidrológicos como pueden ser la reducción de la escorrentía superficial debido a un aumento de la macroporosidad cuando la cobertura se debe a vegetación viva (Rawls y Brakensiek, 1989), reducción del sellado superficial (Brakensiek y Rawls, 1983), aumento de la interceptación de lluvia (Haynes, 1940), y evapotranspiración (Chung y Horton, 1987; Fereres *et al.*, 1981). Los restos vegetales empleados en cubrir el suelo también suponen una mejora a medio y largo plazo de la estructura de la superficie del suelo debido a un aumento del contenido de materia orgánica (Tisdal y Oades, 1980).

Entre los varios factores medioambientales que determinan el crecimiento de las plantas, la radiación fotosintéticamente activa (PAR) interceptada por la cubierta vegetal de un cultivo es el principal factor que determina la producción de materia seca, siendo la principal fuente de energía para el proceso fotosintético desarrollado por las hojas. Es decir, la producción de biomasa, en una condición de radiación determinada,

es influenciada por la respuesta fotosintética de las hojas y la distribución de la radiación en estos elementos (Mariscal *et al.*, 1999).

En la producción frutícola, donde se presenta un desarrollo del área foliar discontinuo, la cantidad de luz que intercepta un árbol es afectada tanto por el tamaño y forma de la copa del árbol, que a su vez dependen de la edad del árbol y del sistema de conducción, como por la densidad de plantación (Robinson y Lakso, 1991). Robinson, Lakso y Ren (1991) han demostrado que las modificaciones de la estructura de la copa del árbol frutal inciden en la intercepción y distribución de la luz.

En una plantación heterogénea, la atenuación de radiación resulta de la absorción y dispersión de la misma por las hojas, generando un gradiente vertical de irradiancia. Además, la variación horizontal de la radiación transmitida resulta de la elevada distribución de la radiación solar directa en todas las direcciones, observándose en este tipo de plantaciones áreas soleadas y sombreadas proyectadas por las copas (Baldochi *et al.*, 1986). La radiación solar interceptada por la copa de las plantas es función del Índice de Área Foliar (IAF) que desarrolla el cultivo, que surge de dividir la superficie de las hojas que se encuentran sobre una unidad de suelo por dicha superficie. A medida que aumenta el IAF se incrementa la radiación interceptada hasta que se llega a un valor a partir del cual los aumentos de IAF no producen aumentos significativos en la intercepción de la radiación (Norman y Welles, 1991).

El IAF es un parámetro estructural característico de los ecosistemas terrestres extremadamente importante. Está fuertemente correlacionado con procesos biológicos del ecosistema terrestre como la evapotranspiración (McNaughton y Jarvis, 1983), el balance hídrico (Grier y Running, 1977), intercepción de la radiación (Pierce y Running, 1988; Fassnacht *et al.*, 1994), producción primaria líquida de la cubierta vegetal (Gholz, 1982), y producción primaria total (Gower *et al.*, 1992). Además, debido a que el IAF está directamente relacionado con el intercambio de energía, CO₂, y biomasa entre la cubierta vegetal y la atmósfera (Running *et al.*, 1989), las medidas precisas de este parámetro a nivel local son requeridas para evaluar la magnitud a nivel global del CO₂ y flujos de energía (Running *et al.*, 1986).

A lo largo de su ciclo, el crecimiento y la fructificación del olivo dependen de la producción de hidratos de carbono en los tejidos foliares. Por ello, la superficie foliar debe permitir que la radiación PAR llegue a los distintos estratos foliares para mejorar el rendimiento fotosintético. Debido a las pérdidas provocadas por la respiración, las

hojas de los estratos insuficientemente iluminadas pueden acabar viviendo a expensas del material restante (Duthil, 1970; Denden *et al.*, 2002). Asimismo las pérdidas hídricas por transpiración también se producen a través de la superficie foliar. Por ello, las necesidades hídricas o de elementos fertilizantes del suelo dependen del estado fisiológico de la planta y de su vigor. Por esta razón se han desarrollado varios métodos para evaluar la superficie foliar de las plantas.

Daughtry (1990) describió diferentes métodos directos de medición del IAF. Los métodos destructivos consisten en recoger las hojas directamente del árbol, midiendo la superficie foliar de todas las hojas de la muestra, mientras que con los no destructivos la recolección de las hojas se hace mediante la colocación de trampas bajo la copa, midiendo IAF a partir del peso de las hojas recogidas en dichas trampas. Daughtry (1990) y Jonckheere *et al.* (2004) describen varios métodos para determinar la superficie foliar, una vez recogidas las hojas. Las técnicas planimétricas están basadas en la correlación existente entre la superficie de la hoja individual y el número de unidades que cubren un plano horizontal, mientras que las técnicas gravimétricas relacionan peso seco de hoja y superficie de hoja utilizando relaciones predeterminadas de superficie de hoja verde y peso seco (peso específico foliar, o masa de hoja por área). En contraste con los cultivos anuales, los métodos de medida directa en plantaciones de árboles son extremadamente difíciles y en muchos casos no factibles (Villalobos *et al.*, 1995). Los métodos directos son sensibles a las variaciones climáticas, a la edad y a la densidad de la cubierta, pero son laboriosos y requieren de mucho tiempo, no permitiendo el seguimiento temporal de la vegetación a nivel de la fenología, los efectos del estrés hídrico, las variaciones de radiación y de ataques parasitarios (Soudani *et al.*, 2001).

Sin embargo, el IAF puede ser medido indirectamente a partir de observaciones de otras variables, que son generalmente más rápidas, y fáciles de medir. Los métodos ópticos son los más utilizados, y están basados en la medida de la transmisión de la radiación a través de las cubiertas. Estos métodos aplican la ley de Beer-Lambert teniendo en cuenta el hecho de que la cantidad total de radiación interceptada por una cubierta depende de la radiación incidente, la estructura de la cubierta y las propiedades ópticas (Monsi y Saeki, 1953). Son varios los instrumentos comerciales que usan modelos de transferencia radiativa (Welles y Norman, 1991; Welles y Cohen, 1996;

Weiss *et al.*, 2004) utilizados para medir la radiación. De los modelos usados para estimar IAF (descritos en Jonckheere *et al.*, 2004), se destacan las fotografías hemisféricas (Denden *et al.*, 2002), el TRAC (Tracing Radiation and Architecture of Canopies, 3rd Wave Engineering, Ontario, Canada), el DEMON (CSIRO, Canberra, Australia), el Sunfleck Ceptometer (Decagon Devices Inc., Pullman, Washington, EEUU) y el PCA (LAI-2000, Plant Canopy Analyzer, LI-COR, Lincoln, Nebraska, EEUU), que tienen en cuenta factores como la radiación solar directa y difusa, la absorción foliar del PAR, ángulo solar cenital y la inclinación foliar efectiva. El PCA es actualmente uno de los más utilizados y mide la radiación solar difusa que llega a un sensor formado por 5 anillos concéntricos que abarcan diferentes ángulos de lectura (0-13°, 16-28°, 32-43°, 47-58° y 61-74°). La imagen obtenida en forma casi hemisférica es proyectada dentro de esos anillos, lo que permite, para cada rango angular, la medición de la radiación en la banda y en el ángulo cenital conocido. Un filtro óptico restringe la transmitancia de radiación para longitudes de onda menores que 490 nm, con la finalidad de minimizar la dispersión de la radiación por la cubierta. Este aparato viene siendo ampliamente utilizado en masas forestales (Vertessy *et al.*, 1995; Chen y Cihlar, 1996; Hingston *et al.*, 1998; Ares y Fownes, 2000; Barclay *et al.*, 2000), debido a su práctico y fácil manejo para estimar el IAF.

Además de IAF, la concentración de clorofila y otros constituyentes bioquímicos foliares como el contenido de materia seca y contenido de agua son de bastante interés en la evaluación del estado fisiológico y consecuente productividad de un cultivo, debido a que pueden ser usados como indicadores de estrés en vegetación, a través de la influencia potencial que tienen en las deficiencias nutricionales (Chen y Barak, 1982; Fernández-Escobar *et al.*, 1999; Jolley y Brown, 1994; Marschner *et al.*, 1986; Tagliavini y Rombolà, 2001; Wallace, 1991). Las deficiencias nutricionales causadas pueden ser asociadas a clorosis, mientras que por otro lado, el exceso de fertilización afecta el almacenamiento de carbono generando lesiones en la vegetación, por aplicaciones prolongadas de nitrógeno (Schulze *et al.*, 1989) y aumentos de las pérdidas de nitrógeno gaseoso y solutos en el suelo. El contenido clorofílico foliar total disminuye en vegetación estresada, cambiando la proporción de pigmentos de absorción de la luz en la región espectral del visible, lo que conlleva a una menor absorción total debido a la baja concentración de clorofila *a* y *b* a nivel foliar (Carter, 1994; Gitelson y Merzlyak, 1996; Rock *et al.*, 1988; Vogelmann *et al.*, 1993), es decir, las variaciones en

la reflectancia, transmitancia y absorbancia permiten distinguir grados de estrés en función de la proporción en que queda afectada por dicho pigmento cada una de las mencionadas propiedades ópticas foliares (Vogelmann *et al.*, 1993).

Métodos de espectroscopía a nivel de hoja y de cubierta vegetal permiten la estimación del contenido clorofílico en función de la radiación reflejada en la región espectral del verde (550 nm) y en la región del *borde rojo* (690 a 750 nm) (Rock *et al.*, 1988; Vogelmann *et al.*, 1993; Carter, 1994), por lo tanto permitiendo la detección de clorosis en vegetación que puede ser indicador de deficiencias nutricionales debidas a elementos como nitrógeno, fósforo, potasio, hierro, calcio, manganeso, zinc, y magnesio entre otros (Marschner *et al.*, 1986; Fernández-Escobar *et al.*, 1999; Jolley y Brown, 1994; Chen y Barak, 1982; Wallace, 1991; Tagliavini y Rombolà, 2001).

Por consiguiente y debido a que los métodos de medición de variables biofísicas (IAF y porcentaje de cobertura vegetal) y bioquímicas (contenido clorofílico en hoja, materia seca, contenido de agua) mediante métodos destructivos son tediosos, requiriendo mucho tiempo, posibilitándonos apenas muestrear pequeñas zonas de estudio, el sector oleícola requiere de investigación, desarrollo, y adopción de métodos de agricultura de precisión para la consecución de un manejo sostenible y optimización del rendimiento de los olivares, tornándose imperativa la necesidad de monitorizar grandes extensiones, evaluando el estado del olivar mediante cuantificación de dichas variables. De esta forma, será posible estudiar el comportamiento de la vegetación a lo largo del tiempo y como respuesta a diferentes condiciones ambientales.

En esta línea de trabajo, la teledetección surge como la única herramienta que permite monitorizar grandes extensiones para seguimiento del estado de la vegetación, representando un gran potencial para la identificación de áreas de cultivo, así como para estimar parámetros biofísicos que serán utilizados en modelos de crecimiento y productividad agrícola (Bauer, 1985), y que se manifiestan en función de la cantidad de radiación reflejada o emitida por un cultivo y captada por el sensor en diferentes bandas de longitud de onda del espectro electromagnético (Tucker *et al.*, 1981).

Durante los últimos 30 años existe gran énfasis en el potencial que supone las nuevas técnicas de análisis de imágenes mediante teledetección para evaluar cultivos

(Hatfield y Pinter-Jr, 1993), en particular para distinguir entre tipos de vegetación basados en fotografías aéreas (Everitt *et al.*, 1993), imágenes de video (Everitt *et al.*, 1994), sensores digitales (Lamb y Weedon, 1998) datos de radar (Chakraborty *et al.*, 1997) o imágenes de satélite (Running *et al.*, 1989, Oetter *et al.*, 2000). Según Ponzoni (2001), la apariencia de la cubierta vegetal en determinado sensor remoto es fruto de un proceso complejo que envuelve muchos parámetros y factores ambientales. Teniendo como objeto de estudio la vegetación, un sensor remoto no mide solamente las características intrínsecas de esa vegetación, pero incluye también la interferencia de otros parámetros y factores externos, como la fuente de radiación, la dispersión atmosférica, las características de la hoja y del cultivo, los contenidos de humedad, así como la interferencia de la reflectancia del suelo y sombras, entre otros.

Con objeto de minimizar la variabilidad causada por los factores externos, la reflectancia espectral de la cubierta vegetal, viene siendo transformada y combinada en varios índices espectrales de vegetación (IV) (Turner *et al.*, 1999), descritos en la Tabla 1. Estos índices son combinaciones de dos o más bandas que pueden calcularse a partir de la señal de reflectancia obtenida por el sensor (Jackson y Huete, 1991), en bandas espectrales específicas del rojo e infrarrojo cercano, ya que estas contienen más del 90 % de la información espectral de la vegetación, realizando fácilmente su comportamiento espectral (Huete y Jackson, 1988). En definitiva, se puede señalar que cuanto mayor sea el contraste entre la reflectancia de la banda infrarroja y roja, mayor vigor presentará la cubierta observada. Bajos valores de contraste indican una vegetación enferma o senescente, hasta llegar a las cubiertas sin vegetación que ofrecen un contraste muy pequeño (Chuvieco, E., 1996).

Los índices de vegetación espectrales, fueron definidos y propuestos como una herramienta no destructiva, con objeto de comprender los procesos fotoquímicos asociados con la actividad fotosintética como la eficiencia del uso de la radiación o para estimar el contenido clorofílico en hoja (Broge y Leblanc, 2000; Daughtry *et al.*, 2000, Vogelmann *et al.*, 1993; Gitelson *et al.*, 1996; Carter, 1994; Zarco-Tejada *et al.*, 2001; Haboudane *et al.*, 2002; 2004) mientras que otros han sido desarrollados para estimar IAF (Running *et al.*, 1986; Spanner *et al.*, 1990) o cuantificar la fracción de la cubierta vegetal (Asrar *et al.*, 1984; 1985; Baret y Guyot, 1991; Elvidge y Chen, 1995; Broge y Mortensen, 2002).

Tabla 1- Índices Ópticos Hiperspectrales.

INDICES DE VEGETACIÓN	ECUACIÓN	REFERENCIA
Normalized Difference Vegetation Index (NDVI)	$NDVI = (R_{NIR} - R_{red}) / (R_{NIR} + R_{red})$	Rouse <i>et al.</i> (1974)
Simple Ratio Index (SR)	$SR = R_{NIR} / R_{red}$	Jordan (1969); Rouse <i>et al.</i> (1974)
Renormalized Difference Vegetation Index (RDVI)	$RDVI = (R_{800} - R_{670}) / \sqrt{(R_{800} + R_{670})}$	Rougean y Breon, (1995)
Modified Simple Ratio (MSR)	$MSR = \frac{R_{NIR} / R_{red} - 1}{(R_{NIR} / R_{red})^{0.5} + 1}$	Chen (1996)
Soil-Adjusted Vegetation Index (SAVI)	$SAVI = (1 + 0.5) * (R_{800} - R_{670}) / (R_{800} + R_{670} + 0.5)$	Huete (1988)
Optimized Soil-Adjusted Vegetation Index (OSAVI)	$OSAVI = (1 + 0.16) * (R_{800} - R_{670}) / (R_{800} + R_{670} + 0.16)$	Rondeaux <i>et al.</i> (1996)
Improved SAVI with self-adjustment factor L (MSAVI)	$MSAVI = \frac{1}{2} [2 * R_{800} + 1 - \sqrt{(2 * R_{800} + 1)^2 - 8 * (R_{800} - R_{670})}]$	Qi <i>et al.</i> (1994)
Modified Chlorophyll Absorption in Reflectance Index (MCARI ₁)	$MCARI1 = 1.2 * [2.5 * (R_{800} - R_{670}) - 1.3 * (R_{800} - R_{550})]$	Haboudane <i>et al.</i> (2004)
Modified Chlorophyll Absorption in Reflectance Index (MCARI ₂)	$MCARI2 = \frac{1.5 * [2.5 * (R_{800} - R_{670}) - 1.3 * (R_{800} - R_{550})]}{\sqrt{(2 * R_{800} + 1)^2 - (6 * R_{800} - 5 * \sqrt{R_{670}}) - 0.5}}$	Haboudane <i>et al.</i> (2004)
CARI (Chlorophyll Absorption in Reflectance Index)	$CARI = [(R_{700} - R_{670}) - (R_{700} - R_{550}) * (R_{700} / R_{670})]$	Kim <i>et al.</i> , 1994
Transformed CARI (TCARI)	$TCARI = 3 * [(R_{700} - R_{670}) - 0.2 * (R_{700} - R_{550}) * (R_{700} / R_{670})]$	Haboudane <i>et al.</i> (2002)
Modified C _{ab} Absorption in Reflectance Index (MCARI)	$MCARI = [(R_{700} - R_{670}) - 0.2 * (R_{700} - R_{550})] * (R_{700} / R_{670})$	Daughtry <i>et al.</i> (2000)
Triangular Veg. Index (TVI)	$TVI = 0.5 * [120 * (R_{750} - R_{550}) - 200 * (R_{670} - R_{550})]$	Broge y Leblanc (2000)
Modified Triangular Vegetation Index (MTVI ₁)	$MTVI1 = 1.2 * [1.2 * (R_{800} - R_{550}) - 2.5 * (R_{670} - R_{550})]$	Haboudane <i>et al.</i> (2004)
Modified Triangular Vegetation Index (MTVI ₂)	$MTVI2 = \frac{1.5 * [1.2 * (R_{800} - R_{550}) - 2.5 * (R_{670} - R_{550})]}{\sqrt{(2 * R_{800} + 1)^2 - (6 * R_{800} - 5 * \sqrt{R_{670}}) - 0.5}}$	Haboudane <i>et al.</i> (2004)
Greenness Index (G)	$G = R_{554} / R_{677}$	-
Zarco & Miller (ZM)	$ZM = R_{750} / R_{710}$	Zarco-Tejada <i>et al.</i> (2001)
Simple Ratio Pigment Ind. (SRPI)	$SRPI = R_{430} / R_{680}$	Peñuelas <i>et al.</i> (1995)
Normalized Phaeophytinization Index (NPQI)	$NPQI = (R_{415} - R_{435}) / (R_{415} + R_{435})$	Barnes <i>et al.</i> (1992)
Photochemical Reflectance Index (PRI)	$PRI_1 = (R_{528} - R_{567}) / (R_{528} + R_{567})$ $PRI_2 = (R_{531} - R_{570}) / (R_{531} + R_{570})$ $PRI_3 = (R_{570} - R_{539}) / (R_{570} + R_{539})$	Gamon <i>et al.</i> (1992)
Normalized Pigment Chlorophyll Index (NPCI)	$NPCI = (R_{680} - R_{430}) / (R_{680} + R_{430})$	Peñuelas <i>et al.</i> (1994)
Carter Indices (CTR)	$CTR_1 = R_{695} / R_{420}$ $CTR_2 = R_{695} / R_{760}$	Carter (1994)
Lichtenthaler Indices (LIC)	$LIC_1 = (R_{800} - R_{680}) / (R_{800} + R_{680})$ $LIC_2 = R_{440} / R_{690}$ $LIC_3 = R_{440} / R_{740}$	Lichtenthaler <i>et al.</i> (1996)
Structure Insensitive Pigment Index (SIPI)	$SIPI = (R_{800} - R_{450}) / (R_{800} + R_{650})$	Peñuelas <i>et al.</i> (1995)
Vogelmann Indices (VOG)	$VOG_1 = R_{740} / R_{720}$ $VOG_2 = (R_{734} - R_{747}) / (R_{715} + R_{726})$ $VOG_3 = (R_{734} - R_{747}) / (R_{715} + R_{720})$	Vogelmann <i>et al.</i> (1993); Zarco-Tejada <i>et al.</i> (2001)
Gitelson and Merzlyak (GM)	$GM_1 = R_{750} / R_{550}$ $GM_2 = R_{750} / R_{700}$	Gitelson y Merzlyak (1997)
Curvature Index (CUR)	$CUR = (R_{675} * R_{690}) / (R_{683}^2)$	Zarco-Tejada <i>et al.</i> (2000)

En las últimas décadas se han realizado sustanciales esfuerzos en el sentido de desarrollar nuevos índices para compensar la influencia del suelo (Huete, 1988; Baret *et al.*, 1989; Bannari *et al.*, 1996; Qi *et al.*, 1994; Rondeaux *et al.*, 1996) y los efectos atmosféricos (Kaufman y Tanre; 1992; Karnieli *et al.*, 2001). Pese a que se hayan tenido en cuenta los factores perturbadores, como el brillo de la superficie del suelo y condiciones atmosféricas, los índices de vegetación tienen limitaciones intrínsecas, ya que no son una medida de una variable específica de interés como el contenido clorofílico, geometría de la planta, o arquitectura de la cubierta (Haboudane *et al.*, 2004). Hasta ahora, no ha sido posible describir un índice que sea sensible a la variable de estudio y al mismo tiempo totalmente insensible a los demás parámetros de la vegetación (Govaerts *et al.*, 1999).

El mayor problema del uso de estos índices viene como consecuencia del hecho de que la reflectancia de la cubierta en la región espectral del visible y del infrarrojo es extremadamente dependiente de las propiedades estructurales y bioquímicas (contenido clorofílico) de la cubierta (Jacquemoud *et al.*, 2000; Zarco-Tejada *et al.*, 2001). Además, el IAF y el contenido clorofílico en hoja tienen efectos similares en la reflectancia de la cubierta, en particular desde la región espectral del verde (550 nm) a la región del infrarrojo cercano (750 nm). Para separar sus efectos combinados, recientes estudios (Daughtry *et al.*, 2000; Haboudane *et al.*, 2002) demuestran que el contenido clorofílico en hoja puede ser individualmente estimado mediante la combinación de dos tipos de índices espectrales: i) índices sensibles a la concentración de los pigmentos fotosintéticos; y ii) índices resistentes a la influencia de las propiedades ópticas del suelo. A la inversa, estudios sobre la estimación de IAF sin la interferencia de los efectos de la clorofila se realizaron por Haboudane *et al.* (2004), proponiendo índices de vegetación para estimación de IAF minimizando la influencia de la absorción por contenido clorofílico.

Algunos estudios han consistido en la validación de la estabilidad y poder de predicción de IAF a partir de varios índices de vegetación (Baret y Guyot, 1991; Broge y Leblanc, 2000) mientras que en otros casos el objetivo fue la modificación de índices para mejorar su linealidad e incrementar la sensibilidad al IAF (Chen, 1996; Brown *et al.*, 2000; Nemani *et al.*, 1993). En la práctica, la estimación del IAF mediante datos obtenidos por sensores remotos presentan dos grandes dificultades: los índices de

vegetación se saturan cuando IAF pasa de valores aproximadamente entorno al 3-5, dependiendo del tipo de índice, y por otro lado no existe una única relación entre el IAF y el índice elegido, sino un conjunto de relaciones que son función del contenido clorofílico y otras características de la cubierta (Haboudane *et al.*, 2004). Consecuentemente, existe un largo número de relaciones entre IAF y distintos índices de vegetación obtenidos en imágenes multiespectrales, con un largo rango de coeficientes de determinación entre 0,05 y 0,66 (Baret y Guyot, 1991; Chen, 1996; Brown *et al.*, 2000).

En la actualidad, nuevos métodos que usan sensores remotos hiperespectrales posibilitan el cálculo de numerosos índices de vegetación de banda espectral estrecha relacionados con variables biofísicas (IAF), y bioquímicas del cultivo (C_{a+b} , contenido clorofílico en hoja, carotenos, agua, celulosa, lignina), que usan combinaciones de bandas espectrales que minimizan el efecto indeseable de la contribución espectral del suelo cuando se estima IAF (Rondeaux, 1996; Zarco-Tejada *et al.*, 2005) y además se comportan mucho mejor que los de banda ancha, evitando la saturación a valores elevados de IAF (Haboudane *et al.*, 2004; Zarco-Tejada *et al.*, 2005).

Los índices de vegetación se pueden dividir fundamentalmente en dos grandes grupos: i) los que consisten en bandas espectrales utilizadas individualmente “brightness indices”, y ii) aquéllos que se basan en la combinación de dos o más bandas, designados “greenness indices”. Desde el trabajo pionero de Jordan (1969) que ha combinado la respuesta espectral en el rojo e infrarrojo cercano en un índice, demostrando estar correlacionado con el área foliar, se han desarrollado numerosos índices. Los índices de vegetación de la diferencia normalizada se basan en la relación existente entre la radiación reflejada en la región espectral del infrarrojo cercano (800 nm) debida a la estructura de la cubierta vegetal, y la radiación reflejada en la región del rojo (670 nm) en la zona espectral del visible del espectro electromagnético, función de la radiación absorbida por pigmentos fotosintéticos, principalmente clorofila *a* y *b* (Jensen, 2000). Índices en este grupo incluyen el Normalised Difference Vegetation Index (NDVI) desarrollado por Rouse *et al* (1974) siendo el más ampliamente utilizado. Pese a su intensivo uso, la principal desventaja del NDVI es la inherente relación no lineal con las variables biofísicas como la fracción de vegetación (FV), IAF y el porcentaje de cobertura del suelo (Lillesaeter, 1982; Baret y Guyot, 1991; Haboudane *et al.*, 2004; Myneni *et al.*, 1995; 2002, Huete *et al.* 2002). Generalmente, el NDVI se

aproxima asintóticamente a la saturación para valores moderados a elevados del IAF y FV (Baret y Guyot 1991; Buschmann y Nagel 1993, Gitelson *et al.*, 2002 a, b, 2003). El NDVI tiene una sensibilidad mínima para validar elevados valores de contenido clorofílico en hoja, porcentaje de cubierta del suelo, y IAF (Buschmann y Nagel, 1993; Gitelson y Merzlyak, 1994a, 1994b; Myneni *et al.*, 1995; Muneni, *et al.*, 1997). El NDVI se satura con valores de IAF entre 3-4 para la mayoría de los ecosistemas (Sellers *et al.*, 1986), teniendo dichos efectos de saturación importantes consecuencias en la detección de cambios y en la monitorización de la dinámica de la vegetación. Además, el NDVI, está afectado por otros factores como la superficie del suelo, sombra provocada por la cubierta vegetal, condiciones de iluminación, condiciones atmosféricas, y la variación del contenido clorofílico en hoja, requiriendo métodos mediante simulación con modelos físicos de estrategias para evaluar su impacto en la estimación de IAF (Haboudane *et al.*, 2002; 2004).

El Renormalized Difference Vegetation Index (RDVI) propuesto por Rougean y Breon (1995) y MSR (Modified Simple Ratio) propuesto por Chen (1996) han sido desarrollados con el objetivo de mejorar el NDVI. El RDVI ha sido propuesto para combinar las ventajas del Difference Vegetation Index ($DVI=R_{NIR}-R_{RED}$; Jordan, 1969) y el NDVI, para bajos y altos valores de IAF, respectivamente (Haboudane *et al.*, 2004). Estos índices se basan también en las diferencias existentes en las bandas del rojo e infrarrojo cercano (670nm-800nm) y fueron obtenidos para conseguir una relación lineal con variables biofísicas, como el IAF (Haboudane *et al.*, 2004).

Spanner *et al.* (1990) y Curran (1983) describieron los mismos problemas de contribución de la reflectancia del suelo, y la relación asintótica para elevados valores de IAF, proponiendo el Simple Ratio Index (SR) (Jordan, 1969; Rouse *et al.*, 1974) en cubiertas densas. El índice MSR (Modified Simple Ratio) propuesto por Chen (1996) ha sido propuesto para mejorar NDVI (debido a su sensibilidad a los parámetros biofísicos de la vegetación) mediante combinaciones con SR. MSR y SR son considerados más linealmente relacionados con los parámetros de vegetación (Haboudane *et al.*, 2004). Para reducir la influencia de las propiedades ópticas de suelo, se desarrollaron índices centrándose en las mismas bandas que los anteriores, basándose en la existencia de una “línea de suelo” en el rango espectral rojo-infrarrojo cercano, es decir, estos índices asumen que hay un eje principal de la variación espectral del suelo.

El Soil-Adjusted Vegetation Index (SAVI) (Huete, 1988) fue propuesto como índice de vegetación al nivel del suelo para reducir la contribución de la reflectancia del suelo, incluyendo un factor L que es inversamente proporcional a la densidad de vegetación. La optimización del coeficiente L necesita de un conocimiento previo sobre la cantidad de vegetación existente, pero en la ausencia de esto, Huete (1988) sugirió un valor óptimo de 0,5 para contabilizar en primer lugar las variaciones del fondo del suelo. Un pequeño cambio fue propuesto por Rondeaux *et al.* (1996), con el Optimized Soil-Adjusted Vegetation index (OSAVI), efectuando un ajuste del factor L que toma un valor de 0,16 para aplicaciones generales, con objeto de minimizar las variaciones debidas a la contribución del suelo. Para mejorar el índice SAVI, teniendo en cuenta las diferencias del fondo del suelo, Qi *et al.* (1994) desarrollaron el Modified Soil-Adjusted Vegetation Index (MSAVI), donde el factor L no aparecía. Broge y Leblanc (2000) utilizó modelos de transferencia radiativa, demostrando que MSAVI fue el mejor estimador de IAF en cubiertas densas en términos de su sensibilidad, estando menos afectado por las variaciones de la cubierta vegetal así como por las propiedades espectrales de suelo.

Índices que incorporan bandas en la región del verde y del borde del rojo del espectro electromagnético han sido una línea de trabajo de gran interés con objeto de medir la absorción de la luz por la clorofila en la región del rojo (670 nm). El CARI (Chlorophyll Absorption Ratio Index) fue desarrollado por Kim *et al.* (1994) para medir la intensidad de absorción de la clorofila a 670 nm relativamente al pico de reflectancia del verde a 550 nm y a la reflectancia a 700 nm. Kim *et al.* (1994) introdujo el ratio (R_{700}/R_{670}) para minimizar la combinación del efecto de reflectancia del suelo y para reducir la variabilidad de la reflectancia de cubierta debido a los materiales no fotosintéticos. Por otro lado, Gitelson y Merzlyak (1996) encontraron una fuerte correlación entre el contenido clorofílico en hoja y los ratios de reflectancia R_{750}/R_{550} y R_{750}/R_{700} . El MCARI (Modified Chlorophyll Absorption Ratio Index) desarrollado por Daughtry *et al.* (2000) surgió como una modificación del CARI, demostrando que presentaba un gran potencial para medir IAF. Aunque su desarrollo fue inicialmente para ser sensible a la variación de la clorofila, Daughtry *et al.* (2000) observó que el IAF, contenido clorofílico e interacción IAF-clorofila explicaban respectivamente, 60, 27 y 13 % de la variación del índice MCARI.

Haboudane *et al.* (2004) desarrollaron MCARI 1, una modificación de MCARI, en que se suprimió el cociente ($R_{700}-R_{670}$) para disminuir la sensibilidad a los efectos de la clorofila y se integró la banda del infrarrojo cercano, para incrementar la sensibilidad en cambios de IAF. Posteriormente, los índices combinados que utilizan nuevas bandas para medir la absorción de la luz debido a la clorofila en la región del rojo (670 nm), se propusieron para minimizar el efecto del suelo y maximizar la sensibilidad al contenido clorofílico (C_{a+b}). Haboudane *et al.* (2002) obtuvieron buenas estimaciones de C_{a+b} en cultivos de cereal en diferentes estados de crecimiento, usando el índice combinado TCARI/OSAVI, probando su robustez a la variación del IAF e influencia del suelo.

Broge y Leblanc (2000) inspirados en el principio general del CARI desarrollaron el TVI (Triangular Vegetation Index), para caracterizar energía radiante absorbida por los pigmentos foliares en función de la diferencia relativa entre la reflectancia en el rojo e infrarrojo cercano junto con la magnitud de reflectancia en la región del verde. El TVI es calculado como el área definida por el pico del verde, el infrarrojo cercano, y reflectancia mínima en la región del rojo, basándose en el hecho de que el área total definida por el triángulo (verde, rojo e infrarrojo) aumenta como resultado de la absorción de la clorofila (disminución de la reflectancia en el rojo) y por la abundancia del tejido foliar (aumento de reflectancia en el infrarrojo). Haboudane *et al.* (2004) demuestran que el aumento de la concentración de la clorofila resulta en una disminución de la reflectancia en el verde, llevando por lo tanto a una disminución relativa del área del triángulo. Además, aunque no haya absorción de clorofila más allá de 700 nm, los efectos indirectos de la curva de reflectancia de la vegetación son observables alrededor del borde del rojo por encima de 750 nm.

Posteriormente, el índice MTVI 1 fue desarrollado por Haboudane *et al.* (2004) para mejorar la sensibilidad del TVI a estimaciones de IAF. La transformación se basó en el hecho de que el aumento de la concentración de clorofila origina cambios de reflectancia en el borde del rojo (“red-edge”) introduciendo cambios en la reflectancia a 750 nm que representan el comienzo de la zona del infrarrojo cercano. Por ello, MTVI 1 utiliza las bandas a 800 nm (donde la reflectancia es afectada por cambios en la estructura de la cubierta y hojas, siendo insensible a cambios en el nivel de pigmentos) en lugar de 750 nm. Con objeto de reducir los efectos del fondo del suelo, manteniendo

la sensibilidad al IAF y la resistencia a la influencia de la clorofila, se desarrollaron dos nuevas modificaciones de índices anteriormente descritos, MCARI 2, MTVI 2 Haboudane *et al.*, (2004), en las que aparecían las bandas del verde, rojo, e infrarrojo cercano (550, 670, 800 nm).

Otros índices de vegetación de banda estrecha localizados en la región espectral del *red edge* (690-750 nm) están mencionados en la literatura sobre la relación existente con el contenido clorofílico en hoja (C_{a+b}). Algunos de los más importantes son los parámetros espectrales de *red-edge* relacionados con contenido clorofílico en *Acer saccharum* M. (Vogelmann *et al.*, 1993) utilizando el punto de inflexión λ_p (máximo de la primera derivada de la reflectancia), R_{740}/R_{720} , así como índices derivativos como D_{715}/D_{705} . Índices desarrollados por Peñuelas *et al.* (1995) como Simple Ratio Pigment Index, SRPI (R_{430}/R_{680}) demuestran su relación con la concentración carotenoides/clorofila-a. Normalized Phaeophytinization Index (NPQI) calculado como $(R_{415}-R_{435})/(R_{415}+R_{435})$ está basado en la degradación de la clorofila (Barnes *et al.*, 1992), demostrado por diferentes estudios como índice sensible al grado de estrés (Peñuelas *et al.*, 1995; Lorenzen y Jensen, 1989; Ahern, 1988). Photochemical Reflectance Index (PRI) es un índice fisiológico relacionado con la eficiencia fotosintética (Gamon *et al.*, 1992), calculado como $(R_{550}-R_{531})/(R_{550}+R_{531})$ (Gamon *et al.*, 1992; Filella *et al.*, 1996). Normalized Pigment Chlorophyll ratio Index (NPCI) calculado como $(R_{680}-R_{430})/(R_{680}+R_{430})$ y otros índices asociados con cambios fisiológicos en nitrógeno han demostrado ser sensibles a la variación del contenido clorofílico (Peñuelas *et al.*, 1994).

El estudio de Zarco-Tejada *et al.* (2001) con índices ópticos demostró que índices calculados en la región espectral del *red edge* obtuvieron mejores resultados en la estimación de C_{a+b} , como Vogelmann (R_{740}/R_{720}); Gitelson y Merzylak (R_{750}/R_{700}); Carter (R_{695}/R_{760}); Zarco-Tejada y Miller (R_{750}/R_{710}).

En los años 80, Goel y sus colaboradores (Goel y Strebel, 1983; Goel y Thompson, 1984; Goel y Grier, 1986; Goel y Deering, 1985) propusieron el concepto “inversión de modelos” que surge como una alternativa al uso de modelos empíricos para la estimación de variables biofísicas y bioquímicas, y consiste en ajustar los valores de dichas variables usados como entradas de los modelos de transferencia radiativa, de tal manera que la reflectancia simulada con ellos se aproxime lo más

posible a la medida por el sensor. Estos modelos de transferencia radiativa simulan, por tanto, la llamada función de reflectancia bidireccional (BDRF), la cual permite el cálculo de la reflectancia de una superficie en función de los ángulos de observación e iluminación, así como de una descripción de las características biofísicas y radiativas de la misma. Desde los primeros trabajos, la inversión de modelos se ha convertido en un método muy prometedor, puesto que es teóricamente más objetivo, más generalizable, y más preciso que las técnicas empíricas (Jacquemoud, 1993; Qi *et al.*, 1995; Kimes *et al.*, 2000; Gemmel *et al.*, 2002). Otra ventaja de la inversión física de modelos es el hecho de poder usar toda la información radiométrica aportada por el sensor; contrariamente a los índices de vegetación que fundamentalmente usan dos bandas (rojo e infrarrojo cercano). La información contenida en las diferentes bandas de un sensor nunca está completamente correlacionada espectralmente y, por tanto, su uso siempre aporta información adicional (Kuusk, 1998). No obstante algunos estudios demuestran que existe un número óptimo de bandas, dependiente del tipo y número de variables estimadas y del sensor y método de inversión empleado para cada estimación (Weiss, 2000).

El modelo SAIL descrito por Verhoef (1984) ha sido testado en muchos estudios de estimación de IAF usando las técnicas de inversión (Goel y Thompson, 1984a,b; Goel y Grier, 1987; Jacquemoud, 1993). Los parámetros de entrada de este modelo para predecir los valores de reflectancia, incluyen las propiedades ópticas de las hojas y de la superficie del suelo, estructura (distribución del ángulo foliar; densidad de área foliar), y densidad de la cubierta (índice de área foliar). Los métodos físicos actuales de investigación para la estimación de variables bioquímicas a nivel de hoja, y biofísicas de la cubierta vegetal se basan en la unión de modelos de transferencia radiativa de hoja como PROSPECT (Jacquemoud y Baret, 1990), LEAFMOD (Ganapol *et al.*, 1998), LIBERTY (Dawson *et al.*, 1998) con modelos de cubierta de simulación de la reflectancia. Modelos de cubierta de tipo geométrico como Geometrical-Optical Radiative-Transfer (GORT) (Ni *et al.*, 1999), FLIM (Rosema *et al.*, 1992), modelos *turbid-medium* como SAILH (Verhoef, 1984), su reciente modificación GeoSAIL (Huemmrich, 2001), y modelos 3-D de tipo Monte Carlo como SPRINT (Goel y Thompson, 2000) o como los de tipo geométrico de gran complejidad para simulación de las sombras y suelo (Myneni *et al.*, 1991; Li *et al.*, 1995; North 1996; Gastellu-Etchegorry *et al.*, 1996; Goel y Thompson, 2000) permiten la simulación de la

reflectancia de cubiertas vegetales a partir de variables que definen la geometría y estructura de la vegetación.

Ambas metodologías basadas en técnicas empíricas y modelos de inversión tienen ventajas y desventajas. Las relaciones empíricas IAF–IV son simples y fáciles de ejecutar; pero exigen un número variable de ecuaciones que relacionan las variables de estudio e IV para diferentes tipos de vegetación, debido a que es requerido un conocimiento previo del tipo de vegetación para determinar los coeficientes empíricos de las ecuaciones. Otro inconveniente se debe a que ninguno de los IV ha conseguido eliminar completamente las influencias no deseadas como la atmósfera, suelo, arquitectura de la cubierta vegetal y la topografía (Gao *et al.*, 1997; Baret y Guyot, 1991). Además, su uso no permite estimar más de una variable al mismo tiempo, la cual ha de ser específicamente calibrada mediante una ecuación empírica cuya forma matemática y coeficientes son particulares para cada estimación (Qi *et al.*, 2000). Por otro lado, la inversión de modelos es físicamente basada e independiente del tipo de vegetación. Todavía requiere un tiempo sustancial para la formulación de la inversión del modelo, y la inversión puede no ser siempre convergente con la reflectancia real (Qi *et al.*, 2000).

Los métodos tradicionales de teledetección vienen utilizando algunos de los IV de banda ancha calculados a partir de sensores como el TM y ETM del satélite Landsat TM (con resolución espacial de 30 m en modo multiespectral y 15 m en modo pancromático), el HRV (Haute Resolution Visible) y HRVIR (Haute Resolution Visible Infrared) del satélite SPOT “Satellite Probatoire d’ Observation de la terre” (resolución espacial de 20 m en modo multiespectral y 10 m en modo pancromático), y el sensor AVHRR (Advanced Very High Resolution Radiometer) del satélite NOAA-National Oceanic and Atmospheric Administration” (resolución espacial de 1.1 km). A su vez, dichos métodos, basándose en la detección de la radiación reflejada en un número reducido de bandas espectrales (de 1 banda a 7 normalmente) y de resolución espectral ancha (ancho de banda de 100-200 nm), vienen demostrando su eficacia en la estimación de variables biofísicas (IAF, porcentaje de cobertura del suelo, área basal, diámetro, volumen, etc) pero no tienen capacidad de realizar estimaciones de variables bioquímicas como contenido clorofílico, contenido de agua, o materia seca de la

vegetación al integrar toda la radiación reflejada en bandas demasiado anchas y en regiones espectrales no sensibles a dichos constituyentes.

La mayoría de los trabajos viene utilizando solamente un conjunto de datos para establecer relaciones entre los índices de vegetación y el IAF, no teniendo en consideración su variación estacional e interanual. Sin embargo, trabajos como el de Spanner *et al.* (1990) examinaron la variabilidad estacional del índice de vegetación Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) con el IAF ajustado por ondas senoidales, demostrando que las diferencias estacionales observadas en imágenes obtenidas por el AVHRR se relacionaban con alteraciones fenológicas en el IAF, con los tipos de cubiertas vegetales influenciando la reflectancia espectral, así como con una larga variación del ángulo solar cenital, permitiendo la predicción de la variación de las relaciones NDVI-IAF durante todo el año. Roderick *et al.* (1996) evaluaron la precisión de NDVI calculado a partir de las medidas de reflectancia obtenidas por el sensor AVHRR, basándose en el principio de que la cuantificación de la señal de reflectancia es la única fuente del error, detectando que las áreas oscuras (de baja reflectancia) y un largo ángulo cenital potencian una pérdida de precisión de NDVI. Goward *et al.* (1991), describiendo que el NDVI derivado del sensor AVHRR parece ser poco fiable si el ángulo cenital solar es mayor de 80°.

Varios son los trabajos que han evaluado el potencial de los satélites SPOT HRV y TM en la estimación de parámetros biofísicos que caracterizan una masa forestal. Chavez y Bowell (1988) (citados en Ripple *et al.*, 1991), comparando la información espectral del TM y HVR en diferentes áreas geológicas, urbanas y agrícolas. Dichos trabajos verificaron que el sensor TM contenía más información espectral que los datos multiespectrales obtenidos por el SPOT HVR. Brockhaus *et al.* (1988) citados en Ripple *et al.* (1991) comparando estos dos satélites observaron que varias bandas espectrales estaban significativamente correlacionadas con el área basal y la edad de los árboles, aunque también concluyeron que estas correlaciones fueron bajas al utilizarlas en el desarrollo de modelos predictivos. Ripple *et al.* (1991) encontraron relaciones inversas entre el volumen del tronco y las bandas espectrales de ambos sensores ($p < 0,01$), encontrando las mejores correlaciones entre el volumen del tronco y las bandas del infrarrojo cercano (HVR banda 3 $r = -0,89$; TM banda 4 $r = -0,83$).

Las bandas espectrales del rojo (banda 3: 630–690 nm), infrarrojo (banda 4: 760–900 nm), y el infrarrojo medio (banda 5: 1550–1750 nm) provenientes del satélite Landsat TM pueden potencialmente ser usadas para estimar IAF (Peterson *et al.* 1989). Para determinar si es posible estimar la variabilidad del IAF a lo largo del año (designado en su estudio por IAF estacional), Curran *et al.* (1992) utilizaron imágenes de 16 parcelas de pinos (*P. elliotii* Engeln.) fertilizadas y una como testigo obtenidas por el satélite Landsat TM en tres fechas distintas de Febrero, Septiembre y Marzo. Los autores obtuvieron relaciones lineales existentes entre el índice de vegetación NDVI y el IAF con coeficientes de determinación (r^2) de 0.35, 0.75, y 0.86 en cada una de las 3 fechas respectivamente. Relaciones predictivas basadas en datos de 8 de las parcelas fueron usadas para estimar IAF de otras 8 parcelas, con un error cuadrático medio de 0,74, demostrando así el potencial del uso del satélite Landsat TM para estudiar la dinámica de IAF en masas forestales.

Fassnacht *et al.* (1997) evaluaron la utilidad del satélite Landsat-5 Thematic Mapper (TM) en masas forestales puras de especies de hoja caduca (*Pinus banksiana* y otras), coníferas (*Acer saccharum* y otras), y mixtas, utilizando las bandas espectrales del sensor y varios índices de vegetación (IV) calculados a través de la reflectancia espectral medida por el satélite, que han sido relacionados con el IAF (relativo a cubierta de residuos) en 24 parcelas de estudio. De las bandas espectrales o IV considerados, se obtuvieron fuertes correlaciones con el IAF de las especies de coníferas ($r^2=0.69-0.73$). Para las especies arbustivas la mejor banda espectral o IV fue el verde / infrarrojo medio ($r^2=0.35$), aunque una banda adicional y dos IV demostraron mejores resultados ($r^2=0.60-0.73$).

El potencial de los índices de vegetación espectral NDVI, SR y SAVI en la estimación del IAF ha sido evaluado por Turner *et al.* (1999), mediante imágenes obtenidas por el satélite Landsat 5 Thematic Mapper en 3 zonas forestales incluyendo distintos tipos de vegetación (cultivos herbáceos, zonas arbustivas, áreas de caducifolias y coníferas). Observaron en general para todas las zonas de estudio fuertes relaciones existentes entre los IV y el IAF, incrementándose para valores de IAF entre 3-5. En coníferas la sensibilidad de los IV fue menor para valores de IAF por encima de 5, debido a la disminución de la reflectancia en el infrarrojo asociada a la complejidad de este tipo de vegetación en poblaciones de mayor crecimiento. En efecto, la reflectancia

del rojo e infrarrojo tiene relativa importancia en la determinación de la sensibilidad máxima de los IV, que difiere dependiendo del tipo de vegetación en cuestión (Turner *et al.*, 1999).

Sensores aerotransportados de tipo hiperespectral como el AVIRIS (Airborne Visible/Infrared Imaging Spectrometer; NASA Jet Propulsion Laboratory, California Institute of Technology, Pasadena, CA, EEUU), CASI (Compact Airborne Spectrographic Imager; ITRES inc., Calgary, Alberta, Canadá), AHS (Airborne Hyperspectral Scanner; Daedalus Enterprise Inc., WA, EEUU) que permiten obtener imágenes en un conjunto de bandas estrechas de alta resolución espectral, nos dan la posibilidad de optimizar la estimación de variables biofísicas o constituyentes bioquímicos.

Las características espaciales y espectrales de la imagen en el infrarrojo y en el rojo varían entre sensores, por lo que los valores de los índices de vegetación y las relaciones empíricas desarrolladas con variables biofísicas no pueden ser comparadas directamente. Teillet *et al.* (1997) demostraron el impacto en alteraciones del ancho de banda espectral y de la resolución espacial en el NDVI calculado a partir de los datos obtenidos por el sensor AVIRIS, de 20 m de resolución espacial y 224 bandas espectrales, con aproximadamente 10 nm de ancho de banda. Los autores observaron que NDVI está significativamente afectado por diferencias en el ancho de banda especialmente para la zona del rojo y que las alteraciones en la resolución espacial no tuvieron tanta influencia, pero sí detectaron más efectos específicos de la cobertura del suelo en el NDVI.

Remontándonos a la primeras investigaciones de Held y Jupp (1994), Blackburn y Milton (1994), y Milton y Rolin (1994) con el sensor CASI, para el sector forestal, en estudios de monitorización ambiental y clasificación del uso del suelo, considerando el comportamiento fenológico de la vegetación, no quedan dudas acerca del potencial de este sensor óptico de barrido hiperespectral (con resolución espacial de 1 a 10 m operando en el rango de longitud de onda que va de 430 a 950 nm), a pesar de no disponer de información radiométrica en el infrarrojo medio y térmico.

Haboudane *et al.* (2004) utilizando imágenes obtenidas por el CASI de diferentes cultivos agrícolas (soja, maíz, y trigo) en varios estados de crecimiento y condiciones de fertilización, validaron los índices de vegetación (MTVI 1, MCARI 1,

MTVI 2, y MCARI 2) mediante el uso del Li-Cor 1800-12 (Lincoln, Nebraska, EEUU), y demostraron que ambos son menos sensibles al contenido clorofílico y más linealmente relacionados con el IAF en vegetación verde. A la inversa, dos de estos índices, MTVI 2 y MCARI 2, probaron ser buenos predictores de IAF, con coeficientes de determinación (r^2) de 0.98, 0.89 y 0.74, y errores cuadráticos medios de 0.28, 0.46 y 0.85 para soja, maíz y trigo respectivamente.

Trabajo pendiente consiste en la realización del seguimiento adecuado de la vegetación en cubiertas de tipo discontinua como *Olea europaea* L., donde hay distintos marcos de plantación, en que la arquitectura vegetal, sombras, y suelo desnudo afectan directamente la señal de reflectancia recibida por el satélite. Se requieren sensores hiperespectrales de alta resolución espacial que permitan la validación de modelos de simulación y posterior estimación de variables biofísicas a nivel de copa en grandes extensiones, separando los efectos del suelo y de la vegetación. Para ello, nuevos sensores instalados en satélites como QUICKBIRD (DigitalGlobe, Inc., Longmont; Colorado, EEUU) o Ikonos (Space Imaging Corp., Thorton, Colorado, EEUU), surgen como alternativa a los sensores de banda espectral ancha y baja resolución espacial, debido a sus características multiespectrales y resolución espacial alta. El satélite QUICKBIRD tiene resolución espacial de 2,5 m en modo multiespectral y 0.6 m en modo pancromático, mientras que, el satélite Ikonos tiene una banda pancromática (400–700 nm) con 0.8 m de resolución espacial, así como cuatro bandas multiespectrales (450, 550, 680, y 800 nm), cada una con 4 m de resolución espacial (Franklin *et al.*, 2001).

En la literatura pocos son los trabajos existentes en aplicaciones de vegetación con satélites de alta resolución espacial. Azuaya *et al.* (2003) evaluaron el potencial de los satélites de alta resolución QUICKBIRD e Ikonos para analizar y mapear los ecosistemas terrestres y acuáticos a escala local en Minnesota, EE.UU. Los autores obtuvieron buenas correlaciones en el reconocimiento de las plantas acuáticas y subacuáticas (con aproximadamente 80% de exactitud). Para monitorizar los cambios de vegetación, Laliberte *et al.* (2004) evaluaron el porcentaje de suelo cubierto por vegetación arbustiva y herbácea durante las últimas décadas en la zona sur del Nuevo México utilizando fotografías aéreas y una imagen pancromática obtenida en 2003 por el satélite QUICKBIRD, concluyendo que ésta última fue fundamental para detectar

pequeños arbustos debido a su resolución espacial (0,6 m), evitando acometer subestimaciones en el porcentaje de especies arbustivas.

Johnson *et al.* (2003) utilizando imágenes multiespectrales obtenidas en el año 2000 por el satélite Ikonos, estudió el potencial de NDVI para estimar el área foliar de viñedos que se encontraban próximos a la maduración, situados en la costa norte de California. Para ello utilizó medidas de calibración en el terreno para convertir los mapas de NDVI en mapas de IAF y la densidad de plantación para expresar el IAF por cepa (IAF_V), obteniendo buenas correlaciones de este parámetro con el estimado mediante las imágenes de Ikonos ($r^2=0.72$; $p<0.001$). Pese a los cambios provocados debido a la naturaleza discontinua de este tipo de cultivo y a las diferencias arquitectónicas impuestas por la disposición de los brotes en sistema de espaldera, parece ser que este tipo de satélites ofrecen una base sólida para el mapeo del área foliar en viñedos con bajos niveles de IAF.

Con el objeto de estimar IAF en diferentes tipos de vegetación (viñedos y masas forestales), Colombo *et al.* (2003) estudió la eficiencia de varios índices de vegetación espectrales y texturales utilizando imágenes de alta resolución del satélite Ikonos. Según el autor cuando la información espectral es heterogénea y discontinua, el uso de la información textural de la imagen es muy útil, siendo el índice de disimilaridad un buen parámetro textural especialmente en plantaciones de tipo discontinuo

La aplicación de sensores de tipo hiperespectral y multiespectral a grandes extensiones requiere el desarrollo de métodos automáticos o semiautomáticos aplicados a imágenes de teledetección de alta resolución espacial ($<1m$) obtenidas por sensores aerotransportados y satélites, que permiten la identificación y delineación de copas y el subsiguiente análisis de parámetros biofísicos como son el diámetro y área proyectada de copa, densidad por hectárea, diámetro a la altura del pecho (DAP) extrayendo la información necesaria a nivel del árbol individual. En la bibliografía, existe una gran diversidad de trabajos en términos de clasificación automática de árboles individuales (Gerylo *et al.*, 1998; Gougeon, 1995b; Key *et al.*, 2001; Pouliot *et al.*, 2002; Culvenor, 2002; Leckie *et al.*, 2003; Leckie *et al.*, 2005) en imágenes multiespectrales de alta resolución espacial utilizando distintos métodos.

Según Disperati y Oliveira-Filho (2002) los tres métodos fundamentales para delinear o localizar copas individuales en imágenes de alta resolución son: i) detección del local de intensidad máxima ("Método del máximo local"); ii) método basado en contorno ("contour-based methods"); y iii) método basado en la combinación de patrones ("template-based matching"). Los métodos no son comparables entre sí, ya que utilizan diferentes principios basados en los niveles de información de las imágenes.

La mayoría de aproximaciones para localizar y delinear las copas utiliza el principio común de que los árboles generalmente aparecen como objetos brillantes ("peaks") rodeados por áreas oscuras y sombreadas ("valleys") (métodos del máximo local). El máximo local es considerado como el centro radiométrico de la copa, siendo indicativo (pero no necesariamente coincidente) del centro geométrico de la copa, mientras que el mínimo local es usado para definir el límite de la copa (Culvenor, 2002). La aproximación de la posición del máximo local consiste en identificar en la imagen los píxeles más brillantes representando la localización de la copa del árbol, pero no la delimitación de la misma (Dralle y Rudemo, 1997; Wulder *et al.*, 2000). Ese punto es determinado a través de una ventana (dimensión del filtro) un poco mayor que el tamaño de la copa de árbol en la imagen. Algunos métodos usan el máximo local como punto de partida para intentar encontrar el límite de la copa mediante la estructura de la intensidad de brillo en la imagen (Culvenor, 2002; Pinz, 1991; Pouliot *et al.*, 2002). Pinz (1991) identifica el máximo local y examina los cambios de intensidad de brillo en el interior de círculos concéntricos fuera de cada máximo local para determinar si realmente se trata de una copa de árbol con objeto de estimar su radio. Culvenor (2002) determina la posición del máximo local extendiendo los transectos hacia fuera para regiones de mínima intensidad de brillo, representando sombras que determinan el límite de la copa. Estos métodos del máximo local son más eficientes en zonas de cubiertas vegetales densas, donde existan sombras entre los árboles (Leckie *et al.*, 2003).

Las copas de los árboles pueden ser delimitadas usando el "Algoritmo Valley-Following" (Gougeon, 1995a; Gougeon y Leckie, 2003), que determina y utiliza básicamente las zonas de áreas sombreadas o de baja intensidad de luz entre copas de árboles ("Valleys" radiométricos), y a través de ellas la restante área vegetal es

delimitada dentro de líneas circulares. Esta aproximación está influenciada por la estructura de la imagen, teniendo en consideración la pendiente de la ladera.

Otro tipo de métodos permite la consideración de áreas sombreadas entre las copas ya que utiliza combinaciones de patrones de copas ("template-based matching") a través de los cuales las interpretaciones matemáticas de la apariencia de los árboles de diferentes tamaños, formas y condiciones de visibilidad son contrastadas con la intensidad de brillo para localizar los árboles y determinar el tamaño de copa. Este método, jugando con la combinación de patrones, genera un modelo en que los árboles pueden ser vistos bajo diferentes condiciones de iluminación y visibilidad, analizando dichos factores en la imagen (Quackenbush *et al.*, 2000). Esta metodología permite la localización de los árboles, estimación del tamaño de las copas, y un modelo de salida que mejora el ajuste de identificación de la copa.

Otros métodos se basan en agrupaciones de textura (Warner *et al.*, 1999), operaciones morfológicas (Barbezat y Jacot, 1999), y uniones de aristas de forma convexa (Brandtberg y Walter, 1998) que han sido también explotados con éxito. Warner *et al.* (1999) usaron la dirección del local mínimo de textura como la indicadora del aislamiento de las copas, siendo relacionada con frecuencia con la fracción del suelo sombreada entre las copas, es decir, aplicaron la textura direccional para grupos de píxeles y grupos adyacentes de píxeles dentro de la copa en algoritmos específicos designados para coberturas arbustivas densas. Brandtberg y Walter (1998) perfeccionaron la delineación de los árboles, usando segmentos de bordes convexos sombreados y los máximos locales, que fueron combinados para localizar los árboles.

Pese a la importancia y extensión en la UE de cultivos como *Olea europaea* L., la aplicación de métodos de teledetección hiperespectral y modelos de transferencia radiativa a nivel de hoja y de cubierta en dichos cultivos no se encuentra en estado avanzado, demostrándolo las pocas publicaciones existentes al respecto. Por lo tanto, la validación de modelos de simulación en cubiertas de tipo discontinua como el olivar, en que la arquitectura vegetal, sombras, y suelo desnudo afectan directamente la reflectancia, necesitan la utilización de sensores multiespectrales de alta resolución espacial, como son el sensor aerotransportado CASI (Compact Airborne Spectrographic Imagery) y satélite QUICKBIRD para la estimación de variables biofísicas y

constituyentes bioquímicos foliares. Este sistema de análisis y tratamiento de imágenes nos permite obtener información espacial de toda la finca, lo cual nos posibilita la obtención de valores de variables biofísicas como el área proyectada de copa, transmitancia de copa e índice de área de planta en árboles individuales.

Para ello, se han planteado los siguientes objetivos en este trabajo:

1. Estudio de métodos adecuados de estimación del área proyectada por la copa en olivar, mediante algoritmos de identificación y delineación automática de copas utilizando imágenes del sensor aerotransportado CASI de alta resolución espacial y espectral, estudiando su aplicabilidad al satélite QUICKBIRD.

2. Estimación del volumen de copa a partir del área proyectada de copa obtenida a partir de imágenes del sensor aerotransportado CASI, estudiando la transferencia de métodos al satélite QUICKBIRD para monitorización operativa.

3. Estimación de la transmitancia de copa e índice de área de planta a través de técnicas de análisis de imágenes del sensor CASI, utilizando índices de vegetación de tipo multi e hiperespectral, con objeto de estudiar su distribución y comportamiento, así como su posible estimación a partir de imágenes de satélite QUICKBIRD.

4. Estudio de la transferencia de métodos desarrollados en sensor aerotransportado CASI a satélite QUICKBIRD para su aplicación a imágenes de satélite de forma operativa, permitiendo la realización de mapas de distribución espacial de variables biofísicas en grandes zonas olivar.

2. MATERIALES Y MÉTODOS

2.1 Datos de Campo

2.1.1 Descripción de las Parcelas Experimentales de Olivar

Las medidas de campo realizadas para validación posterior de los métodos propuestos se efectuaron en dos parcelas de olivar localizadas en la Comunidad de Andalucía (Figura 1) de muy diferentes características en cuanto a arquitectura y geometría de la copa, densidad de plantación y manejo, con el fin de asegurar una gran variabilidad en densidad e índice de área foliar entre olivos. La primera parcela de validación corresponde a un olivar tradicional extensivo, con olivos muy heterogéneos y gran variabilidad en cuanto a estructura, volumen y superficie proyectada de la copa. La segunda parcela utilizada en este estudio corresponde a un olivar intensivo, con olivos de copas muy homogéneas y pocos huecos.



Figura 1- Mapa de situación de las parcelas experimentales, localizadas en Andalucía, España. El olivar extensivo está situado en la provincia de Jaén, municipio de Alcaudete y el intensivo se encuentra localizado en Córdoba capital.

La parcela de olivar extensivo se encuentra situada en la finca “El Tobazo”, en Alcaudete (Jaén), sobre un suelo clasificado como Cambisol Cálxico. El relieve de la finca es muy variable, desde zonas casi llanas a zonas con pendiente elevada.

Corresponde a un olivar ‘tradicional’ de secano de la variedad ‘Picual’, con olivos de 2-3 pies de aproximadamente 100 años, plantados a un marco amplio (12 m x 12 m).

En este olivar se seleccionaron un total de 66 árboles en el año de 2003, mientras que en el año de 2004 se realizó un estudio específico y muy detallado en 20 de los 66 árboles seleccionados en el año anterior, con el fin de obtener un amplio intervalo en cuanto a densidad, índice de área foliar y porcentaje de cubierta en distintas zonas de la parcela (Figura 2).

La parcela de olivar intensivo está localizada en la finca “Alameda del Obispo” del Centro de Investigación y Formación Agraria (CIFA), en Córdoba, sobre un suelo clasificado como Typic Xerofluvent. La parcela es prácticamente horizontal y los olivos se riegan mediante un sistema de riego localizado. Se trata de una plantación joven de 10 años de la variedad ‘Arbequino’, con olivos de un solo pie plantados a un marco de 3,5 m x 7 m (408 árboles/ha). Los olivos presentan gran homogeneidad en cuanto a altura, volumen y superficie proyectada de copa. En esta parcela se seleccionaron un total de 29 árboles en el año 2003, de forma que reflejaran la máxima variabilidad existente en área foliar y tamaño de la copa (Figura 3).

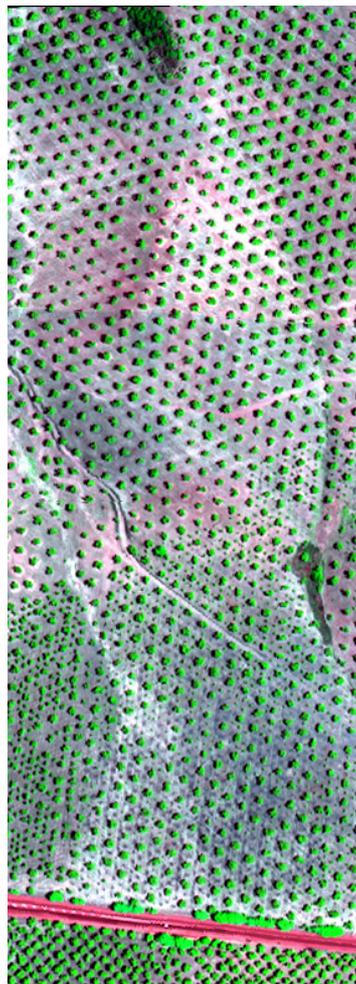


Figura 2- Aspecto general del olivar extensivo (arriba) y la imagen obtenida por el sensor aerotransportado CASI (abajo). Finca “El Tobazo”, en Alcaudete (Jaén).

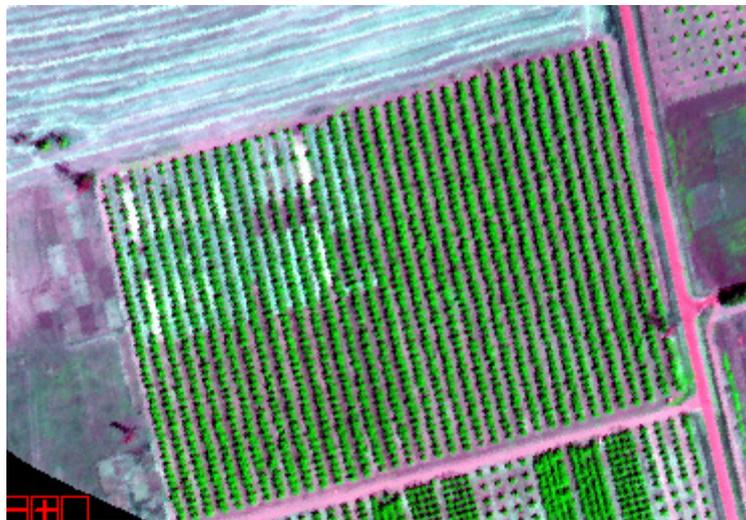


Figura 3- Aspecto general del olivar intensivo (arriba), mostrando la imagen obtenida por el sensor aerotransportado CASI (abajo). Finca “Alameda del Obispo”, C.I.F.A. de Córdoba.

Las dos parcelas de olivar descritas se utilizaron para la realización de medidas de transmitancia de copa y medidas de tipo geométrico de copa, como densidad de área de planta, área proyectada por la copa, volumen de copa, espesor de copa e índice de área de planta.

2.1.2 Medidas de Transmitancia de Copa y Cálculo de la Densidad de Área de Planta

La cantidad de radiación que se transmite a un punto situado debajo de una cubierta vegetal está directamente relacionada con la densidad de hojas y tallos, con la distribución y orientación espacial de las hojas y con el espesor de dicha cubierta (Ross, 1975; Norman y Welles, 1983). Por lo tanto, la densidad de área foliar (DAF, área foliar por unidad de volumen de la cubierta, $m^2 m^{-3}$), o el índice de área foliar (IAF, superficie foliar por superficie de suelo, $m^2 m^{-2}$), de una cubierta vegetal puede ser deducida a partir de la medida de la radiación incidente realizada sobre y debajo de dicha cubierta.

La transmitancia de la radiación, relación entre el flujo incidente y el transmitido por una superficie, a través de una cubierta vegetal $T(\theta)$ puede expresarse mediante la función exponencial de extinción de la radiación (Ecuación 1) inicialmente introducidas por Ross (1975) y Norman y Welles (1983).

$$T(\theta) = e^{-G(\theta)DAF \cdot S(\theta)} \rightarrow -\ln T(\theta) = G(\theta)DAF \cdot S(\theta) \quad [1]$$

donde,

$T(\theta)$ = transmitancia de la radiación, para el ángulo cenital θ (adimensional),

$G(\theta)$ = inclinación foliar efectiva, o área proyectada media de la unidad de área foliar sobre el plano perpendicular al vector de radiación, para el ángulo θ (adimensional),

DAF = densidad de área foliar ($m^2 m^{-3}$),

$S(\theta)$ = distancia de atenuación del rayo en la cubierta, o longitud atravesada por el rayo, para el ángulo θ (m).

En olivos, las medidas de la radiación y transmitancia bajo copa realizadas con el Plant Canopy Analyzer (PCA-LAI-2000) (LI-COR Inc., Lincoln, Nebraska, USA), incluyen la superficie de todos los elementos presentes en la copa (hojas y ramas) que los rayos solares encuentran en su trayectoria. Por lo tanto, al considerar todos los elementos de la copa de la planta, se usa el término Densidad de Área de Planta (DAP, área de planta

por unidad de volumen de cubierta, m^2/m^3) en lugar de DAF (área foliar por unidad de volumen de cubierta) que se refiere sólo a las hojas verdes (Chanson *et al.*, 1991).

La fracción de la radiación que se transmite a través de la copa se relaciona con la densidad de área de planta mediante la Ecuación 2 (Ross, 1975; Norman y Welles, 1983), por lo que se puede obtener el valor de DAP en cada punto (DAP_i), conociendo los valores de Transmitancia de copa (T), Inclinación foliar efectiva (G) y Espesor de copa (S).

$$DAP = \frac{-\ln T}{G.S} \quad [2]$$

El instrumento PCA LAI-2000 permite la realización de la medida de la fracción de la radiación transmitida a través de la copa del árbol (T) comparando la radiación difusa medida por el sensor óptico encima y debajo de la copa. El sensor óptico consiste en un detector de radiación compuesto de cinco anillos concéntricos, cada uno de los cuales mide la radiación proveniente de la región del espacio que abarca, correspondiente a los ángulos cenitales medios de 6, 22, 38, 52 y 68° (Figura 4). Un filtro óptico restringe la transmitancia de radiación para longitudes de onda menores que 490 nm, con la finalidad de minimizar la dispersión de la radiación por la cubierta.

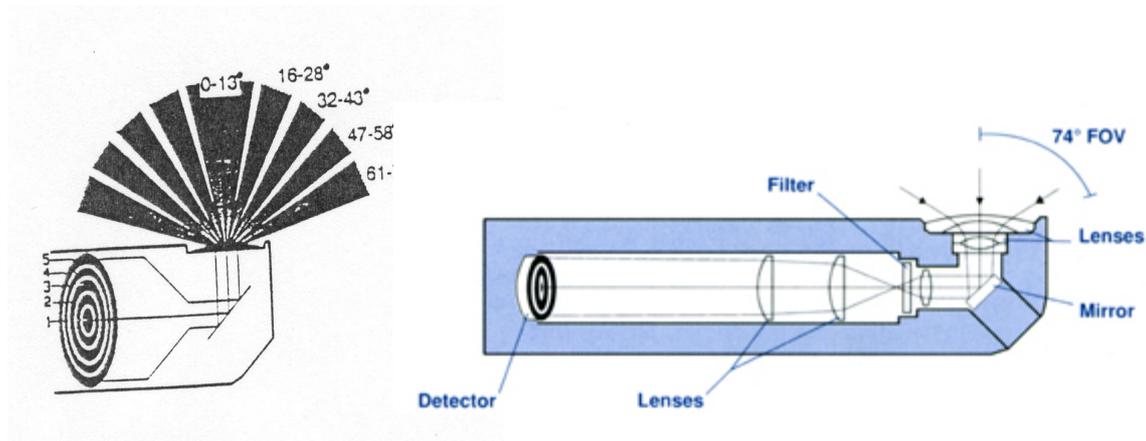


Figura 4- Esquema del sensor óptico, con los intervalos de medida de los cinco anillos concéntricos.

Dividiendo las correspondientes lecturas de radiación transmitida por la copa entre la de irradiancia cenital medida encima de la copa se obtienen cinco valores de transmitancia, que se corresponden con la región del espacio, o ángulo cenital, que abarca cada uno de los anillos (Figura 5). En las medidas realizadas con el PCA en olivos individuales, para el cálculo de la radiación transmitida, $T(\theta)$, sólo se utiliza la medida de la radiación realizada por el anillo más interior ($\theta_{\text{medio}} = 6,5^\circ$), para garantizar que se mide la radiación transmitida en el eje vertical, y obtener la transmitancia que corresponde solamente a la copa de cada árbol, eliminando los valores de radiación transmitida de otra zona de la parcela y restringiendo la región del espacio que abarca el anillo (García Morillo, 2004).

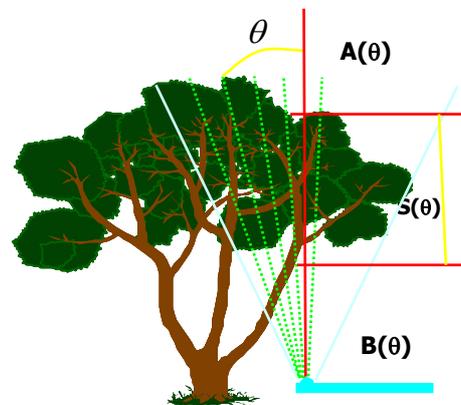


Figura 5- Aspecto general del instrumento PCA (a la izquierda) y esquema de medición de los valores de radiación transmitida por el sensor óptico (a la derecha).

Para seleccionar los puntos de medida de la transmitancia de la copa (T) en cada olivo, se dividieron los árboles en sectores circulares, con un número variable de transectos (según la heterogeneidad y tamaño de las copas) desde el pie del olivo hacia el borde de la copa (Figura 6). En la parcela de olivar intensivo, debido a la homogeneidad de los árboles, se realizaron cuatro transectos, dos en la línea de los olivos y otros dos perpendiculares a éstos. En la parcela de olivar extensivo, debido a la mayor heterogeneidad y tamaño de las copas, se trazaron ocho transectos, los cuatro anteriores y cuatro diagonales a éstos, con objeto de describir con mayor precisión las copas y tener una mejor estimación del valor de DAP de cada olivo a partir de las medidas puntuales de transmitancia (Figura 5) (García Morillo, 2004).

En cada uno de los transectos trazados en cada árbol se situaron cuatro puntos de medida, uno en el centro del olivo, dos intermedios y otro en el extremo de la copa, siendo las medidas de radiación transmitida bajo la copa realizadas solamente en los dos puntos intermedios de cada transecto (García Morillo, 2004).

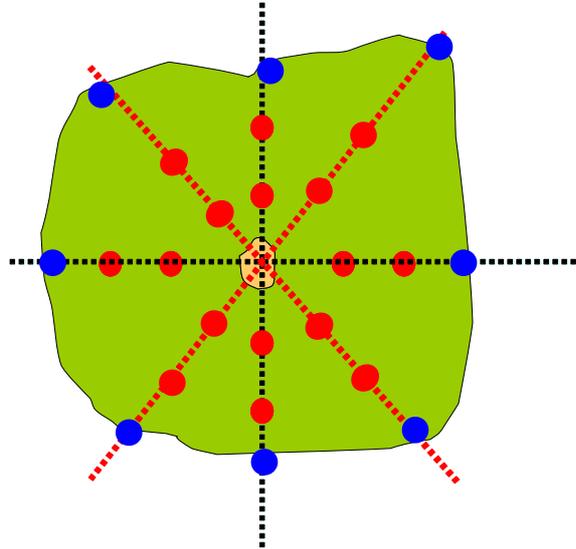


Figura 6- Esquema de un olivo, con cuatro u ocho transectos, según el protocolo de medidas realizadas en el olivar intensivo o extensivo respectivamente, sobre los que se sitúan los puntos de medida de la radiación bajo la copa.

En cada uno de los puntos de medida se midió la distancia de atenuación del rayo en la cubierta, que es el espesor de la copa o distancia recorrida por el rayo (S), siendo en nuestro caso, para el ángulo cenital considerado, el espesor de la cubierta sobre la vertical, h , en el punto de medida con el PCA. La inclinación foliar efectiva (G), para un ángulo cenital determinado, depende de la edad del olivo (Mariscal *et al.*, 1999). En nuestro caso, con un ángulo cenital $\theta_{\text{medio}} = 6,5^\circ$ y un olivar adulto, G toma un valor de 0,77, usado para el resto de los cálculos en este estudio.

En la parcela de olivar intensivo se realizaron ocho medidas de radiación bajo la copa para el cálculo de DAP, consistentes en dos medidas por transecto, mientras que en el olivar extensivo se obtuvieron dieciséis medidas de radiación bajo la copa por árbol, en los ocho transectos de cada árbol seleccionado, siguiendo la metodología descrita en García Morillo (2004). Los valores de DAP en cada uno de los puntos de medida se calcularon dividiendo la transmitancia en un punto por debajo de la copa (T) (que se obtiene a partir de las lecturas del PCA, dividiendo los valores de radiación medidos

bajo (B) y sobre la copa (A); $T = B/A$, entre el valor de inclinación foliar efectiva (G) multiplicado por el valor de espesor de copa o distancia de atenuación de la radiación (S), según la ecuación 2 descrita anteriormente.

El valor de DAP para cada olivo (DAP_O) se calcula como la media ponderada de los valores de DAP obtenidos en cada punto de medida (DAP_i), considerando el espesor correspondiente a cada punto de medida en cada transecto (S_i) y el volumen de copa, para cada transecto (V_i), según las ecuaciones 3 y 4.

$$DAP_i_pondr = \frac{\sum DAP_i \times S_i}{\sum S_i} \quad [3]$$

$$DAP_O = \frac{\sum DAP_i_pondr \times V_i_parcial}{\sum V_i_parcial} \quad [4]$$

donde

DAP_i_pondr = valor de DAP para cada radio o transecto, una vez ponderado por el espesor en cada punto de medida (cada radio o transecto tiene dos puntos de medida que son los puntos intermedios),

$V_i_parcial$ = valor de volumen de copa que se genera al girar sobre el tronco la silueta creada en cada transecto

DAP_O = valor de DAP del olivo, una vez ponderadas las medidas obtenidas en cada punto por el espesor de copa correspondiente a cada punto y por el volumen correspondiente a cada transecto.

2.1.3 Cálculo del Volumen de Copa

El volumen de copa del olivo (V , m^3) se calculó a partir de las medidas de espesor de la copa y de la distancia de los cuatro puntos de medida al tronco. Para cada transecto de cada olivo se identificaron un punto en el tronco, dos intermedios y uno en

el extremo, en los que se midió el espesor de la copa, definido por las alturas máxima y mínima de copa, y la distancia de cada punto al tronco. Todos esos puntos representados en un plano generaron una superficie plana representativa de la copa en ese transecto (Figura 7). Girando la superficie plana o silueta de la copa sobre el tronco se creó un volumen de revolución para cada transecto. El volumen de copa se obtuvo mediante la utilización de un programa informático programado en Basic (Villalobos, comunicación personal) como el valor promedio de los volúmenes parciales calculados para cada transecto (García Morillo, 2004).

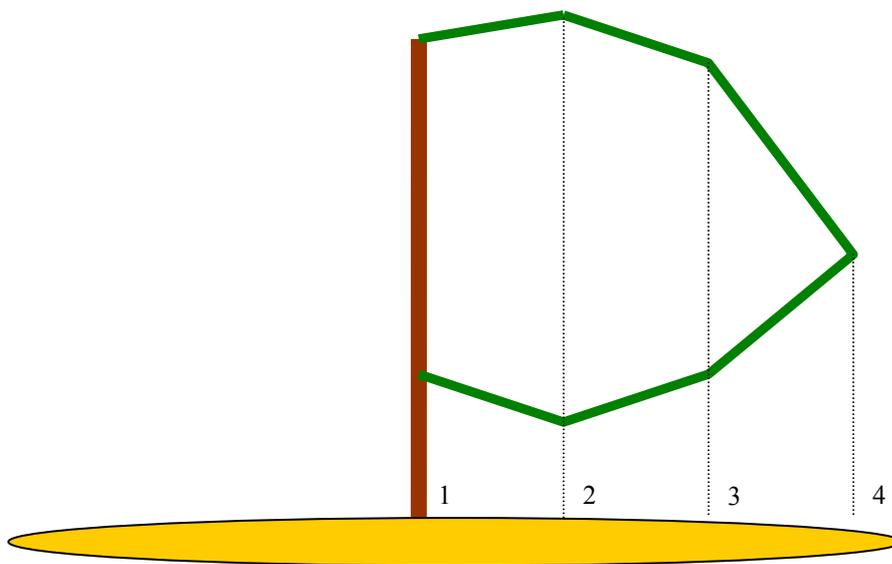


Figura 7- Esquema de la silueta formada en un eje, con los puntos de medida.

2.1.4 Cálculo del Área Proyectada de Copa

Para la medida del área máxima proyectada por la copa sobre el suelo (A_p , m^2) se dibujó sobre el terreno el contorno proyectado por la copa, para ello en cada olivo se trazó un número variable de transectos desde el punto central del olivo hacia los puntos de medida exteriores situados en el borde de la copa y se midió la longitud de cada transecto. El número de transectos varió en cada olivo según la heterogeneidad y tamaño de las copas, trazando en el año 2003 un total de 4 y 8 para el olivar intensivo y extensivo, respectivamente, mientras que en 2004 para el olivar extensivo el número de transectos aumentó desde un mínimo de 17 hasta 26 en los olivos de copa más irregular, con el objeto de obtener una mejor estimación del A_p . La superficie de copa máxima

proyectada por cada olivo se determinó sumando las áreas de los sectores circulares correspondientes a cada uno de los transectos dibujados (Figura 8). La longitud de cada uno de los transectos se consideró como el radio de un sector circular de amplitud la mitad de la total correspondiente a la limitada por los dos transectos contiguos al considerado (García Morillo, 2004).

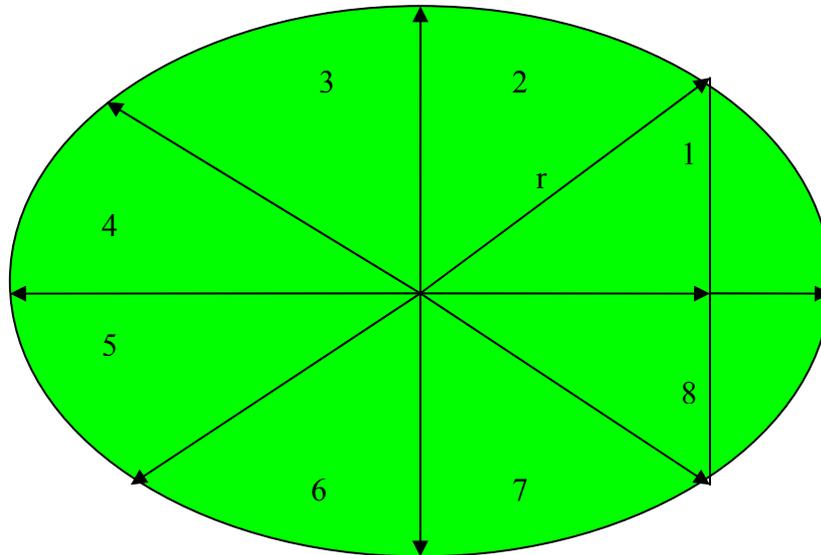


Figura 8- Esquema de los cuatro u ocho sectores elípticos creados por los ejes, dependiendo del protocolo utilizado para olivar intensivo o extensivo, respectivamente.

2.1.5 Cálculo del Índice de Área de Planta

Dado que con el PCA las medidas de radiación bajo copa incluyen la superficie de todos los elementos presentes en la copa (hojas y ramas), tal y como se ha comentado anteriormente, se ha usado el término Índice de Área de Planta (IAP, área de planta por unidad de área de suelo, m^2/m^2), en lugar de IAF. Una vez conocidos, en cada árbol seleccionada para cada una de las parcelas de olivar, la transmitancia de copa, los valores de DAPo, el volumen de copa (V) y el área proyectada máxima de la copa de cada árbol (A_p) se calculó para cada olivo, el IAP, según ecuación 5 (Ross, 1975; Norman y Welles, 1983).

$$IAP = DAPo \times V / A_p \quad [5]$$

Para el cálculo de IAP, en las medidas realizadas en olivos individuales, la superficie de suelo considerada (A_p) fue la superficie de copa máxima proyectada sobre la horizontal, sin tener en cuenta la densidad, o marco de plantación.

2.2 Datos de Teledetección

La estimación de las variables biofísicas antes descritas se acometió a distintas escalas espaciales y espectrales de trabajo, tanto a nivel de sensor aerotransportado como mediante satélite. Con objeto de validar los métodos de estimación de variables citadas utilizando imágenes de teledetección de alta resolución espacial y espectral, se utilizó en el año 2003 el sensor aerotransportado de tipo hiperespectral *Compact Airborne Spectrographic Imager* (CASI) sobre las parcelas de olivar extensivo e intensivo, obteniendo imágenes de 1 m de resolución espacial y 8 bandas espectrales. Posteriormente, con objeto de estudiar la aplicabilidad de los métodos estudiados en sensores operativos, se utilizó el satélite QUICKBIRD en los años 2003 y 2004, tomándose para cada año una imagen de tipo multiespectral de 2.5 m de resolución espacial con 4 bandas espectrales, y otra de tipo pancromático de 0.6 m. Las imágenes de satélite se obtuvieron solamente sobre la parcela de olivar extensivo, mientras que las de tipo multiespectral aerotransportado se tomaron en ambas zonas de estudio. Las parcelas elegidas en campo y los árboles seleccionados fueron identificados en las imágenes mediante el sistema de tratamiento de imágenes digitales ENVI 3.6 (Research Systems, Inc., Colorado, EEUU).

2.2.1 Procesamiento de Imágenes obtenidas con el Sensor CASI

El sensor CASI es un sensor hiperespectral desarrollado por la empresa canadiense *ITRES Research Ltd.* (ITRES Inc., Calgary, Alberta, Canadá), que utiliza aeronaves pequeñas como plataforma para la adquisición de imágenes con alta resolución espacial y espectral. Se trata de un sensor óptico de barrido multiespectral cuyas imágenes son bidimensionales, es decir, están hechas por línea–columna en el sentido de la trayectoria de la aeronave, en tiempo real, y almacenadas en cintas magnéticas o disco duro en vuelo (Pala *et al.*, 1999). Las fincas de olivar intensivo (Figura 9) y extensivo (Figura 10) se sobrevolaron con el CASI a 2.250 m de altitud sobre el nivel del suelo, los días 21 y 22 de Julio de 2003, respectivamente.

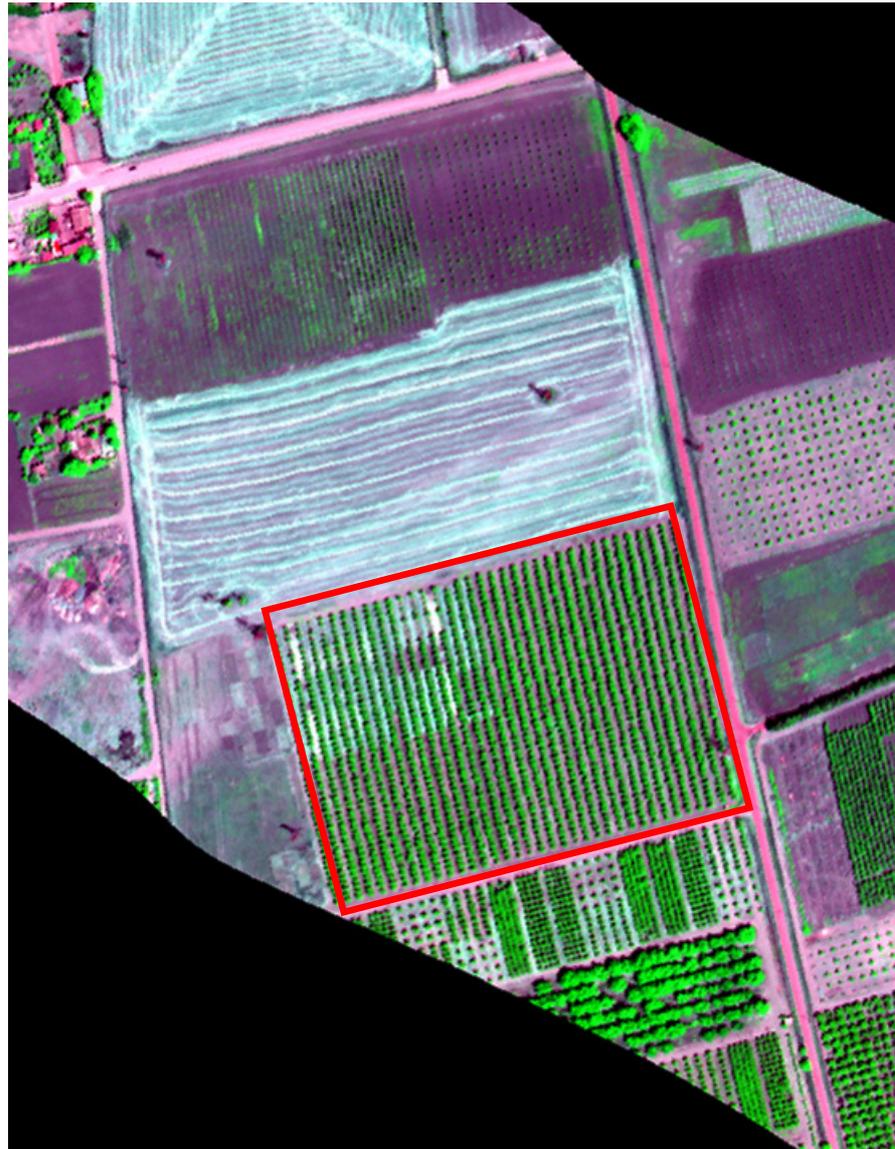


Figura 9- Imagen obtenida por el sensor CASI, con la parcela del olivar intensivo identificada (Finca “Alameda del Obispo”).



Figura 10- Mosaico de imágenes obtenida por el sensor CASI, con la zona de estudio para realización de medidas en la parcela del olivar extensivo (Finca “El Tobazo”).

El CASI permitió la generación de imágenes digitales programables multispectrales en el intervalo del espectro del visible al infrarrojo cercano, con 7 bandas espectrales centradas a 490,7 nm, 550,6 nm, 670,3 nm, 700,7 nm, 750,1 nm, 775 nm, y 800 nm, a 1 m de resolución espacial. Las bandas espectrales se seleccionaron con un ancho de banda comprendido entre 4 y 12 nm (Figura 11).

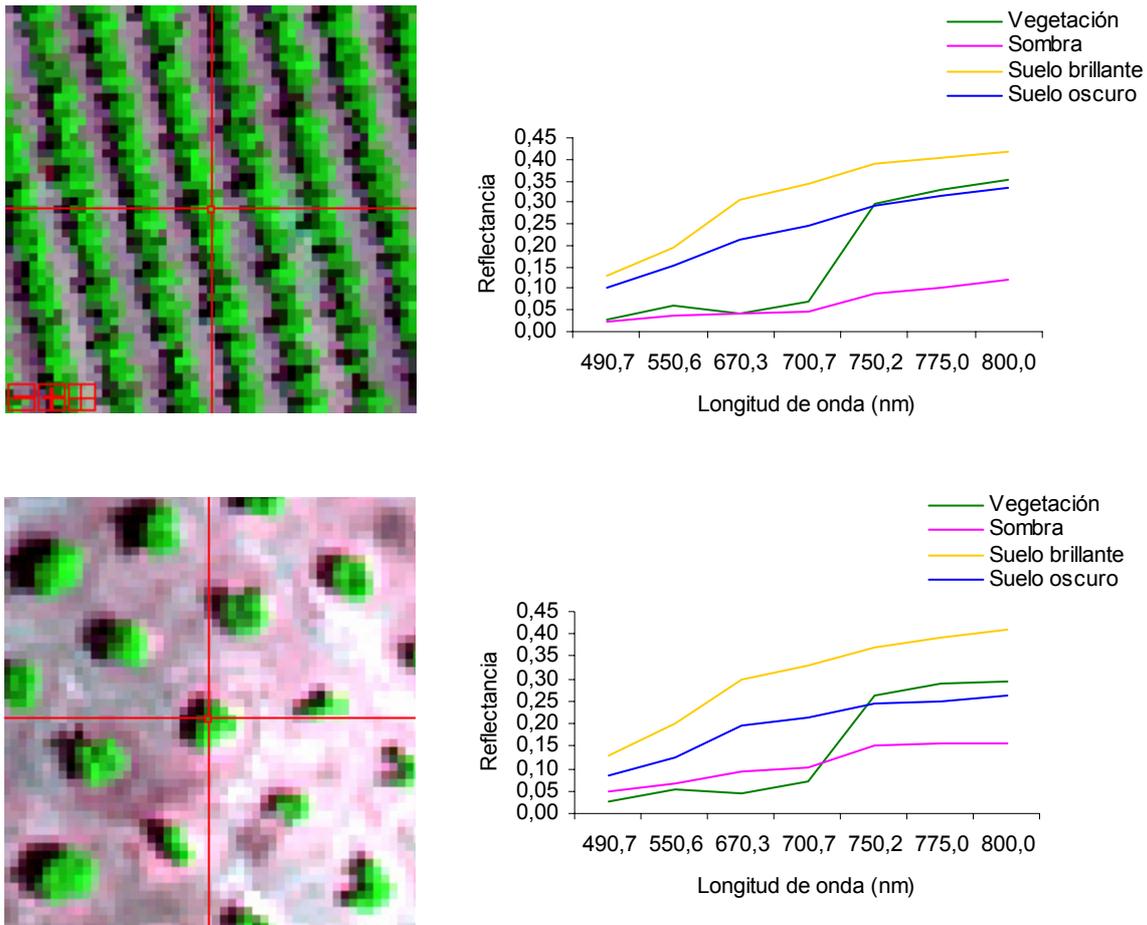


Figura 11- Perfiles espectrales sobre vegetación, sombra, suelo brillante y suelo oscuro en la imagen multispectral obtenida por el sensor CASI relativa a la parcela del olivar intensivo (arriba) y extensivo (abajo).

La imagen multispectral del sensor aerotransportado CASI, relativa a la parcela de olivar extensivo, permitió la posterior simulación de las características espectrales de imágenes de satélite de menor resolución espacial y de tipo pancromático (Figura 12). El objetivo de realizar la simulación de las características espectrales de tipo pancromático a partir de las imágenes CASI, se debe al estudio posterior del efecto de la

resolución espectral en los algoritmos de estimación de variables biofísicas utilizados. Para ello se utilizó el método de muestreo espectral (“Spectral Resampling”) que consiste en utilizar el centro de longitud de onda y el ancho correspondiente a cada una de las bandas de la imagen multispectral de entrada para su transformación a una sola banda espectral con un centro efectivo de banda a 675 nm y un ancho de banda de 309,3 nm, simulando por lo tanto las características espectrales pancromáticas del satélite QUICKBIRD.

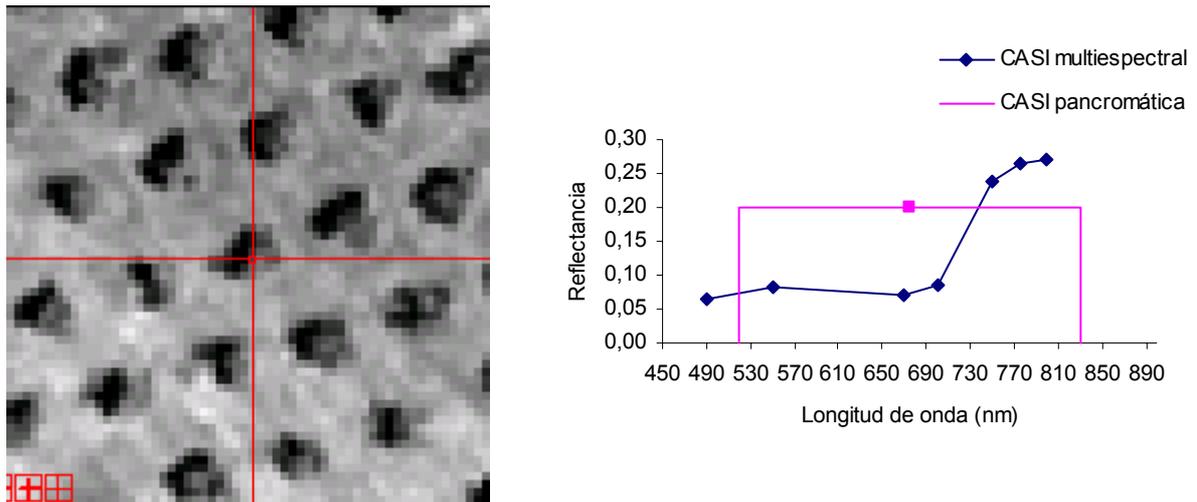


Figura 12- Imagen del sensor CASI simulando una imagen de tipo pancromático (a la izquierda) y la representación del nuevo centro y ancho de banda tras realizar la transformación de multispectral a pancromático, mostrando también las bandas multispectrales del sensor CASI para un olivo (a la derecha).

Los datos no calibrados de 12 bits obtenidos con el sensor CASI fueron procesados a radiancia usando coeficientes de calibración obtenidos en laboratorio por el *Centre for research in Earth and Space Technology* (CRESTech) y York University (Canadá). Los datos de espesor óptico de aerosoles a las longitudes de onda de 340, 380, 440, 500, 670, 870 y 1020 nm fueron tomados usando el fotómetro solar Micro-Topo II (Solar Light Co., Philadelphia, PA) en las zonas de estudio al mismo tiempo de la adquisición de los datos, para poder calcular el espesor óptico atmosférico a 550 nm, utilizado posteriormente para obtener los datos de reflectancia de las imágenes usando el modelo de corrección atmosférica CAM5S (O’Neil *et al.*, 1997). La Figura 13 muestra la imagen multispectral obtenida por el sensor CASI no rectificadas de radiancia, georeferenciadas de radiancia y de reflectancia, y los correspondientes perfiles espectrales de vegetación, sombra y suelo.

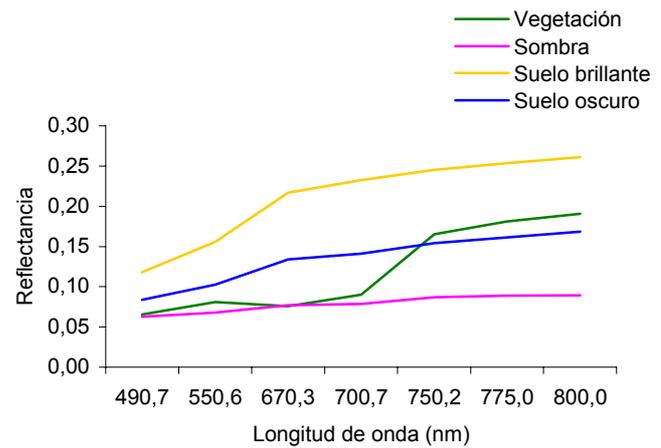
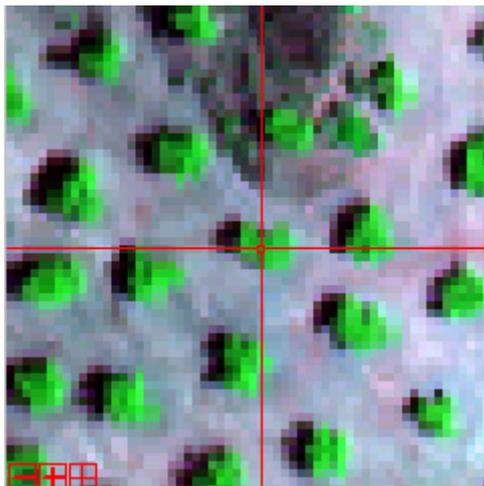
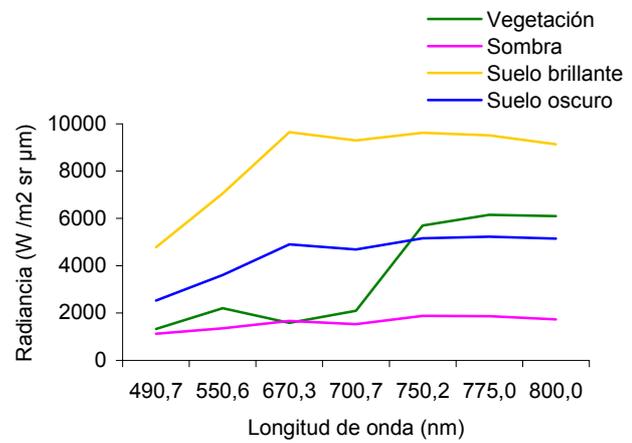
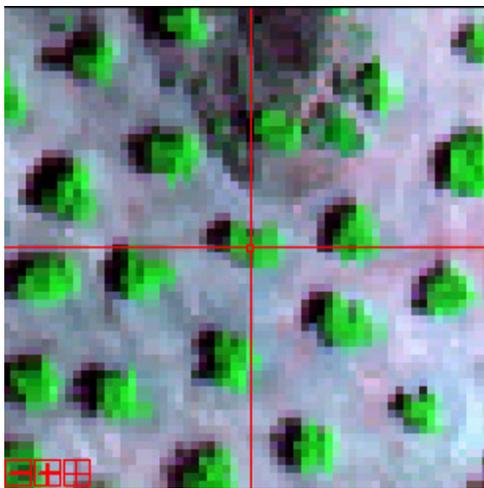
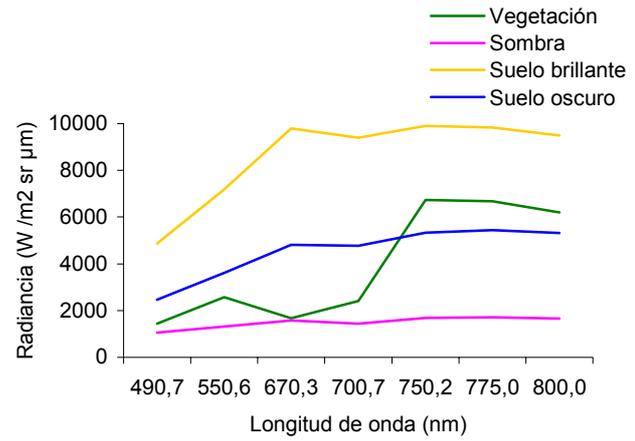
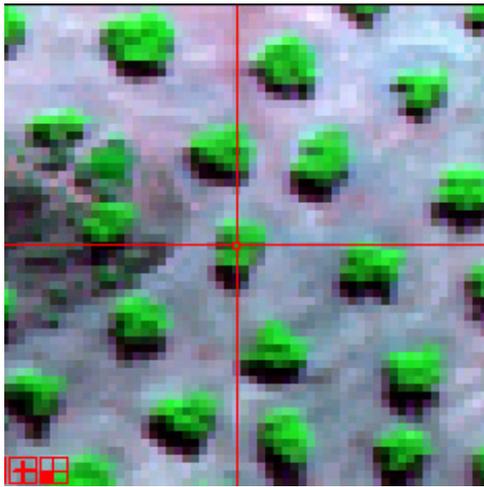


Figura 13- Perfiles espectrales sobre vegetación, sombra, suelo brillante y suelo oscuro en la imagen multiespectral obtenida por el sensor CASI no rectificadas de radiancia (arriba), georeferenciadas de radiancia (centro) y georeferenciadas de reflectancia (abajo).

2.2.2 Procesamiento de Imágenes obtenidas con el Satélite QUICKBIRD

Las imágenes de tipo pancromático y multiespectral del satélite QUICKBIRD correspondientes al olivar extensivo fueron obtenidas el 23 de Julio de 2003 y el 7 de Agosto de 2004. La imagen de tipo multiespectral tiene resolución radiométrica de 11 bits, 2,4 m de resolución espacial y 4 bandas espectrales (azul, 450-520 nm; verde 520-600 nm; rojo, 630-690 nm; infrarrojo cercano, 760-900 nm). La imagen del canal pancromático, de resolución radiométrica de 11 bits y 0,6 m de resolución espacial, comprende una sola banda espectral en el rango de 450-900 nm (Figura 14).

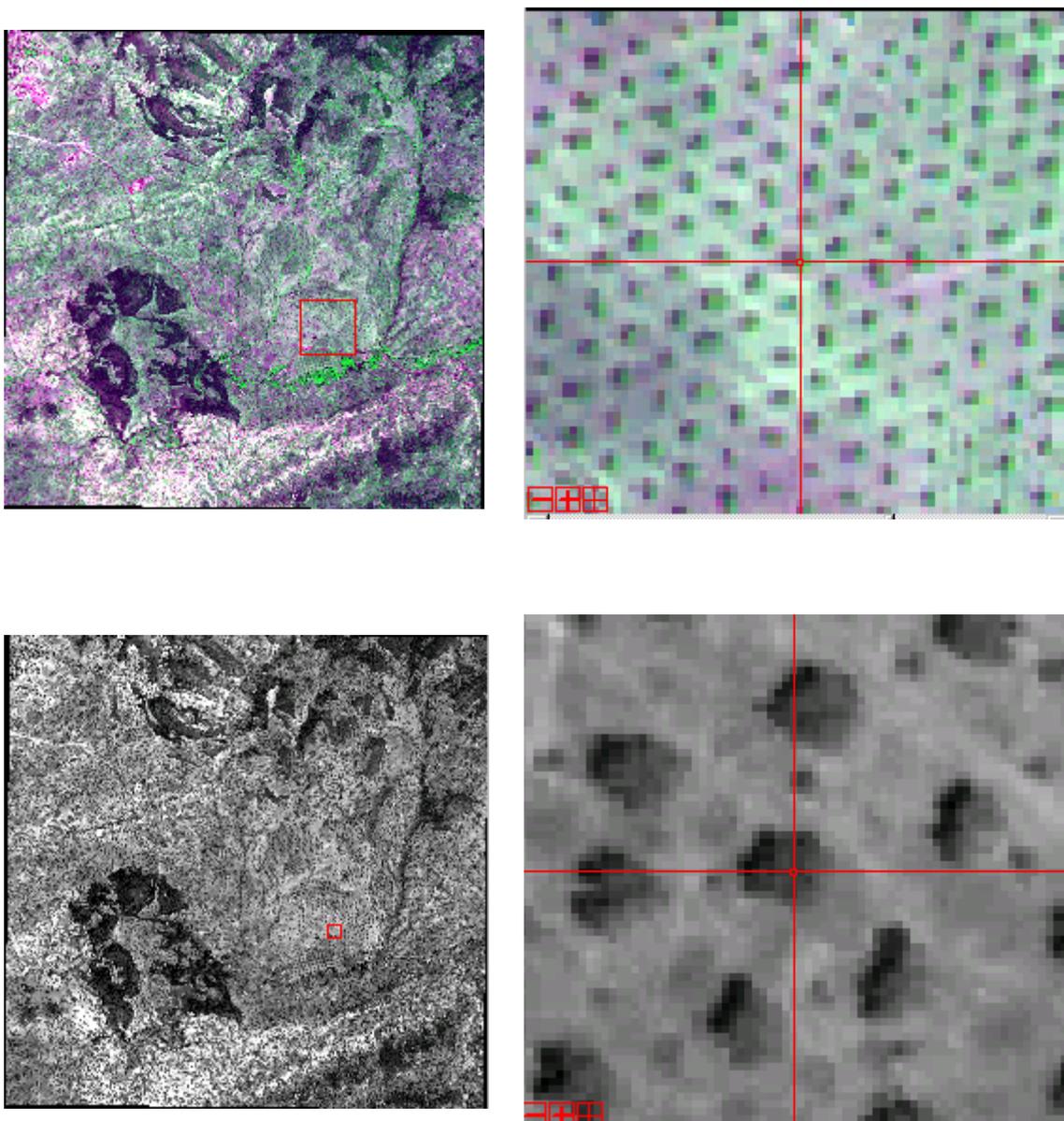


Figura 14- Imágenes del satélite QUICKBIRD en modo multiespectral (arriba) y en modo pancromático (abajo) obtenidas en el año de 2003.

La calibración radiométrica de las imágenes se realizó con objeto de convertir los valores digitales de cada píxel en valores de radiancia espectral (expresados en vatios por metro cuadrado y estereoradián ($W/m^2.sr.\mu m$), utilizando coeficientes de calibración proporcionados por DigitalGlobe (DigitalGlobe, Inc., Longmont; Colorado, EEUU) descritos en la Tabla 2.

Tabla 2- Coeficientes de calibración utilizados en la calibración radiométrica de las imágenes del satélite QUICKBIRD obtenidas en los años 2003 y 2004.

Imagen	Bandas espectrales	Coefficientes de calibración
Multiespectral	1 (azul)	1.604120e-02
	2 (verde)	1.438470e-02
	3 (rojo)	1.267350e-02
	4 (infrarrojo)	1.542420e-02
Pancromática	1	6.447600e-02

El proceso de calibración radiométrica se dividió en 2 etapas:

i) multiplicando los valores de cuentas digitales para cada una de las bandas del píxel original ($q_{Pixel, Banda}$) por dichos coeficientes de calibración (K_{Banda}), que según la ecuación 6 permiten la obtención de la radiancia integrada para cada banda ($L_{Pixel, Banda}$; $W/m^2.sr$);

$$L_{Pixel, Banda} = K_{Banda} \times q_{Pixel, Banda} \tag{6}$$

ii) dividiendo la radiancia integrada de cada banda ($L_{Pixel, Banda}$) por el ancho de banda ($\Delta\lambda_{Banda}$) según la ecuación 7, consiguiendo la radiancia media espectral por banda ($L_{\lambda Pixel, Banda}$) $W/m^2.sr.\mu m$);

$$L_{\lambda Pixel, Banda} = \frac{L_{Pixel, Banda}}{\Delta\lambda_{Banda}} \tag{7}$$

Una vez procesadas las imágenes a radiancia, se utilizó el modelo de transferencia radiativa MODTRAN (Spectral Sciences, Inc., Burlington, MA, EEUU) implementado en ACORN (Remote Systems, Inc., Boulder, CO, EEUU), con objeto de obtener imágenes de reflectancia, así como la eliminación de factores perturbadores de tipo atmosférico como concentración de vapor de agua, absorción del oxígeno y ozono atmosférico. La Figura 15 muestra la imagen multispectral obtenida por el satélite QUICKBIRD no rectificadas de radiancia, georeferenciadas de radiancia y de reflectancia y los correspondientes perfiles espectrales de vegetación, sombra y suelo.

Las variables de entrada utilizadas en el modelo MODTRAN fueron la calibración espectral, los coeficientes ganancia y offset (que se obtuvieron del archivo cabecera de cada imagen), los datos de caracterización de la imagen en lo que se refiere a fecha y hora de adquisición, latitud y longitud de la parcela, elevación media del terreno, altitud de vuelo del satélite, presión del vapor de agua y visibilidad atmosférica.

Tras la corrección radiométrica y atmosférica de las imágenes, los olivos del olivar extensivo elegidos en campo se identificaron en dichas imágenes como se puede observar en la Figura 16.

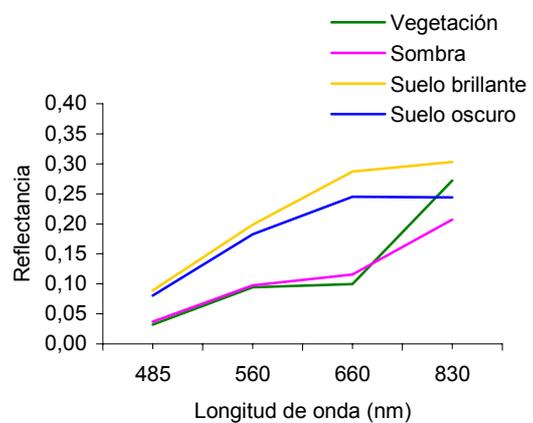
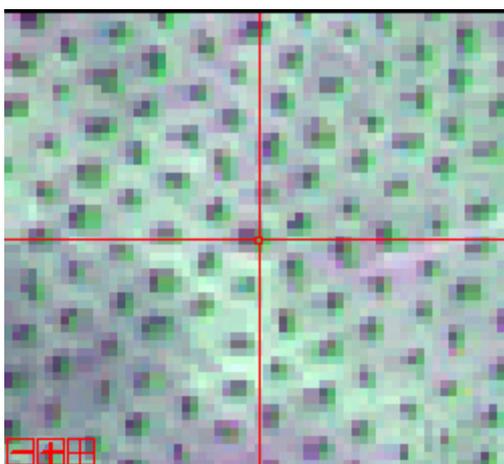
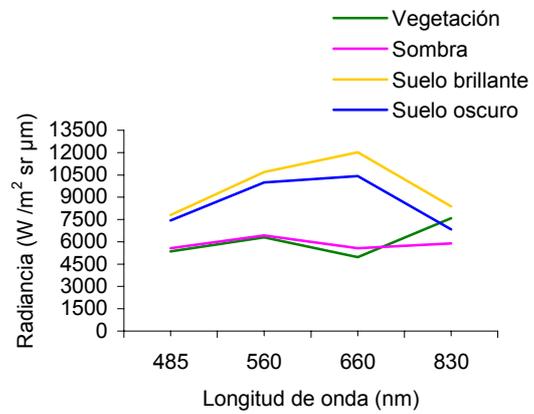
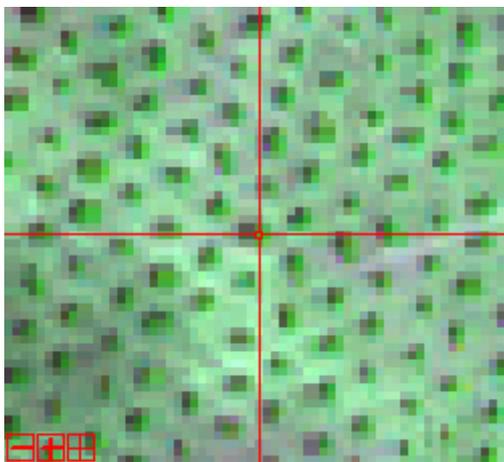
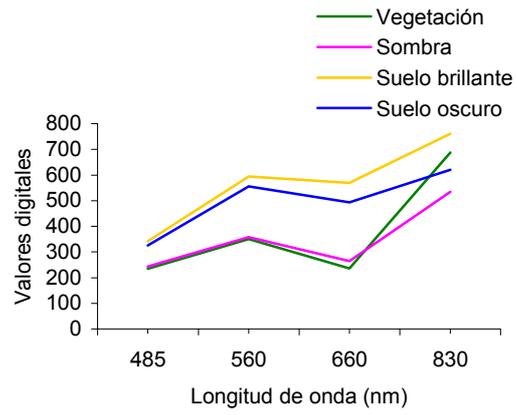
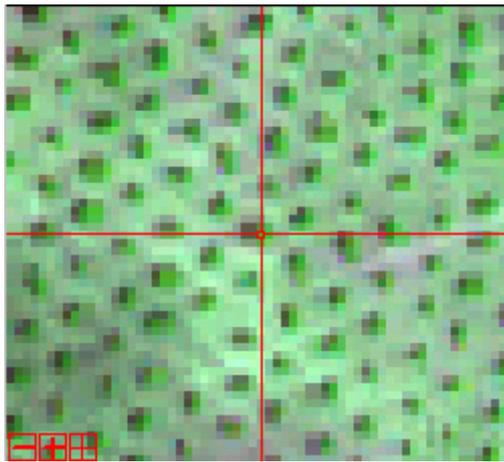


Figura 15- Perfiles espectrales sobre vegetación, sombra, suelo brillante y oscuro, en la imagen multispectral obtenida en el año de 2003 por el satélite QUICKBIRD sin corregir (arriba), corregida radiométricamente (centro) y corregida atmosféricamente (abajo).

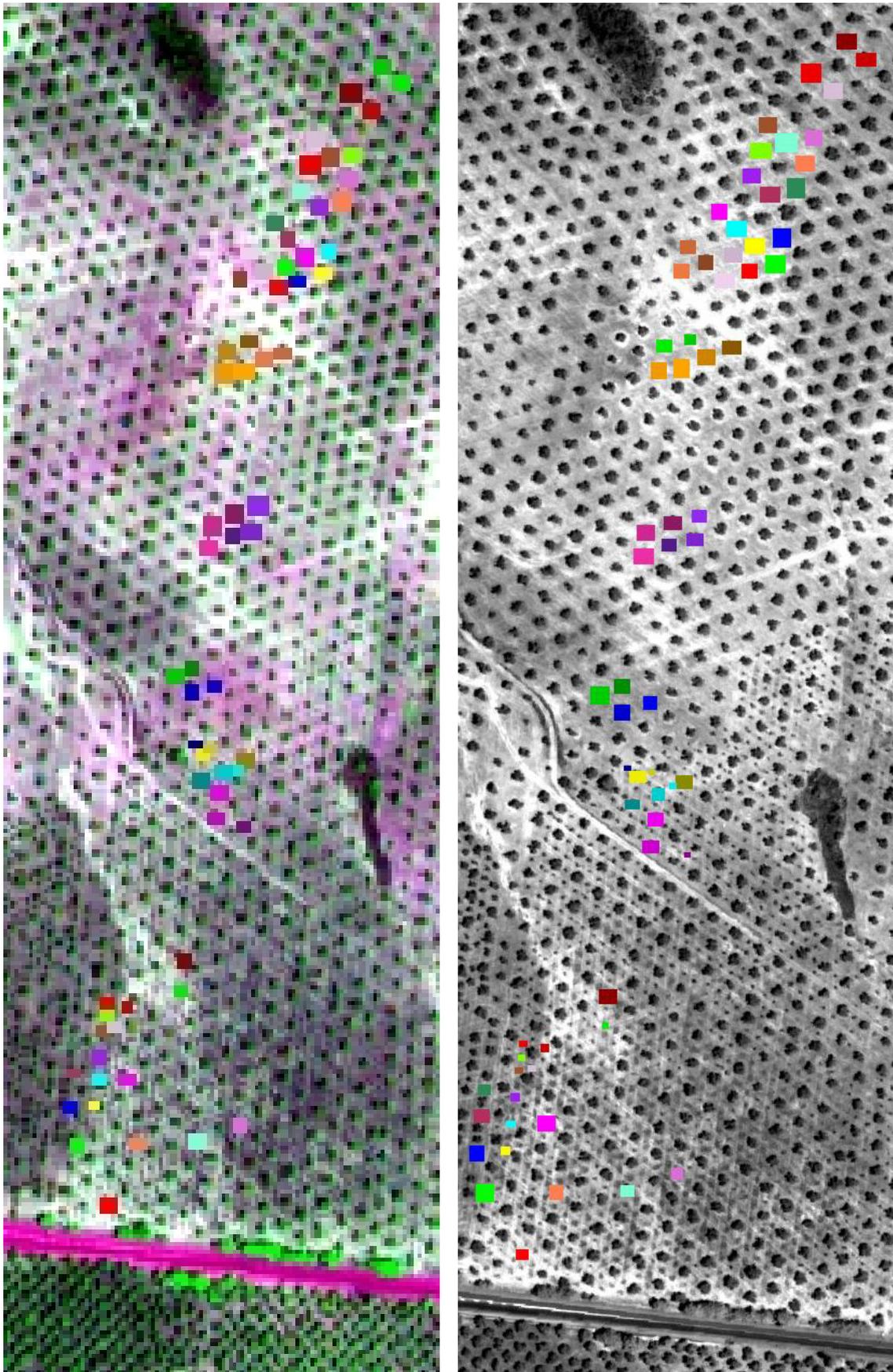


Figura 16- Imagen completa de la parcela de olivar extensivo de tipo multispectral obtenida por el QUICKBIRD en 2003 (a la izquierda) y la de tipo pancromático obtenida en el año 2004 (a la derecha), con los olivos identificados donde se realizaron medidas de campo.

2.3 Métodos de Estimación de Área Proyectada y Transmitancia de Copa mediante imágenes de Teledetección

2.3.1 Algoritmos de Delineación de Copa

La estimación de área proyectada por la copa se llevó a cabo en el olivar extensivo a partir de las imágenes CASI de tipo multiespectral, CASI simulando una imagen pancromática, y del satélite QUICKBIRD de tipo pancromática. En la plantación intensiva los árboles se encuentran distribuidos *en seto*, por lo tanto muy cercanos entre sí, no permitiéndose la diferenciación de las copas en las imágenes. Para la identificación y delineación de copas de olivo se aplicaron a cada una de las imágenes el algoritmo automático denominado TD_LWS y TD_GF_REF (Pouliot *et al.*, 2002) programados en IDL Virtual Machine 6.1 (RSI Corporate Headquarters, Colorado, EEUU), con objeto de obtener la estimación precisa del área proyectada en función de las características de la cubierta vegetal.

Los algoritmos de detección y delineación de copas se basan en dos propiedades espectrales distintas de las copas de los árboles: i) la asociación del ápice del árbol con el píxel más brillante de la imagen, asumiendo que el centro de la copa es más brillante que el borde; y ii) la delineación de la copa con el valor menos brillante. El algoritmo se basa en el análisis de los transectos locales que se extienden hacia fuera desde un ápice potencial del árbol. El límite de la copa es estimado usando el punto de inflexión máximo en cada transecto y la regla base es aplicada para asegurar que el punto es contextualmente adecuado. Esta aproximación del transecto es implementada en dos etapas, i) detección de los árboles; y ii) delineación de las copas (Pouliot *et al.*, 2002).

El algoritmo TD_LWS se ejecuta en primer lugar, consistiendo en el algoritmo de detección de árboles que refina los resultados de un filtrado inicial del píxel más brillante en la imagen. En una aproximación inicial, los puntos más brillantes detectados son evaluados usando localmente ventanas de líneas circulares para determinar la estimación final de la posición del máximo local (píxel más brillante). El tamaño de la ventana local es determinado basándose en la estimación del tamaño de copa, en que 36 transectos son extendidos hacia fuera de la posición máxima local inicialmente procesada (Pouliot *et al.*, 2002). La longitud de los transectos se fija inicialmente como la copa más larga que potencialmente se espera en la imagen. Cada transecto es escalado usando una función polinomial de cuarto orden, eliminando el último transecto

hasta que se obtiene el coeficiente de determinación mínimo entre la imagen inicial y los valores polinomiales. La arista más larga, es decir, el máximo de la primera derivada dentro de cada transecto se toma como una medida del radio de la copa en dicha dirección, estimando el radio final de la copa como la media de todos los transectos. Este método usa la técnica de bisección, empezando con un máximo y un mínimo de suavización (Pouliot *et al.*, 2002), utilizando parámetros de entrada especificados por el usuario descritos en la Tabla 3.

Tabla 3- Descripción de los parámetros de entrada del algoritmo TD_LWS.

PARÁMETROS	DESCRIPCIÓN
<i>IMGSF</i>	Suavización Gaussiana inicial a aplicar a la imagen, especificada como la desviación estándar. Los valores típicos usados están comprendidos entre 0.1 y 1. Para imágenes de alta resolución, se pueden utilizar valores más altos.
<i>TSD</i>	Distancia entre los transectos trazados en cada píxel. Esta puede ser ligeramente mayor que el rayo mas largo de la copa.
<i>R2THR</i>	Umbral de r^2 usado para controlar la longitud de cada transecto, a través de la integración de la función polinomial de 4° orden y eliminación del último transecto hasta que este umbral sea alcanzado. 0.98 es el valor que se considera por defecto.
<i>MNSF</i>	Intensidad de suavización inicial mínima para la técnica de bisección, especificada como la desviación estándar en píxel.
<i>MXSF</i>	Intensidad de suavización inicial máxima para la técnica de bisección, especificada como la desviación estándar en píxel. El valor puede ser alto, suficiente para asegurar que el nivel de suavización máximo requerido fue encontrado. El nivel más alto de suavización encontrado en datos testados fue de 4. El valor 6 que viene por defecto en el programa es suficiente.
<i>ITER</i>	Número máximo de iteraciones usado en la técnica de bisección.
<i>ETOL</i>	Diferencia máxima permitida entre la técnica de bisección y el filtrado LWS.

Tras la ejecución de la primera parte del algoritmo se ejecuta la delineación de copas mediante el algoritmo TD_GF_REF, que es similar al de detección de árboles pero aplicando un conjunto de reglas diferentes en la elaboración de la delineación de la copa. Este algoritmo, empezando por cada uno de los máximos locales detectados, utiliza cada uno de los transectos para delimitar la copa. Los transectos son extraídos y el valor máximo en la primera derivada es tomado como la posición limite de la copa más adecuada (Pouliot *et al.*, 2002). En la Tabla 4, se describen los parámetros de entrada que requiere el algoritmo.

Tabla 4- Descripción de los parámetros de entrada del algoritmo TD_GF_REF.

PARÁMETROS	DESCRIPCIÓN
<i>Simple Angle Interval</i>	Ángulo entre cada transecto. Un ángulo de 45° producirá 8 transectos extendidos hacia fuera del máximo local del píxel. Un ángulo de 10° producirá 36 transectos.
<i>Stdev for vertex Smoothing</i>	Con este parámetro, la definición de la posición límite determinada para cada transecto es suavizada usando el filtrado Gaussiano, como también la desviación estándar.

Cambiando los valores de entrada del algoritmo, se pudo observar el efecto en la delimitación de las copas de los olivos. En la imagen CASI (Figura 16) se han cambiado de izquierda a derecha los parámetros LWS: IMGSF-de 0,1 a 1; TDS-de 15 a 25; MNSF-de 0,1 a 1; y en la del satélite QUICKBIRD (Figura 16) estos parámetros se han cambiado de 1 a 1,5, de 12 a 20 y de 0.1 a 1,5, respectivamente, manteniéndose en las dos imágenes los siguientes parámetros: LWS: MSF=6; R2THS=0.98; ITER=25; ETOL=0 y TD GF REF: Sample Angle interval=10; Stdev for vertex smoothing=1. En la Figura 16 se observa el efecto de dichas variables, con la consiguiente fragmentación de las copas (Figura 17, izquierda) y el éxito en la delineación (Figura 17, derecha).

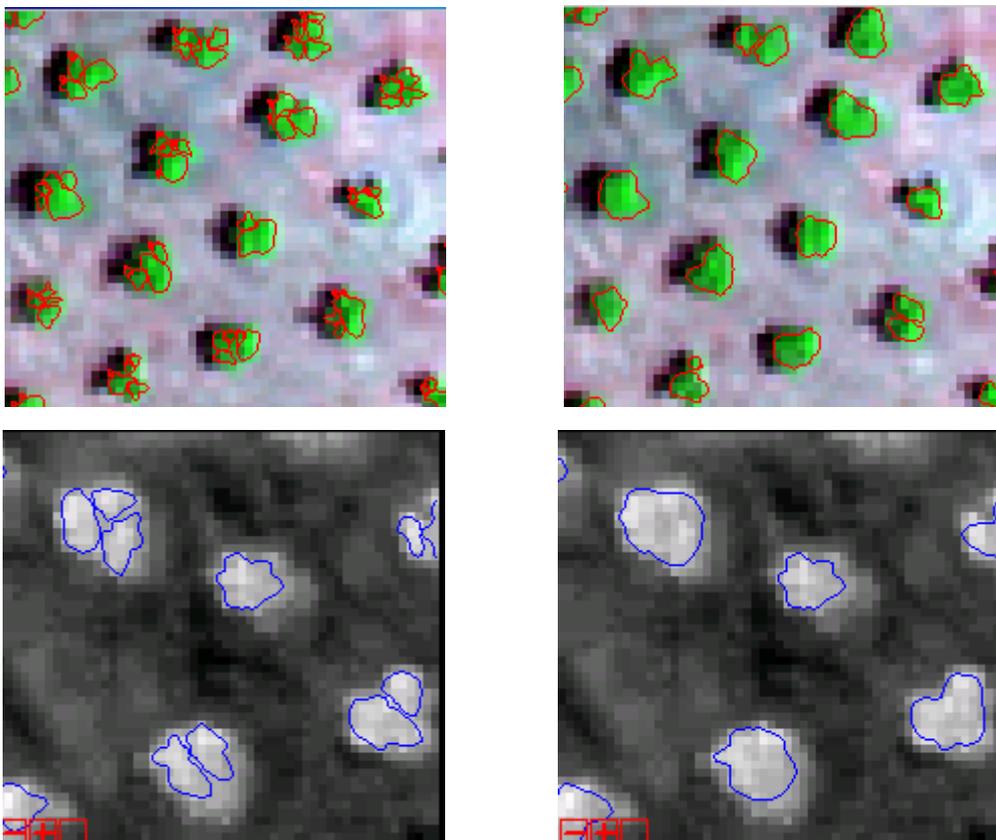


Figura 17- Ejecución de la delimitación de las copas de los olivos por el algoritmo en las imágenes del sensor CASI multiespectral (arriba) y del satélite QUICKBIRD de tipo pancromático (abajo).

Después de haber probado una serie de combinaciones de los parámetros de entrada del algoritmo, se alcanzó una perfecta delineación de las copas de los olivos (Figuras 18 y 19) utilizando dos conjuntos de parámetros de entrada del algoritmo descritos en la Tabla 5, en función de las características de tipo multiespectral o pancromático de las imágenes.

Tabla 5- Valores de los parámetros de entrada de los algoritmos automáticos (TD_LWS - TD_GF_REF) de identificación y delineación de copas de los olivos.

ALGORITMOS	PARÁMETROS	VALORES	
		IMAGEN MULTIESPECTRAL	IMAGEN PANCROMÁTICA
<u>LWS</u>	IMGSF	1	1,5
	TDS	25	20
	R2THS	0,98	0,98
	MNSF	1	1,5
	MSF	6	6
	ITER	25	25
	ETOL	0	0
<u>TD GF REF</u>	Simple Angle Interval	10	10
	Stdev for vertex Smoothing	1	1

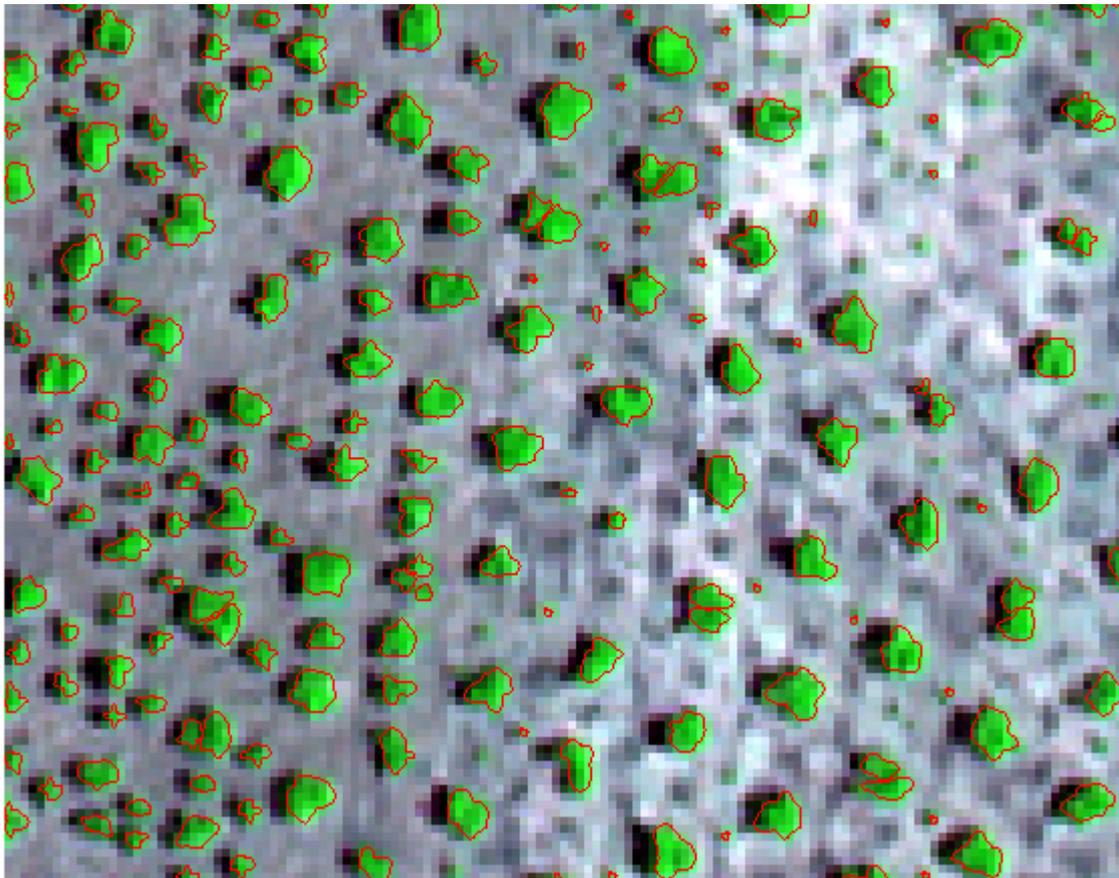


Figura 18- Imagen CASI de tipo multiespectral, con la identificación y delineación de las copas ejecutada por el algoritmo.

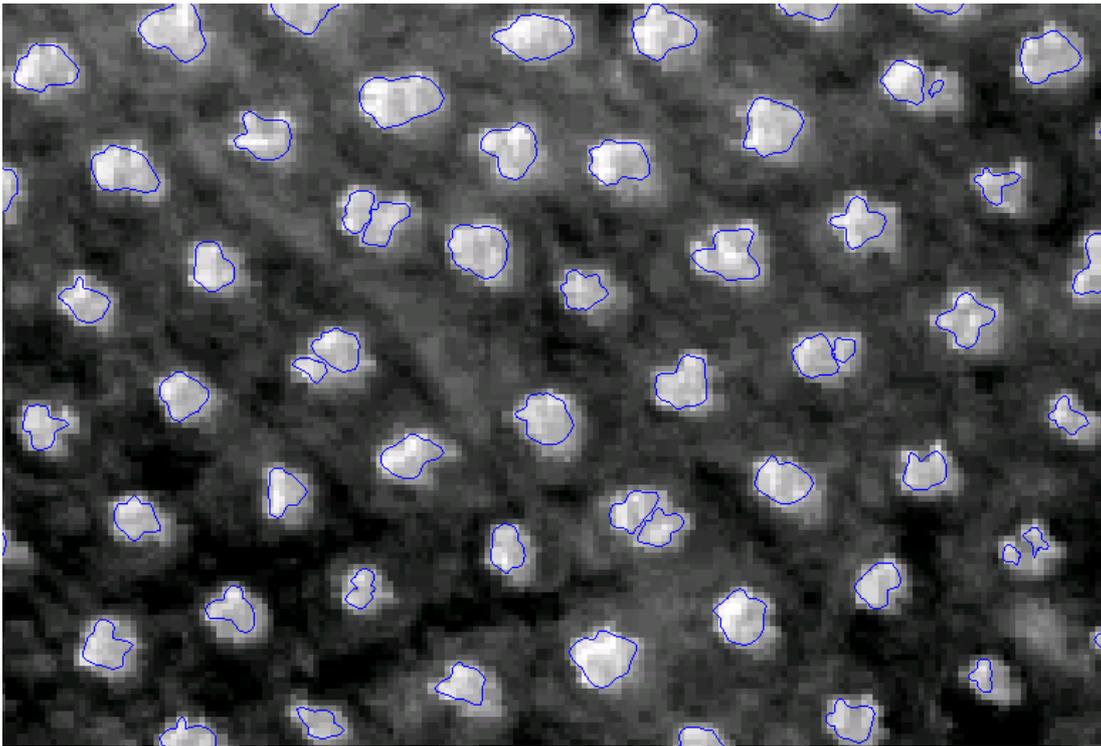


Figura 19- Imagen QUICKBIRD de tipo pancromático del año de 2003 con la identificación y delimitación de las copas ejecutada por el algoritmo.

La identificación y delimitación automática de las copas de los olivos realizada con el algoritmo TD_LWS - TD_GF_REF, a partir de las imágenes alta resolución espacial obtenidas por el sensor aerotransportado CASI y del satélite QUICKBIRD, tuvo por objetivo extraer la información necesaria a nivel del árbol individual separando los efectos del suelo y de la vegetación, con objeto de acometer un análisis preciso de parámetros biofísicos como el área proyectada de copa.

2.3.2 Cálculo de Índices de Vegetación

Los índices de vegetación son medidas radiométricas de la variación espacial y temporal de la vegetación que están relacionados con variables biofísicas de la cubierta como el índice de área foliar (IAF), porcentaje de cubierta vegetal, biomasa, etc. (Asrar *et al.*, 1985; Baret y Guyot, 1991; Richardson *et al.*, 1992; Gilabert *et al.*, 1996, Haboudane *et al.*, 2004).

El Normalized Difference Vegetation Index (NDVI), desarrollado por Rouse *et al.* (1974), se basa en la diferencia existente entre la máxima absorción en el rojo (690 nm), debida a los pigmentos de clorofila, y la máxima reflexión existente en el infrarrojo cercano (800 nm), debida a la estructura celular de la hoja (Haboudane *et al.*, 2004). Usando bandas estrechas hiperespectrales, este índice es cuantificado según la siguiente ecuación:

$$NDVI = (R_{NIR} - R_{RED}) / (R_{NIR} + R_{RED}) \quad [8]$$

siendo R_{NIR} y R_{RED} , la reflectancia en la banda del infrarrojo cercano (R_{800nm}) y en la del rojo (R_{690nm}), respectivamente. Este índice se satura en casos de cubiertas densas con varias capas y muestra una relación no lineal con parámetros biofísicos como IAF (Barat y Guyot, 1991; Lillesaeter, 1982).

El Renormalized Difference Vegetation Index (RDVI) (Ec.[9]) mejorado por Rougean y Breon (1995), ha sido desarrollado para conseguir una relación lineal con el IAF.

$$RDVI = (R_{NIR} - R_{RED}) / \sqrt{R_{NIR} + R_{RED}} \quad [9]$$

El Modified Simple Ratio (MSR) (Ec.[10]) definido por Chen (1996), ha sido propuesto para mejorar NDVI (debido a su sensibilidad a los parámetros biofísicos de la vegetación) mediante combinaciones con el Simple Ratio Index (SR) (Jordan, 1969; Rouse *et al.*, 1974) descrito en la ecuación 11. MSR y SR son considerados más linealmente relacionados con los parámetros de vegetación (Haboudane *et al.*, 2004).

$$MSR = \frac{(R_{NIR} / R_{RED}) - 1}{\sqrt{(R_{NIR} / R_{RED}) + 1}} \quad [10]$$

$$SR = (R_{NIR} / R_{RED}) \quad [11]$$

Estos cuatro índices de vegetación fueron calculados a partir de los datos de reflectancia de las imágenes del sensor hiperespectral CASI y del satélite QUICKBIRD de tipo multiespectral, con el objeto de estudiar su relación con la transmitancia de copa (T) y el índice de área de planta (IAP), utilizando los valores de campo medidos en el olivar extensivo e intensivo. Para cada árbol se estimó al valor medio de los índices citados anteriormente, considerando las tres componentes, suelo, sombra y vegetación.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1 Estimación de Área Proyectada de Copa mediante técnicas de Teledetección

Los resultados de la estimación del área proyectada de la copa de olivo obtenidos mediante la ejecución de los algoritmos automáticos (TD_LWS - TD_GF_REF) de identificación y delineación de copas se refieren al olivar extensivo, finca “El Tobazo” que por sus características estructurales y marco de plantación permitió la aplicación de dicha metodología. Para la realización del ensayo se seleccionaron 66 olivos repartidos por toda la plantación en el año 2003, mientras que en 2004 solamente se eligieron 20 de los 66 olivos seleccionados, de forma que reflejaran la máxima variabilidad existente en el área foliar y en el tamaño de copa en la parcela. En la Tabla 6 se presenta un resumen de todas las medidas del área proyectada de copa (A_p), observándose que en el año 2003 para el olivar extensivo los valores estaban comprendidos entre 0,98 y 39,9 m^2 , pero en 2004 la variabilidad existente en el conjunto de datos fue menor dado que se obtuvieron valores de área proyectada comprendidos solamente entre 12,0 y 30,7 m^2 . Aunque no se hayan utilizado, por el hecho de los árboles se encontraren muy cercanos entre sí, no permitiéndose la diferenciación de las copas en las imágenes, se muestran las medidas de área proyectada del olivar intensivo en la Tabla 6, indicando que la variabilidad existente es mucho menor (A_p entre 2,66 y 9,33 m^2), debido a la mayor homogeneidad de los árboles.

Tabla 6- Resumen de los valores mínimo y máximo, media y desviación típica del Área proyectada de copa, obtenidos en los años de 2003 y 2004 para el olivar extensivo, y en 2004 para el olivar intensivo.

Variables de Estudio		Año 2003		Año 2004
		Olivar extensivo	Olivar intensivo	Olivar extensivo
Área Proyectada de Copa (A_p , m^2)	Valor Mínimo	0,98	2,66	12,0
	Valor Máximo	39,93	9,33	30,77
	Media	20,19	5,77	23,92
	Desviación	11,93	1,56	4,88

La estimación de área proyectada por la copa se llevó a cabo en el olivar extensivo a partir de i) las imágenes CASI de tipo multiespectral; ii) CASI simulando al

satélite QUICKBIRD de tipo pancromático (obtenidas en el año 2003), y iii) a partir de las imágenes de tipo pancromático del satélite QUICKBIRD obtenidas en los años 2003 y 2004.

La mejor relación entre la superficie proyectada por la copa medida en campo y la estimada mediante las imágenes en estudio se obtuvo a partir de la imagen de tipo multiespectral obtenida con el sensor aerotransportado CASI (Figura 20.a). Los resultados indican una aceptable estimación del área proyectada a partir de dicha imagen, mostrando de forma consistente que con la imagen CASI se obtuvo un coeficiente de determinación (r^2) elevado ($r^2=0,83$) entre área medida en campo y área estimada a partir de la imagen, con un error cuadrático medio de $RMSE=5,3 \text{ m}^2$, debido a sus características de alta resolución espacial (1 m) y de tipo multiespectral, con 7 bandas espectrales de reducido ancho de banda comprendido entre 4 y 12 nm.

En un paso intermedio entre las imágenes del sensor aerotransportado CASI, y las del satélite QUICKBIRD, la imagen multiespectral CASI obtenida en la parcela de olivar extensivo se utilizó para simular las características espectrales de imágenes del satélite QUICKBIRD de menor resolución espacial y de tipo pancromático. Este estudio tuvo por objeto conocer el efecto de la resolución espacial y espectral del satélite QUICKBIRD en la estimación de área proyectada antes de acometer dicha evaluación con imágenes reales del satélite. Consistentemente con lo esperado, se puede constatar en la Figura 20.b que el coeficiente de determinación (r^2) que se obtuvo con esta imagen fue algo menor ($r^2=0,65$) y el error cuadrático medio mayor ($RMSE=9 \text{ m}^2$) cuando se compara con los valores obtenidos en la imagen CASI de tipo multiespectral. Estos resultados son consistentes debido a las características de menor resolución espectral de la imagen CASI de tipo pancromático, que cuenta con una sola banda espectral centrada a una longitud de onda efectiva de 675 nm, permitiendo de esta forma determinar el efecto de dichas características espectrales del satélite QUICKBIRD en la estimación de área proyectada por árbol mediante la aplicación de los algoritmos de identificación y delineación de copas.

Los resultados de estimación de área proyectada a partir de la banda pancromática del satélite QUICKBIRD pueden observarse en las Figuras 20.c y 20.d. Se puede observar que el coeficiente de determinación (r^2) que se obtuvo, relacionando el área proyectada por la copa medida en campo con la estimada a través de la imagen de tipo pancromático del satélite QUICKBIRD obtenida en el año 2003 fue de $r^2=0,53$ y $RMSE= 9 \text{ m}^2$ (Figura 20.c). El coeficiente de determinación obtenido en 2004 fue semejante ($r^2=0,53$) al alcanzado para el año 2003, mientras que el error cuadrático medio que se obtuvo en la imagen del año de 2004 fue de $RMSE= 4,02 \text{ m}^2$ (Figura 20.d), debido a que este año, con el fin de realizar una determinación más precisa del área proyectada, se utilizó un mayor número de transectos trazados que posibilitaron la toma de más puntos de medida.

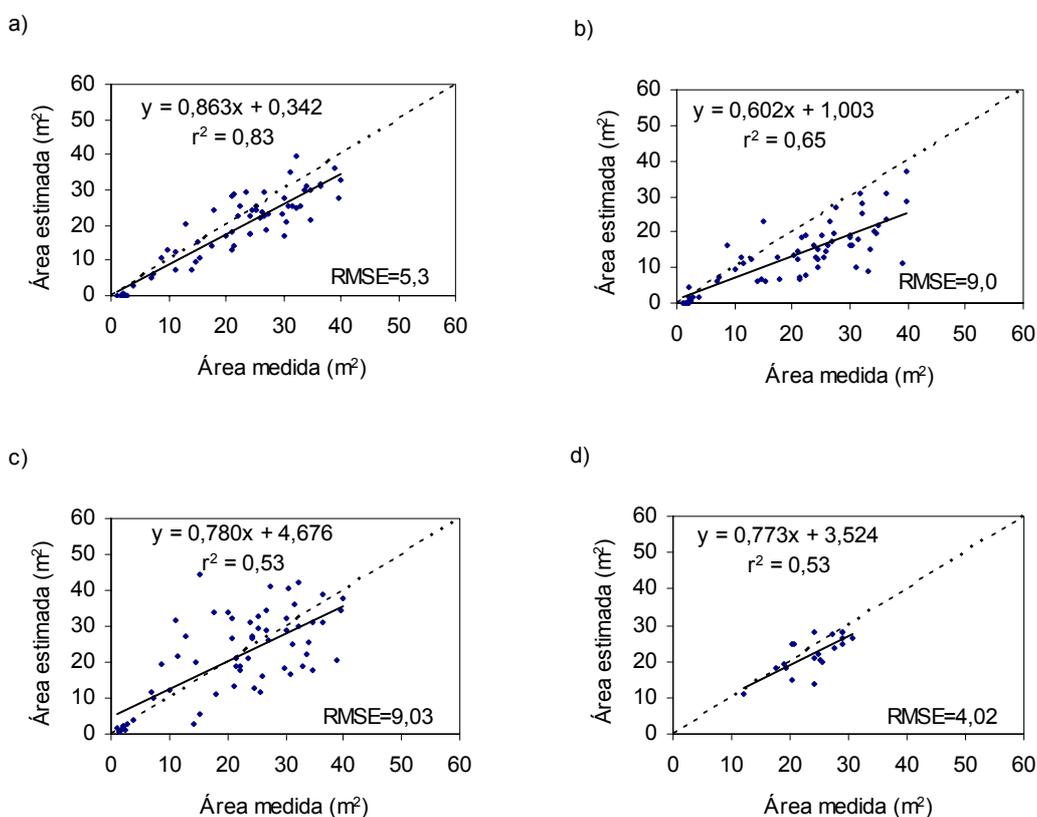


Figura 20- Relación entre el área proyectada por la copa medida en campo y la estimada mediante los algoritmos TD_LWS - TD_GF_REF, a partir de las imágenes de tipo multiespectral (a) y pancromática (b) obtenidas con el sensor CASI en el año 2003; y a partir de las imágenes de tipo pancromático obtenidas con el satélite QUICKBIRD en los años 2003 (c) y 2004 (d).

Los resultados obtenidos en la estimación de área proyectada mediante sensores CASI multiespectral, CASI simulando al satélite QUICKBIRD de tipo pancromático, y QUICKBIRD de tipo pancromático son, por lo tanto, consistentes con las características espectrales y resolución de cada sensor. Las características multiespectrales del sensor CASI, con bandas en el visible (400-700 nm) y en el infrarojo cercano (800 nm) permiten la mejor diferenciación entre vegetación y suelo, obteniendo, por lo tanto, mejores resultados que con sensores de tipo pancromático que integran la radiación reflejada en una sola banda espectral para todo el rango 400-900 nm. Sin embargo, a pesar de la menor resolución espectral de las imágenes de tipo pancromático, los resultados obtenidos indican que el satélite QUICKBIRD puede estimar de forma operativa área proyectada de copa en olivos de 2-3 pies, plantados a un marco de plantación amplio.

3.2 Estimación de Volumen de Copa

La estimación del volumen de copa a partir del área proyectada por la copa estimada por cada sensor está relacionada con el hecho de que la medida en campo del volumen de copa es muy laboriosa y requiere mucho tiempo, pero es imprescindible en el cálculo del índice de área de planta (IAP). Sin embargo, si las relaciones área proyectada / volumen de copa medidos en campo son estables, a partir del área proyectada estimada mediante la ejecución de los algoritmos automáticos de identificación y delineación de copas se podría estimar el volumen de copa utilizando dichas relaciones geométricas.

En la Tabla 7 se muestran las medidas de volumen de copa (V) para el olivar extensivo en los años 2003 y 2004, y las obtenidas en el olivar intensivo en 2003. En 2003 en la parcela de olivar extensivo, el volumen de copa varió entre 0,82 y 80,48 m³, mientras que en 2004 presentó valores en el rango de 17,4 a 49,9 m³. En el olivar intensivo, tal como para el área proyectada de copa, la variabilidad existente en volumen de copa fue mucho menor (V entre 5,77 y 28,69 m³).

Tabla 7- Valores mínimo y máximo, media y desviación típica del volumen de copa, obtenidos en los años 2003 y 2004 para el olivar extensivo y en 2004 para el olivar intensivo.

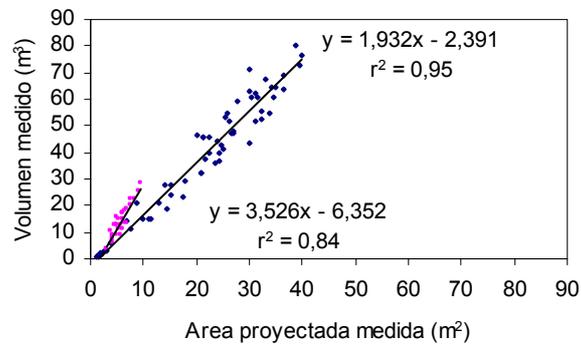
Variables de Estudio		Año 2003		Año 2004
		Olivar extensivo	Olivar intensivo	Olivar extensivo
Volumen de Copa (V, m ³)	Valor Mínimo	0,82	5,77	17,41
	Valor Máximo	80,48	28,69	49,9
	Media	36,61	13,99	36,13
	Desviación	23,60	5,97	9,09

En la Figura 21.a se muestra la relación existente entre el volumen de copa y el área proyectada por la copa (superficie transversal máxima), para todos los olivos medidos en las parcelas de olivar intensivo y extensivo en el año de 2003. Como se observó en el campo, los olivos del olivar extensivo, con 2-3 pies, tienen un mayor volumen de copa y área proyectada que los del olivar intensivo, de un solo pie. En ambos casos existe una buena estimación del volumen de copa a partir del área proyectada, con coeficientes de determinación (r^2) de 0,95 y 0,84, para el olivar extensivo e intensivo respectivamente.

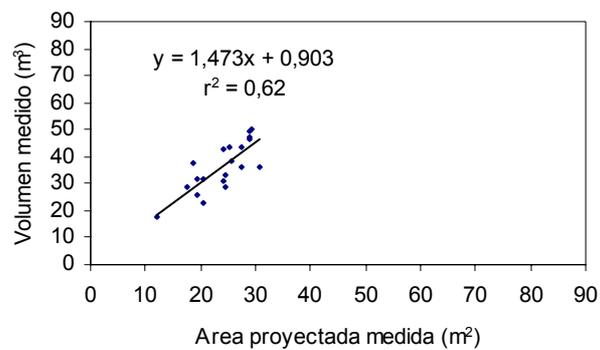
De la relación existente entre el volumen de copa y el área proyectada por la copa (superficie transversal máxima), para los olivos medidos en la parcela de olivar extensivo en el año 2004 (Figura 21.b), se obtuvo un coeficiente de determinación menor ($r^2= 0,62$), debido a que solamente se midieron 20 árboles, y que en este caso la variabilidad existente entre los árboles en cuanto a volumen y área proyectada de copa fue menor.

Analizando los años de 2003 y 2004 juntos (Figura 21.c), se puede observar que las medidas de volumen y área proyectada de copa realizadas en 2004 para el olivar extensivo siguen la misma distribución que los datos obtenidos en 2003 en las parcelas de olivar intensivo y extensivo, con un coeficiente de determinación $r^2=0,91$, lo que viene a confirmar que existe una buena estimación del volumen de copa a partir del área proyectada por la copa.

- a) • Olivar extensivo
• Olivar intensivo



- b)



- c)

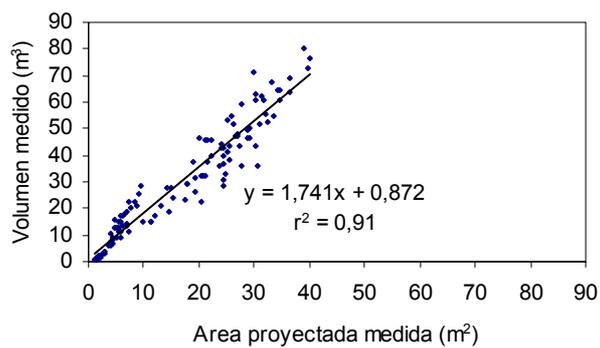


Figura 21- Relación existente entre las medidas del volumen de copa y el área proyectada obtenidas en el año 2003 en las parcelas de olivar extensivo e intensivo (a); en el año 2004 solamente en la parcela de olivar extensivo (b); en los años 2003 y 2004 en las parcelas de olivar extensivo e intensivo (c).

Teniendo en cuenta las relaciones presentadas anteriormente, la relación existente entre volumen de copa medido en el olivar extensivo y el volumen estimado a partir del área proyectada de copa estimada en las imágenes obtenidas con el sensor aerotransportado CASI y satélite QUICKBIRD (Figura 22) demuestra la viabilidad de estimar volumen de copa en dichas imágenes, dado que se obtuvo un coeficiente de determinación (r^2) entre 0,79 y 0,45 y un error cuadrático medio (RMSE) entre 11,5 y 20 m³. No obstante, en los olivos de reducida área proyectada y volumen de copa se observó una sobreestimación del volumen calculado a partir del área de copa estimada, debido a la dificultad de los algoritmos TD_LWS y TD_GF_REF en delinear el contorno de las copas de muy reducida dimensión. Por este motivo, al estimar el volumen de los árboles de reducida dimensión, se obtuvieron valores negativos del volumen de copa.

La mejor relación entre volumen de copa medido y el estimado a partir del área proyectada por la copa se obtuvo a partir de la imagen de tipo multiespectral obtenida con el sensor aerotransportado CASI (Figura 22.a). Los resultados indican una buena estimación del volumen de copa a partir de dicha imagen, mostrando que con la imagen CASI se obtuvo un coeficiente de determinación aceptable ($r^2=0,79$) y un error cuadrático medio RMSE=11,5 m³, debido a sus características de alta resolución espacial (1 m) y espectral. Observando la Figura 22.b, se puede constatar que el coeficiente de determinación (r^2) que se obtuvo, utilizando la imagen pancromática obtenida a través del sensor aerotransportado CASI relativa a la parcela de olivar extensivo fue menor ($r^2=0,60$) y el error cuadrático medio mayor (RMSE=20,1 m³) cuando se compara con los valores obtenidos utilizando la imagen CASI de tipo multiespectral. En la Figura 22.c se observa que el coeficiente de determinación que se obtuvo, relacionando el volumen de copa medido en la parcela de olivar extensivo con el estimado a través de la imagen de satélite QUICKBIRD de tipo pancromático del año 2003 fue más bajo tal y como se esperaba ($r^2=0,46$), comparado con los alcanzados en las imágenes del sensor aerotransportado CASI, tanto de tipo multiespectral como pancromático. El error cuadrático medio asociado a dicha imagen de satélite fue superior (RMSE= 19 m³) al obtenido con la imagen de tipo multiespectral del sensor aerotransportado CASI, mientras que fue semejante al alcanzado con la imagen de tipo pancromático obtenida con el sensor CASI.

El coeficiente de determinación (r^2) obtenido utilizando la imagen del satélite QUICKBIRD de tipo pancromático adquirida en el año 2004, fue menor ($r^2=0,27$) que el alcanzado en 2003, debido probablemente a la menor variabilidad de los árboles en cuanto a área proyectada y volumen de copa; sin embargo, el error cuadrático medio que se obtuvo en la imagen del año 2004 fue más reducido (RMSE= 8,4 m³), porque se acometió una determinación más rigurosa del área proyectada. Por ese motivo se hizo la relación entre volumen de copa medido y el estimado mediante la imagen del satélite QUICKBIRD de tipo pancromático, utilizando los datos de los años 2003 y 2004 juntos (Figura 22.d). El coeficiente de determinación obtenido fue 0,45 y el error cuadrático medio (RMSE) asociado fue de 17 m³.

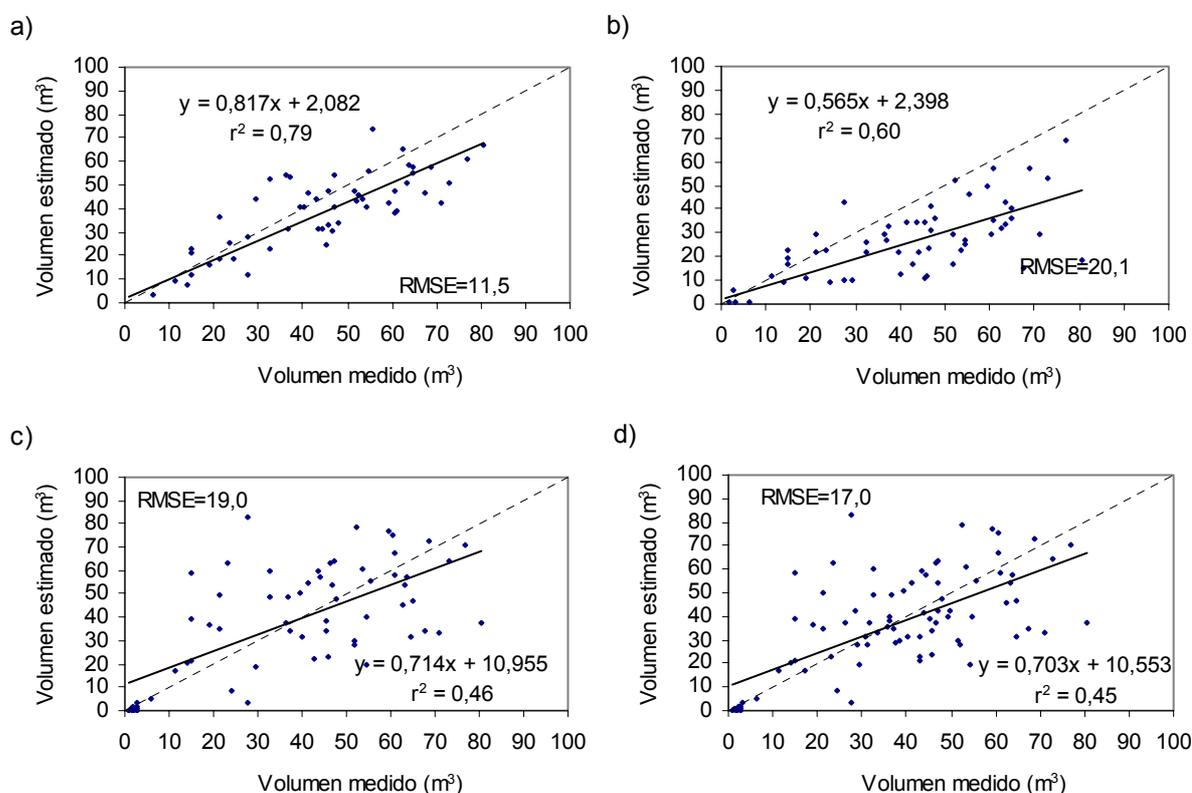


Figura 22- Relación entre el volumen medido en campo y el estimado a partir del área proyectada de copa estimada en las imágenes de tipo multispectral (a) y pancromático (b) obtenidas con el sensor CASI en el año 2003, así como en las imágenes de tipo pancromático obtenidas con el satélite QUICKBIRD en los años 2003 (c) y 2003 / 2004 (d).

Los resultados obtenidos de relación volumen de copa / área proyectada de copa, nos indican que podemos utilizar estas relaciones, debido a que estas se mantuvieron constantes a lo largo de los años 2003 y 2004, permitiéndonos estimar volumen de copa a partir de la estimación de área proyectada a nivel del satélite para grandes zonas de olivar. La aplicación de estos métodos de estimación de volumen de copa a partir de la estimación del área proyectada mediante satélite, en grandes zonas, requiere estudios futuros investigando la estabilidad de las relaciones volumen / área en función de la variedad de olivar, marco de plantación, y prácticas de manejo. Estas tecnologías permitirían la estimación de dos variables importantes (volumen y área) en el cálculo de la medida de IAP, ahorrando trabajo y tiempo en la toma de datos en campo para monitorización de grandes extensiones.

3.3 Estimación de Transmitancia de Copa mediante Índices de Vegetación Estructurales

En el año de 2003, la transmitancia de copa (T) en la finca de olivar extensivo (66 árboles seleccionados) varió entre 0,46 y 1,93, mientras que en la parcela de olivar intensivo (29 árboles medidos) varió entre 0,98 y 2,91. En 2004, la T en la finca de olivar extensivo varió entre 0,81 y 1,88 (20 olivos seleccionados), por lo que en dicho año existió menor variabilidad en las medidas de T, descritas en la Tabla 8.

Tabla 8- Valores mínimo y máximo, media y desviación típica de Transmitancia de copa obtenidos en los años 2003 y 2004 para el olivar extensivo y en 2004 para el olivar intensivo.

Variables de Estudio		Año 2003		Año 2004
		Olivar extensivo	Olivar intensivo	Olivar extensivo
Transmitancia de Copa (T)	Valor Mínimo	0,46	0,98	0,81
	Valor Máximo	1,93	2,91	1,88
	Media	1,14	2,16	1,37
	Desviación	0,38	0,58	0,27

Los índices de vegetación estructurales NDVI, RDVI, MSR y SR fueron calculados a partir de los datos de reflectancia de las imágenes multispectrales del sensor CASI y del satélite QUICKBIRD, con objeto de estudiar su relación con la transmitancia de copa (T) y verificar si mediante satélite es posible estimar dicha

variable biofísica, dado que QUICKBIRD tiene menor resolución espacial (2,5 m) y espectral (4 bandas) que el sensor CASI, aportando por ese motivo menos información que podría condicionar la estimación de dicha variable.

En la Tabla 9 se muestran los resultados de la relación obtenida entre los índices de vegetación calculados a partir de las imágenes multispectrales del sensor aerotransportado CASI y del satélite QUICKBIRD, y los valores de transmitancia de copa medida con el PCA LAI-2000 en el año de 2003, para los olivos de las dos fincas de olivar extensivo e intensivo, mientras que en 2004 solamente se obtuvieron datos de transmitancia de copa en el olivar extensivo. De su análisis se puede constatar que el índice NDVI fue el que mejor se correlacionó con la variable transmitancia de copa, tanto en la imagen CASI ($r^2=0,71$) como en la del satélite QUICKBIRD del año 2003 ($r^2=0,68$). Los coeficientes de determinación (r^2) que se alcanzaron en la imagen del satélite QUICKBIRD obtenida en el año de 2004 fueron muy bajos ($r^2=0,05$) debido a que la variabilidad existente en el conjunto de datos (20 árboles) en cuanto a estructura, volumen y superficie proyectada de la copa fue muy baja. Sin embargo, cuando se analizaron los años de 2003 y 2004 juntos, los índices NDVI y RDVI fueron los que mejor se correlacionaron con la transmitancia de copa estimada mediante imagen del satélite QUICKBIRD ($r^2=0,64$).

Tabla 9- Coeficientes de determinación (r^2) resultantes de la relación entre las medidas de transmitancia de copa obtenidas en campo (olivar extensivo e intensivo) con el sensor PCA y los valores promedios de los índices obtenidos mediante las imágenes del sensor CASI y del satélite QUICKBIRD de tipo multispectral: n=95 árboles, año 2003; n=20 árboles, año 2004); y n=115 árboles, años 2003 / 2004).

TRANSMITANCIA DE COPA				
INDICES	SENSOR CASI (AÑO 2003)	SATÉLITE QUICKBIRD		
		AÑO 2003	AÑO 2004	AÑOS 2003 / 2004
	r^2	r^2	r^2	r^2
NDVI	0,71	0,68	0,05	0,64
RDVI	0,69	0,67	0,07	0,64
MSR	0,69	0,66	0,06	0,62
SR	0,70	0,67	0,06	0,63

Por lo tanto, existió una buena estimación de la variable transmitancia de copa a partir de los índices de vegetación calculados en las imágenes, siendo NDVI el índice que mejor comportamiento tuvo en la estimación de dicha variable, tanto en la imagen del sensor aerotransportado CASI como en la del satélite QUICKBIRD, como se puede observar en la Figura 23.

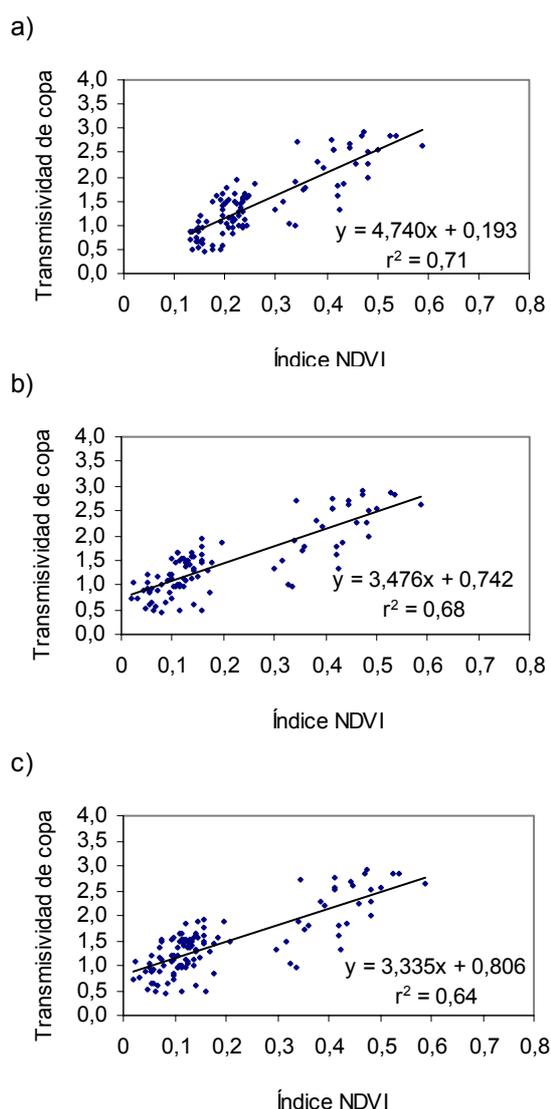


Figura 23- Relación entre las medidas de transmitancia de copa obtenidas en campo (olivar extensivo e intensivo) con el PCA y los valores del índice NDVI obtenido mediante las imágenes de tipo multiespectral del sensor CASI (a); del satélite QUICKBIRD en el año 2003 (b), y en 2003 / 2004 (c).

La Figura 24 muestra un mapa de distribución de transmitancia de copa para la parcela de olivar extensivo (Finca “El Tobazo”) elaborado a partir de las lecturas de la imagen del satélite QUICKBIRD obtenida en el año 2003. La transmitancia de copa fue determinada utilizando la relación mostrada en la Figura 23.b y a partir del valor del índice NDVI para cada copa, observándose zonas de menor transmitancia de copa en la zona sur de la parcela.

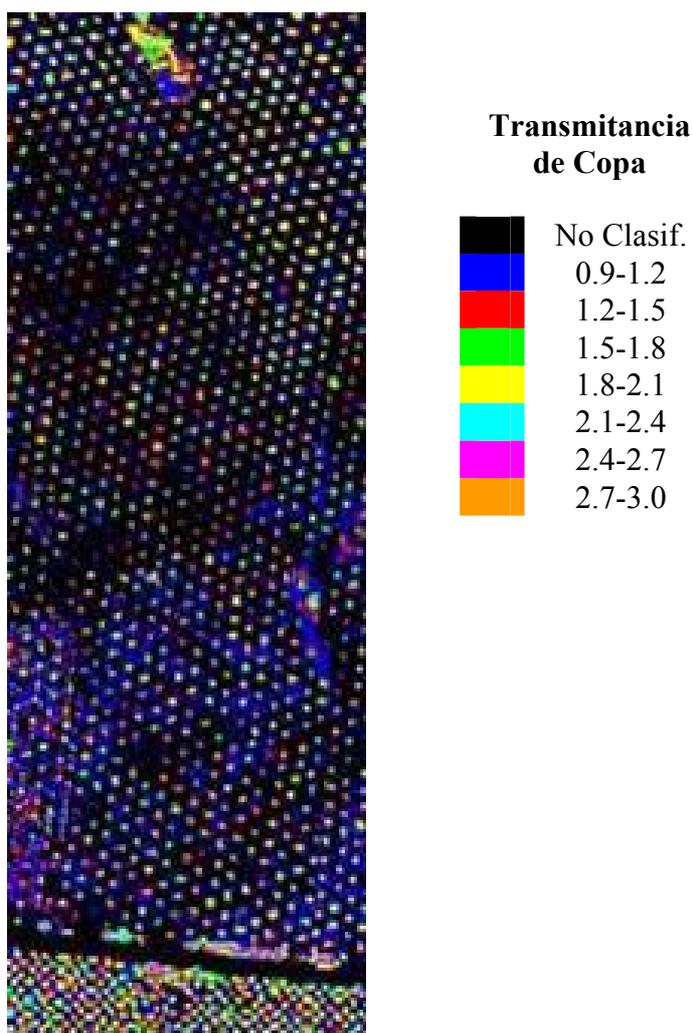


Figura 24- Mapa de la variabilidad de la transmitancia de copa en la parcela de olivar extensivo (Finca “El Tobazo”).

La Figura 25 muestra la variabilidad de transmitancia de copa existente en toda la zona cubierta por la imagen de satélite QUICKBIRD (8 km x 8 km) obtenida en el año de 2003, evidenciando la aplicación de dicha metodología en la elaboración de mapas de

distribución de dicha variable biofísica en grandes áreas, permitiéndonos destacar en el área de estudio zonas de mayor y menor transmitancia.

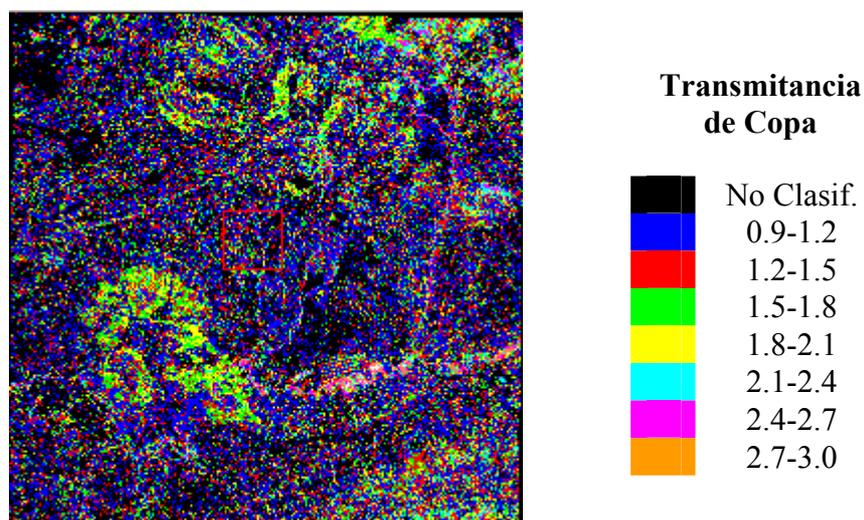


Figura 25- Mapa de la variabilidad de la transmitancia de copa en toda la zona de 8 km x 8 km cubierta por la imagen de satélite QUICKBIRD obtenida en el año 2003.

En la Figura 26 se muestra la variabilidad de transmitancia de copa en pequeñas zonas de la imagen del satélite QUICKBIRD obtenida en el año 2003, donde se puede observar árboles con baja y alta transmitancia de copa.

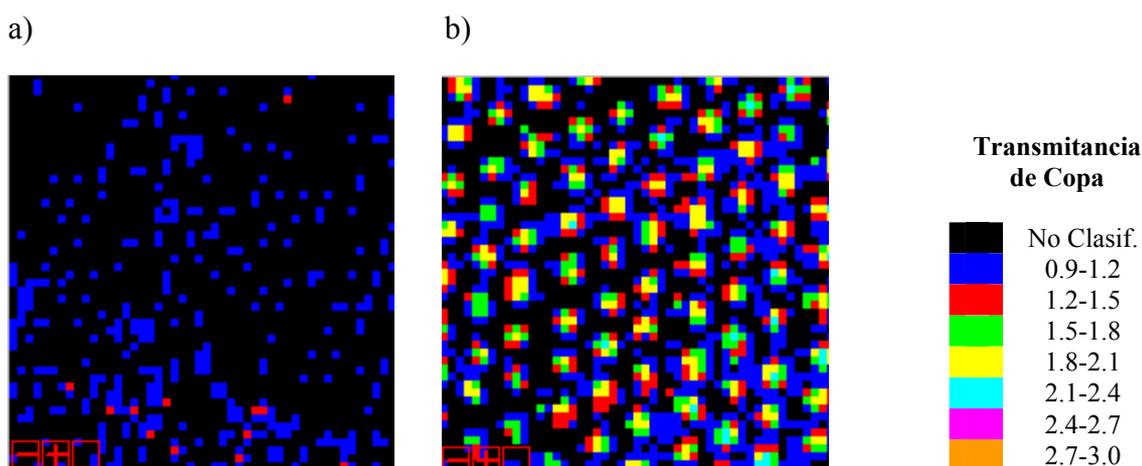


Figura 26- Mapas de la variabilidad de la transmitancia de copa en pequeñas zonas de la imagen de satélite QUICKBIRD obtenida en el año de 2003, con baja transmitancia (a) y alta transmitancia de copa (b).

3.4 Estimación de Índice de Área de Planta mediante Índices de Vegetación Estructurales

En el año 2003, el Índice de Área de Planta (IAP) en la finca de olivar extensivo (66 árboles seleccionados) varió entre 0,68 y 3,43, mientras que en la parcela de olivar intensivo (29 árboles medidos) varió entre 1,07 y 4,07. Aunque el olivo de mayor IAP se midió en el olivar intensivo, y el de menor en el olivar extensivo, en las dos parcelas tenemos un intervalo de valores de IAP similar, pese a la diferente estructura de copa de los olivos que se observó en el campo entre parcelas. En 2004, el IAP en la finca de olivar extensivo varió entre 1,24 y 2,69 (20 olivos medidos de los 66 seleccionados en el año anterior), por lo que tenemos menor variabilidad en el conjunto de medidas de IAP, descritas en la Tabla 10.

Tabla 10- Valores mínimo y máximo, media y desviación típica del Índice de Área de Planta obtenidos en los años 2003 y 2004 para el olivar extensivo y en 2004 para el olivar intensivo.

Variables de Estudio		Año 2003		Año 2004
		Olivar extensivo	Olivar intensivo	Olivar extensivo
Índice de Área de Planta (IAP, m ² /m ²)	Valor Mínimo	0,68	1,07	1,24
	Valor Máximo	3,43	4,07	2,69
	Media	1,67	2,66	1,86
	Desviación	0,58	0,72	0,41

Los resultados obtenidos entre los índices de vegetación calculados a partir de las imágenes multiespectrales del sensor aerotransportado CASI y del satélite QUICKBIRD, y los valores de IAP medidos en las 2 fincas de olivar extensivo e intensivo para el año 2003, y los medidos en 2004 solamente en el olivar extensivo, se observan en la Tabla 11. Se utilizó como primera aproximación al método los valores conocidos de densidad de área de planta (DAP), área proyectada por la copa (Ap) y volumen de copa (V) para cada árbol.

Los índices NDVI y SR fueron los que mejor se correlacionaron con IAP tanto en la imagen obtenida con el sensor aerotransportado CASI ($r^2=0,55$) como en la imagen obtenida mediante el satélite QUICKBIRD en el año 2003 ($r^2=0,52$). Los coeficientes de determinación (r^2) resultantes de la relación entre IAP y los índices obtenidos mediante la imagen del satélite QUICKBIRD adquirida en el año de 2004 fueron de la misma forma muy bajos ($r^2=0,01$), por el mismo motivo citado anteriormente para la transmitancia de copa. Analizando la relación existente entre los índices obtenidos en la imagen del satélite QUICKBIRD de los años 2003 y 2004 juntos e IAP, se pudo comprobar que los índices NDVI y SR fueron también, en este caso, los que mejor se correlacionaron ($r^2=0,48$).

Tabla 11- Coeficientes de determinación (r^2) resultantes de la relación entre las medidas de IAP obtenidas en campo (olivar extensivo e intensivo) con el sensor PCA y los valores promedios de los índices obtenidos mediante las imágenes del sensor CASI y del satélite QUICKBIRD de tipo multiespectral: n=95 árboles, año 2003; n=20 árboles, año 2004; y n=115 árboles, años 2003 / 2004.

INDICE DE AREA DE PLANTA (IAP)				
INDICES	SENSOR CASI (AÑO 2003)	SATÉLITE QUICKBIRD		
		AÑO 2003	AÑO 2004	AÑOS 2003 / 2004
	r^2	r^2	r^2	r^2
NDVI	0,55	0,52	0,01	0,48
RDVI	0,51	0,51	0,02	0,47
MSR	0,52	0,50	0,01	0,46
SR	0,55	0,52	0,01	0,48

NDVI y SR fueron los índices que mejor comportamiento tuvieron en la relación con IAP, tanto en la imagen del sensor aerotransportado CASI como en la del satélite QUICKBIRD, como se puede observar para NDVI en la Figura 27.

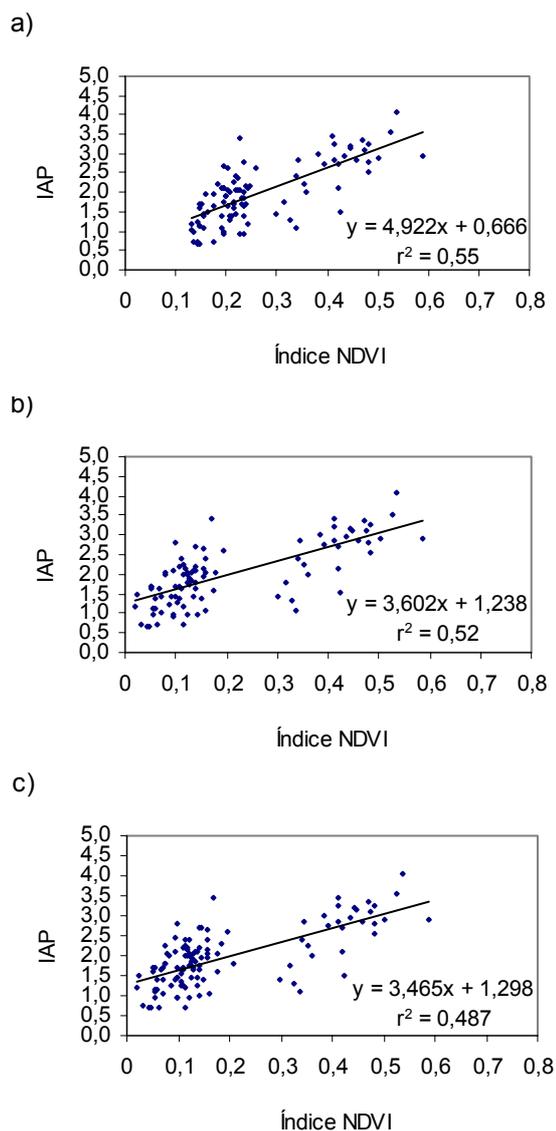


Figura 27- Relación entre las medidas de IAP obtenidas en campo (olivar extensivo e intensivo) y los valores del índice NDVI obtenido mediante las imágenes de tipo multiespectral del sensor CASI (a), del satélite QUICKBIRD en el año 2003 (b), y en 2003 / 2004 (c).

De un modo general, los índices de vegetación estructurales (NDVI, RDVI, MSR y SR) demostraron ser eficaces en la validación de los valores obtenidos de IAP, a pesar de que presentaron una menor correlación (Tabla 11) frente a los mayores coeficientes de determinación (r^2) obtenidos entre los índices y los valores de transmitancia de copa medidos en campo con el PCA (Tabla 10). Estos resultados nos indican que pueden existir otras fuentes de error en el proceso de cálculo de IAP a partir de los valores de transmitancia de copa. Estos errores pueden tener su origen en las medidas en el campo

del espesor de copa y del área proyectada de copa, ya que dichas variables se utilizan para calcular el volumen de copa, DAP e IAP.

La Figura 28 muestra un mapa de distribución de IAP para la parcela de olivar extensivo (Finca “El Tobazo”) efectuado a partir de las estimaciones realizadas por el satélite QUICKBIRD, mostrando su aplicabilidad para la medida de dicha variable biofísica en zonas extensas de olivar. El IAP fue determinado utilizando la relación mostrada en la Figura 27.b y a partir del valor del índice NDVI para cada copa.

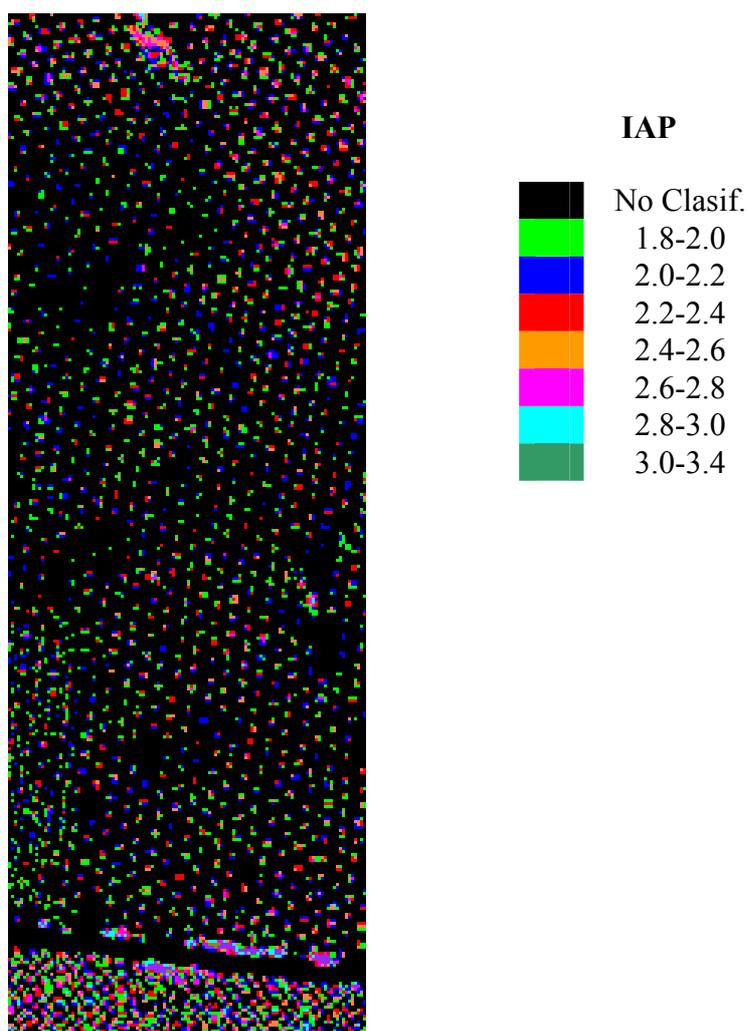


Figura 28- Mapa de la variabilidad de IAP en la parcela de olivar extensivo (Finca “El Tobazo”).

La Figura 29 muestra la variabilidad del índice de área de planta existente en la zona cubierta por la imagen de satélite QUICKBIRD (8 km x 8 km) obtenida en el año de 2003, evidenciando que los mapas de distribución de IAP en grandes áreas son una

buena herramienta que tenemos a nuestra disposición permitiéndonos la cuantificación espacial de IAP en extensas zonas de estudio.

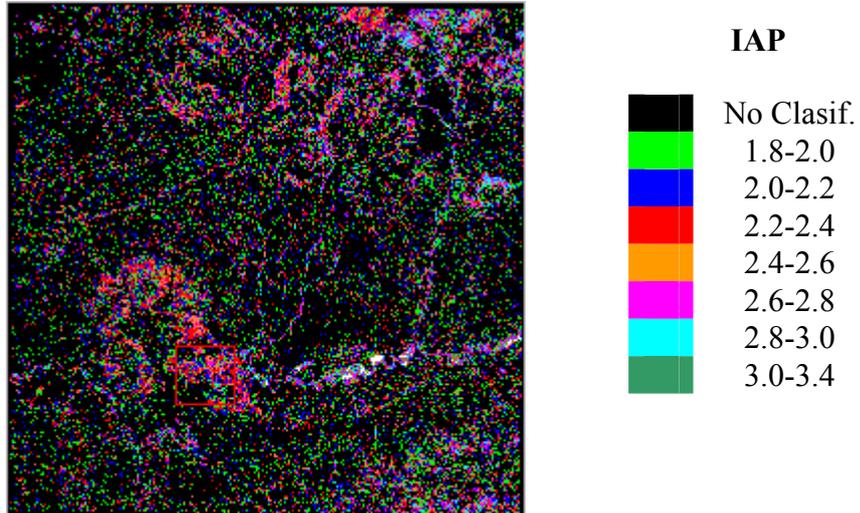


Figura 29- Mapa de la variabilidad de IAP en una zona extensa (8 Km x 8 Km) a partir de la imagen de satélite QUICKBIRD obtenida en el año 2003.

4. CONCLUSIONES

El presente trabajo estudia la estimación de parámetros biofísicos en olivar a partir de datos de teledetección de alta resolución espacial y espectral. La cuantificación de parámetros biofísicos mediante teledetección en cultivos como el olivar tiene gran dificultad dadas sus características de cubierta discontinua, requiriendo métodos de alta resolución espacial que permitan la identificación de árboles de forma independiente, así como la obtención de radiación en bandas espectrales sensibles a los parámetros de interés. En general, la monitorización de parámetros biofísicos de un cultivo usando datos de campo exclusivamente es tedioso, caro, y requiere un tiempo considerable para la realización de las medidas necesarias. Este trabajo demuestra que parámetros como el índice de área de planta, área proyectada y transmitancia de copa pueden estimarse a escala de árbol de forma operativa a partir de imágenes del satélite QUICKBIRD de alta resolución espacial.

El algoritmo automatizado TD_LWS y TD_GF_REF demostró ser una metodología viable de identificación y delineación de copas de árbol para la estimación del área proyectada a partir de imágenes tanto de tipo aerotransportado CASI ($r^2=0,83$), como a nivel de satélite con QUICKBIRD en modo pancromático ($r^2=0,53$). Esta metodología permite la automatización en la delineación de copas en grandes superficies y la generación de mapas de su distribución espacial, útiles en estudios de riesgo de erosión, interceptación de la radiación y agricultura de precisión. Pese a que la metodología muestra peores resultados en imágenes de tipo pancromático que en multiespectral, debido a las mayores dificultades en separar la vegetación del suelo si no existen bandas en el rojo e infrarrojo cercano, este trabajo demuestra la viabilidad de transferir estos métodos de estimación de área proyectada a escala de satélite para la realización del seguimiento global de grandes extensiones de olivar.

El volumen de copa se estimó adecuadamente a partir del área proyectada de copa calculado mediante las imágenes en estudio. El volumen de copa estimado a partir de las imágenes del sensor CASI y satélite QUICKBIRD se correlacionó con el medido en campo, obteniéndose coeficientes de determinación (r^2) de 0,79 y 0,46, respectivamente. Sin embargo, el volumen de copa para árboles de muy reducida área proyectada (inferior a 1 m²) no se estimó correctamente, debido a que el algoritmo no delimitó con precisión las copas de estos árboles en las imágenes, llevando a una

sobrestimación del área proyectada dadas las características de resolución espacial de las imágenes.

A partir del análisis de las imágenes de tipo multiespectral relativas a las 2 fincas de olivar extensivo e intensivo, se pudo evaluar que el índice NDVI fue el que mejor se correlacionó con las medidas correspondientes de transmitancia de radiación bajo copa medida en campo con el PCA, tanto en la imagen adquirida por el sensor CASI ($r^2=0,71$) como en la del satélite QUICKBIRD ($r^2=0,68$). Los resultados obtenidos entre los índices calculados a partir de las imágenes y los valores de IAP medidos en los olivos de las 2 fincas demostraron que los índices NDVI y SR fueron en este caso los que mejor se correlacionaron tanto en la imagen CASI ($r^2=0,55$) como en la imagen de satélite QUICKBIRD ($r^2=0,52$). Estos resultados evidencian que a partir del cálculo de los índices de vegetación estructurales (NDVI y SR) es posible estimar las variables biofísicas transmitancia de copa e IAP a partir de imágenes de satélite.

Una vez demostrada la viabilidad de estimación de parámetros biofísicos mediante sensores aerotransportados y satélite en 2 parcelas de olivar, sería oportuna la continuidad de este estudio considerando distintos tipos de olivar, con distintos marcos de plantación, sistemas de manejo y tipos de poda, con el fin de investigar si las metodologías aquí descritas permiten una monitorización de grandes zonas de olivar en Andalucía donde se mezclan variedades y marcos de plantación.

5. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Ares, A.; Fownes, J. H. 2000. Productivity, nutrient and water-use efficiency of Eucalyptus Saligna and toona ciliate in Hawaii. *Forest Ecology and Management*, v. 139, p. 227-236.
- Asrar, G.; Fuchs, M.; Kanemasu, E.T.; Hatfield, J.L., 1984. Estimating absorbed photosynthetic radiation and leaf area index from spectral reflectance in wheat. *Agronomy Journal*, 76(2) 300-306.
- Asrar, G., Kanemasu, E. T., Yoshida, M., 1985. Estimates of leaf area index from spectral reflectance of wheat under different cultural practices and solar angle. *Remote Sensing of Environment*, 17, 1–11.
- Baldocchi, D., Hutchison, B., Matt, D., McMillen, R., 1986. Seasonal variation in the statistics of photosynthetically active radiation penetration in an oak-hickory forest. *Agriculture, Forest and Meteorology* 36, 343-361.
- Bannari, A., Morin, D., Bonn, F. and Huete, A. R., 1995. A review of vegetation indices. *Remote Sensing Reviews* 13, 95-120.
- Barbezat, V., & Jacot, J., 1999. The CLAPA project: Automated classification of forest with aerial photographs. *Proc. Internacional Forum: Automated Interpretation of High Spatial Resolution Digital Imagery for Forestry*, Victoria, Canada. February 10–12, 1998 (p. 345– 356).
- Barclay H. J.; Trofymow J. A.; Leach R. I., 2000. Assessing bias from boles in calculating leaf area index in immature Douglas-fir with the LI-COR canopy analyzer. *Agricultural and Forest Meteorology*, v. 100, p. 255-260.
- Baret, F., Guyot, G., Major, D. J., 1989. TSAVI: A vegetation index which minimizes soil brightness effects on LAI and APAR estimation. *Proc. IGARSS'89 and 12th Canadian Symposium on Remote Sensing*, Vancouver, Canada (p. 1355– 1358).
- Baret, F., Guyot, G. 1991. Potentials and limits of vegetation indices for LAI and PAR assessment. *Remote Sensing of Environment*, 35, 161– 173.
- Barnes, J.D. 1992. A reappraisal of the use of DMSO for the extraction and determination of chlorophylls a and b in lichens and higher ciency plants. *Environmental Experimental Botany*. 2, 85-100.
- Bauer, M.E., 1985. Spectral inputs to crop identification and condition assessment. In: *Proceedings of the IEEE*, v.73, n.6, 1071-1085.

- Brakensiek, D.L., Rawls, W.J., 1983. Agricultural management effects on soil water processes. Part II: Green and Amp parameters for crusting soils. *Trans. ASAE* 26, 1753-1759.
- Brandtberg, T., Walter, F., 1998. Automated delineation of individual tree crowns in high spatial resolution aerial images by multiple-scale analysis. *Machine Vision and Applications*, 11, 64– 73.
- Broge, N. H., Leblanc, E., 2000. Comparing prediction power and stability of broadband and hyperspectral vegetation indices for estimation of green leaf area index and canopy chlorophyll density. *Remote Sensing of Environment* 76, 156-172.
- Broge, N.H., Mortensen, J.V., 2002. Deriving green crop area index and canopy chlorophyll density of winter wheat from spectral reflectance data. *Remote Sensing of Environment* 81, 45-57.
- Brown, L., Chen J.M., Lablanc, S.G., Cihlar, J., 2000. A shortwave infrared modification to the simple ratio for LAI retrieval in boreal forests: An image and model analysis. *Remote Sensing of Environment* 71, 16– 25.
- Buschmann, C., Nagel, E., 1993. In vivo spectroscopy and internal optics of leaves as basis for remote sensing of vegetation. *International Journal of Remote Sensing*, 14, 711-722.
- Carter, G. A., 1994: Ratios of leaf reflectances in narrow wavebands as indicators of plant stress, *International Journal of Remote Sensing*, 15, 697-704.
- Chakraborty, M., Panigraphy, S., Sharma, S.A., 1997. Discrimination of rice crop grown under different cultural practices using temporal ERS-1 synthetic aperture radar data. *ISPRS J. Photogramm.* 52, 183–191.
- Chen, J., Cihlar, J., 1996. Retrieving leaf area index of boreal conifer forests using Landsat Thematic Mapper. *Remote Sensing of Environment*, 55, 153– 162.
- Chen J., Barak, P., 1982. Iron nutrition of plants in calcareous soils, *Adv. Agron.* 35, 217-240.
- Chen, J., 1996. Evaluation of vegetation indices and modified simple ratio for boreal applications. *Canadian Journal Remote Sensing*, 22, 229-242.
- Chung, S., Horton, R., 1987. Soil heat and water flow with a partial surface mulch. *Water Resources Research*. 23, 2175-2186.
- Colombo R., Bellingeri D., Fasolini D., Marino C. M., 2003. Retrieval of leaf area index in different vegetation types using high resolution satellite data. *Remote Sensing of Environment* 86, 120–131.

- Consejo Oleícola Internacional, 2003. Series Estadísticas del Aceite de Oliva y de la Aceituna de Mesa.
- Culvenor, D. S., 2002. TIDA: An algorithm for the delineation of tree crowns in high spatial resolution digital imagery. *Computers & Geosciences* 28, 333-44.
- Curran, P.J., 1983. Multispectral remote sensing for the estimation of green leaf area index. *Phil. Trans. Roy. Soc. London Ser. A* 309, 257-270.
- Curran, P.J., J. Dungan, H.L. Gholz. 1992. Seasonal LAI measurements in slash pine using Landsat TM. *Remote Sensing of Environment* 39, 3-13.
- Daughtry, C.S.T., 1990. Direct measurements of canopy structure. *Remote Sensing. Reviews.* 5, 45–60.
- Daughtry, C. S. T., Walthall, C. L., Kim, M. S., Brown de Colstoun, E., McMurtrey III, J. E., 2000. Estimating Corn Leaf Chlorophyll Concentration from Leaf and Canopy Reflectance. *Remote Sensing of Environment* 74, 229-239.
- Dawson, T. P., Curran, P. J., Plummer, S. E., 1998. LIBERTY-Modeling the effects of leaf biochemical concentration on reflectance spectra, *Remote Sensing of Environment*, 65, 50-60.
- Denden, M., Dkhil B.B., Mathlouthi, Bouaouina T., 2002. Estimación de la superficie foliar del olivo mediante fotografías hemisféricas. *Ciencia y Técnica-Olive / num. 90*.
- Disperati, A. A.; Oliveira-Filho, P. C. 2005. Delineation of individual trees in high resolution aerial photographs, through their peripheral shadows: case study in araucaria forest. *Revista Árvore* v 29, nº2.
- Dralle, K., Rudemo, M., 1997. Stem number estimation by kernel smoothing of aerial photos. *Canadian Journal of Forest Research*, 26, 1228– 1236.
- Everitt, J.H., Escobar, D.E., Villarreal, R., Alaniz, M.A., Davis, M.R., 1993. Canopy light reflectance and remote sensing of Shin Oak (*Quercus havardii*) and associated vegetation. *Weed Sci.* 41, 291–297.
- Everitt, J.H., Richerson, J.V., Alaniz, M.A., Escobar, D.E., Villarreal, R., Davis, M.R., 1994. Light reflectance characteristics and remote sensing of Big Bend Loco (*Astragalus mollissimus* var *earlei*) and Wooton Loco (*Astragalus wootonii*). *Weed Sci.* 42, 115–122
- Elvidge C.D., Chen, Z., 1995. Comparison of Broad-Band and Narrow Band Red and Near-Infrared Vegetation Indices. *Remote Sensing of Environment.* 54, 38-48.

- Fassnacht, K. S., Gower, S. T., Norman, J. M., McMurtrie, R. E., 1994. A comparison of optical and direct methods in estimating foliage surface area, index in forests. *Agriculture Forest and Meteorology* 71, 183-207.
- Fassnacht, K. S., Gower, S. T., MacKenzie, M. D., Nordheim, E. V., Lillesand, T. M. 1997. Estimating the leaf area index of north central Wisconsin forest using Landsat Thematic Mapper. *Remote Sensing of Environment*, 61, 229–245.
- Fernandez-Escobar, R., Moreno, R., Garcia-Creus, M., 1999. Seasonal changes of mineral nutrients in olive leaves during the alternate-bearing cycle, *Scientia Horticulturae* 82, 24-45.
- Fereres, E., Pruitt, W.O., Beutel, J.A., Henderson, D.W., Holzapfel, E., Shulbach, H., Uriu, K. 1981. ET and drip irrigation scheduling. En Fereres, E. (Editor). *Drip Irrigation Managements*. University of California. Div. of Agric. Sci. n°. 21259. p: 8-13.
- Franklin, S. E., Wulder, M. A., 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*, 13, 2627– 2632.
- Ganapol, B.D., Johnson, L.F., Hammer, P.D., Hlavka, C.A. Peterson, D.L., 1998. LEAFMOD: a new within-leaf radiative transfer model, *Remote Sensing of Environment*, 63, 182-193.
- Gamon, J. A., Penuelas, J., Field, C. B., 1992. A narrow-waveband spectral index that tracks diurnal changes in photosynthetic efficiency. *Remote Sensing of Environment*, 41, 35– 44.
- Gao, W., Lesht, B.M., 1997. Model Inversion of Satellite-Measured Reflectances for Obtaining Surface Biophysical and Bidirectional Reflectance Characteristics of Grassland. *Remote Sensing of Environment*. 59, 461-471.
- García Morillo J., 2004. Medida del índice de área foliar y cobertura del suelo en olivar mediante teledetección. Trabajo Profesional Fin de Carrera. Universidad de Córdoba- Departamento de Agronomía.
- Gastellu-Etcheberry, J.P., Demarez, V., Pinel, V., Zagolski, F., 1996. Modeling radiative transfer in heterogeneous 3-D vegetation canopies, *Remote Sensing of Environment*, 58, 131-156.
- Gammel, F., Varjo, J., Strandstrom, M. y Kuusk, A., 2002. Comparison of measured boreal forest characteristics with estimates from TM data and limited ancillary information using reflectance model inversion. *Remote Sensing of Environment*, 81, 365-377.

- Gerylo, G., Hall, R. J., Franklin, S. E., Roberts, A., Milton, E. J., 1998. Hierarchical image classification and extraction of forest species composition and crown closure from airborne multispectral images. *Canadian Journal of Remote Sensing*, 24(3), 219–232.
- Gholz, H. L., 1982. Environmental limits on aboveground net primary production, leaf area, and biomass in vegetation zones of the Pacific Northwest. *Ecology* 63, 469-481.
- Gilbert, M. A., Gandía, S., Meliá, J., 1996. Analyses of spectral – biophysical relationships for a corn canopy. *Remote Sensing of Environment*, 55, 11- 20.
- Gitelson, A., Merzlyak, M. N. 1994a. Quantitative estimation of chlorophyll using reflectance spectra: experiments with autumn chestnut and maple leaves. *Journal of Photochemistry and Photobiology (B)*, 22, 247–252.
- Gitelson, A. A., Merzlyak, M. 1994b. Spectral reflectance changes associated with autumn senescence of *Asculus hippocastanum* and *Acer platanoides* leaves. Spectral features and relation to chlorophyll estimation. *Journal of Plant Physiology*, 143, 286–292.
- Gitelson, A. A. Merzlyak, M. N., 1996. Signature Analysis of Leaf Reflectance Spectra: Algorithm Development for Remote Sensing of Chlorophyll, *Journal of Plant Physiology*, 148, 494-500.
- Gitelson, A.A., Merzlyak. M.N., 1997. Remote estimation of chlorophyll content in higher plant leaves. *International. Journal Remote Sensing*, 18, 2691–2697.
- Gitelson A. A, Kaufman Y. J., Stark R., Rundquist D.C., 2002a. Novel algorithms for remote estimation of vegetation fraction. *Remote Sensing of Environment* 80, 76–87.
- Gitelson A. A, Stark R, Grits U, Rundquist DC, Kaufman YJ, Derry D., 2002b. Vegetation and soil lines in visible spectral space: a concept and technique for remote estimation of vegetation fraction. *International. Journal Remote Sensing* 23, 2537–2562.
- Gitelson A. A., Viña A., Arkebauer T.J., Rundquist D.C., Keydan G.P., Leavitt B. 2003. Remote estimation of leaf area index and green leaf biomass in maize canopies. *Geophys Res Lett* 30(5) 1248.
- Goel, N.S., Strebel, D.E., 1983. Inversion of vegetation canopy reflectance models for estimating agronomic variables: I. Problem definition and initial solution using Suits' model. *Remote Sensing of Environment*, 13, 487-507.
- Goel, N.S., Thompson, R.L., 1984. Inversion of vegetation canopy reflectance models for estimating agronomic variables: III. Estimation using only canopy reflectance data as illustrated by the Suits model. *Remote Sensing of Environment*, 15, 223-236.

- Goel, N. S., Thompson, R. L., 1984a. Inversion of vegetation canopy reflectance models for estimating agronomic variables. IV. Total inversion of the SAIL model. . *Remote Sensing of Environment*, 15, 237–253.
- Goel, N. S., Thompson, R. L., 1984b. Inversion of vegetation canopy reflectance models for estimating agronomic variables V: Estimation of LAI and average leaf angle using measured canopy reflectances. . *Remote Sensing of Environment*, 16, 69–85.
- Goel, N. S., Deering, D. W., 1985. Evaluation of a canopy reflectance model for LAI estimation through its inversion. *IEEE Transactions Geoscience. Remote Sensing. GE-23*, 674–684.
- Goel, N. S, Grier, T., 1986. Estimation of canopy parameters for inhomogeneous vegetation canopies from reflectance data. II. Estimation of leaf area index and percentage of ground cover for row canopies. *International Journal of Remote Sensing* 7, 1263-1286.
- Goel, N. S., Grier, T., 1987. Estimation of canopy parameters of row planted vegetation canopies using reflectance data for only four views. *Remote Sensing of Environment*. 21, 37–51.
- Goel, N. S., Thompson, R. L., 2000. A snapshot of canopy reflectance models and a universal model for the radiation regime, *Remote Sensing Reviews*, 18, 197-225.
- Gómez, J.A., Battany, M., Renschler, C.S., Fereres, E. 2003. Evaluating the impact of soil management on soil loss in olive orchards. *Soil Use and Management*, 19, 127-134.
- Govaerts, Y. M., Verstraete, M. M., Pinty, B., Gobron, N., 1999. Designing optimal spectral indices: A feasibility and proof of concept study. *International Journal of Remote Sensing*, 20, 1853-1873.
- Gougeon, F. A., 1995a. A crown-following approach to the automatic delineation of individual tree crowns in high spatial resolution aerial images. *Canadian Journal of Remote Sensing*, 21(3), 274–284.
- Gougeon, F. A. 1995b. Comparison of possible multispectral classification schemes for tree crowns individually delineated on high spatial resolution MEIS images. *Canadian Journal of Remote Sensing*, 21(1), 1–9.
- Gougeon, F. A., Leckie, D. G., 2003. Forest information extraction from high resolution images using an individual tree crown approach. Information Report BC-X-396. Victoria, BC: Natural Resources Canada, Canadian Forest Service.

- Goward, S. N., Markham, B. L., Dye, D. G., Dulaney, W., Yang J., 1991. Normalized difference vegetation index measurements from the Advanced Very High Resolution Radiometer. *Remote Sensing of Environment* 35, 257-277.
- Gower, S. T., \ogt, K. A., and Grier, C. C., 1992. Carbon dynamics of Rocky Mountain Douglas-fir: influence of water and nutrient availability. *Ecology. Monogr.* 62(1):43-65.
- Grier, C. C., Rumrning, S., 1977. Leaf area of mature northwestern coniferous forests: relation to site water balance. *Ecology* v.58, 893-899.
- Haboudane D., Miller J. R., Tremblay N. Zarco-Tejada P. J. Dextraze L., 2002. Integrated narrow-band vegetation indices for prediction of crop chlorophyll content for application to precision agriculture. *Remote Sensing of Environment.* 81, 416-426.
- Haboudane D., Miller J. R., Pattey E., Zarco-Tejada P. J., Strachan I. A., 2004. Hyperspectral vegetation indices and novel algorithms for predicting green LAI of crop canopies: Modelling and validation in the context of precision agriculture. *Remote Sensing of Environment.* 90, 337-352.
- Hatfield, J.L., Pinter-Jr, P.J., 1993. Remote sensing for crop protection. *Crop Prot.* 12 (6), 403-413.
- Held A. A., Jupp D. L. D., 1994. Use of fue compact airborne spectral imager for remote sensing of vegetation functions and dynamics. CSIRO Divisions of Watter resources. Canberra, Australia, p 8.
- Hingston, F. J.; Galbraith, J. H.; Dimmock, G. M., 1998. Application of the process-based model BIOMASS to Eucalyptus globulus ssp. globulus plantations on exfarmland in South Western Australia - I. Water use by trees and assessing risk of losses due to drought. *Forest Ecology and Management*, v. 106, p. 141-156.
- Huemmrich, K.F., 2001. The GeoSail model: a simple addition to the SAIL model to describe discontinuous canopy reflectance, *Remote Sensing of Environment*, 75(3).
- Huete, A. R., 1988. A soil-adjusted vegetation index (SAVI). *Remote Sensing of Environment*, 25, 295-309.
- Huete, A.R., Jackson, R.D., 1988. Soil and atmosphere influence on the spectra of partial canopies. *Remote Sensing of Environment*, 25(1), 89 - 105.
- Huete AR, Didan K, Miura T, Rodriguez EP, Gao X, Ferreira LG, 2002. Overview of radiometric and biophysical performance of the MODIS vegetation indices. *Remote Sensing of Environment* 83, 195-213.
- Jackson, R.D., Huete, A.R., 1991. Interpreting vegetation indices. *Prev. Vet. Med.* 11, 185-200.

- Jacquemoud, S., Baret, F., 1990. Prospect: A model for leaf optical properties spectra. *Remote Sensing of Environment.*, 34, 75–91.
- Jacquemoud, S., Ustin, S. L., Verdebout, J., Schmuck, G., Andreoli, G., Hosgood, B., 1996. Estimating leaf biochemistry using the PROSPECT leaf optical properties model. *Remote Sensing of Environment*, 56, 194–202.
- Jensen, J. R., 2000. *Remote sensing of the environment: an earth resource perspective*. Prentice-Hall, Inc.
- Jolley, V.D., Brown, J.C., 1994. Genetically controlled uptake and use of iron by plants, In: Manthey, J.A., Crowley, D.E., Luster, D.G. (Eds.), *Biochemistry of metal micronutrients in the rhizosphere*, Lewis Publishers, Boca Raton, p. 251-266.
- Jonckheere I., Fleck S., Nackaerts K., Muysa B, Coppin P., Weiss M., Baret F., 2004. Review of methods for in situ leaf area index determination Part I. Theories, sensors and hemispherical photography. *Agricultural and Forest Meteorology* 121, 19-35.
- Johnson L.F., Roczen D.E., Youkhana S.K., Nemani R.R., Bosch D.F., 2003. Mapping vineyard leaf area with multispectral satellite imagery *Computers and Electronics in Agriculture* 38, 33-44.
- Jordan, C. F. 1969. Derivation of leaf-area index from quality of light on the forest floor. *Ecology* 50(4), 663-666.
- Karnieli, A., Kaufman, Y. J., Remer, L., Wald, A., 2001. AFRI—aerosol free vegetation index. *Remote Sensing of Environment*, 77, 10–21.
- Kaufman, Y. J., Tanre, D., 1992. Atmospherically resistant vegetation index (ARVI). *IEEE Transactions Geosciences Remote Sensing*, 30, 261– 270.
- Kim, M. S., Daughtry, C. S. T., Chappelle, E. W., McMurtrey III, J. E., Walthall, C. L., 1994. The use of high spectral resolution bands for estimating absorbed photosynthetically active radiation (Apar). *Proceedings of the 6th Symp. on Physical Measurements and Signatures in Remote Sensing*, Jan. 17–21, 1994, Val D’Isere, France (p. 299–306).
- Key, T., Warner, T. A., McGraw, J. B., & Fajvan, M. A., 2001. A comparison of multispectral and multitemporal information in high spatial resolution imagery for classification of individual tree species in a temperate hardwood forest. *Remote Sensing of Environment*, 75, 100–112.
- Kimes, D.S., Knyazikhin, Y., Privette, J.L., Abuelgasim, A.A., Gao, F., 2000. Inversion Methods for Physically-Based Models. *Remote Sensing Reviews*. 18, 381-439.

- Kuusik, A., 1998. Monitoring of vegetation parameters on large areas by the inversion of a canopy reflectance model. *International Journal Remote Sensing*. 19, 2893-2905.
- Laliberte, A. S., Rangoa, A., Havstad, K. M., Paris, J. F., Beck, R. F., McNeely, R., Gonzalez, A. L., 2004. Object-oriented image analysis for mapping shrub encroachment from 1937 to 2003 in southern New Mexico. *Remote Sensing of Environment* 88, 144-156.
- Lamb, D.W., Weedon, M.M., 1998. Evaluating the accuracy of mapping weeds in fallow fields using airborne digital imaging: *Panicum effusum* in oilseed rape stubble. *Weed Res.* 38, 443–451.
- Leckie, D. G., Gougeon, F. A., Walsworth, N., Paradine, D., 2003. Stand delineation and composition estimation using automated individual tree crown analysis. *Remote Sensing of Environment*, 88, 355–369.
- Leckie D. G., Gougeon F. A., Tinis S., Nelson T., Burnett C. N., Paradine D., 2005. Automated tree recognition in old growth conifer stands with high resolution digital imagery. *Remote Sensing of Environment* 94, 311–326.
- LI-COR, 1992. LAI-2000 plant canopy analyser: Instruction manual. Li-cor Inc. Lincoln, Nebraska. 182 p.
- Li, X., Strahler, A. H., Woodcock, C. E., 1995. A hybrid geometric optical-radiative transfer approach to modeling albedo and directional reflectance of discontinuous canopies, *IEEE Transactions on Geosciences and Remote Sensing*, 33, 466-480.
- Lichtenthaler, H.K., M. Lang, M. Sowinska, F. Heisel, J.A. Mieh, 1996. Detection of vegetation stress via a new high resolution fluorescence imaging system. *Journal Plant Physiology* 148, 599–612.
- Lillesaeter, O., 1982. Spectral reflectance of partly transmitting leaves. Laboratory measurements and mathematical modelling. *Remote Sensing of Environment*. 12, 247-254.
- McNaughton, K. G., Jarvis, P. G., 1983. Predicting effects of vegetation changes on transpiration and evaporation. In *Water Deficits and Plant Growth*. (T. T. Kozlowski. Ed), Academic- London, v.7, p. 145.
- Marschner, H., Romheld, V., Kissel, M., 1986. Different strategies in higher plants in mobilization and uptake of iron, *J. Plant Nutr.* 9, 695-713.
- Mariscal, M. J., Orgaz, F., Villalobos F. J., 1999. Modelling and measurement of radiation interception by olive canopies. *Agriculture, Forest and Meteorology* 100, 183-197.

- Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación (MAPA, 2003). Anuario de estadísticas Agroalimentarias .Madrid
- Monsi, M. Saeki, T., 1953. Über den Lichtfaktor in den Phanzengesellschaften and seine Bedeutung fur die Stoff produktion. *Jpn J. Bot.* 14, 22-52
- Muneni, R. B., Nemani, R. R., Running, S. W., 1997. Estimation of global leaf area index and absorbed par using radiative transfer models. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 35, 1380– 1393.
- Myneni, R. B., Hall, F. G., Sellers, P. S., Marshak, A. L., 1995. The interpretation of spectral vegetation indexes. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 33, 481– 486.
- Myneni, R. B., Marshak, A., Knyazikhin, Y, Asrar, G., 1991. Discrete ordinates methods for photon transport in leaf canopies, In *Photon-Vegetation Interactions: Applications in Optical Remote Sensing and Plant Ecology*, edited by R. B. Myneni and J. Ross, Springer-Verlag, Berlin, p. 45-109.
- Nemani, R., Pierce, L., Running, S., Band, L., 1993. Forest ecosystem processes at the watershed scale: Sensitivity to remotely-sensed leaf area index estimates. *International Journal Remote Sensing*, 14, 2519–2534.
- Ni, W., Li, X., Curtis, E., Caetano, M., and Strahler, A.H., 1999. An Analytical Hybrid GORT Model for Bidirectional Reflectance Over Discontinuous Plant Canopies, *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 37(2), 987-999.
- Norman, J. M., Welles, J. M., 1983. Radioactive transfer in an array of canopies. *Agronomy Journal*, 75, 481-488.
- North, P. R. J., 1996. Three dimensional forest light interaction model using a Monte Carlo method, *IEEE Transactions on Geosciences and Remote Sensing*, 34: 946-956.
- Oetter, D.R., Cohen, W.B., Berterretche, M., Maiersperger, T.K., Kennedy, R.E., 2000. Land cover mapping in an agricultural setting using multiseasonal Thematic Mapper data. *Remote Sensing of Environment*, 76, 139–155.
- Peñuelas, J., Filella, I., Lloret, P., Muñoz F., Vilajeliu M., 1995. Reflectance assessment of mite effects on apple trees. *International Journal Remote Sensing*, 16, 2727–2733.
- Peñuelas, J., Gamon, J.A., Fredeen, A.L., Merino, J., Field, C.B., 1994. Reflectance indices associated with physiological changes in nitrogen- and water-limited sunflower leaves. *Remote Sensing of Environment*, 48, 135–146.
- Pierce, L. L., Running. S. W., 1988. Rapid estimation of coniferous forest leaf area index using a portable integrating radiometer. *Ecology* 69, 1726-1 767.

- Peña-Barragán J.M, Jurado-Expósito M., López –Granados F., Atenciano S., Sanches de la orden M., Garcia-Ferrer, A., Garcia-Torres L., 2004. Assessing land-use in olives groves from aerial photographs. *Agriculture, Ecosystems and Environment* 103, 117-122.
- Peterson, D.L., Running, S.W., Asrar, G. 1989. Applications in forest science and management. In *Theory and applications of optical remote sensing*. Edited by G. Asrar. John Wiley & Sons, Inc., New York. p. 429–473.
- Pinz, A., 1991. A computer vision system for recognition of trees in aerial photographs. *Proc. International Association of Pattern Recognition Workshop*, College Park, MD, June 14–15, 1990 (p. 111– 124). NASA Conference Publication 3099.
- Ponzoni, F. J., 2001. Comportamento Espectral da Vegetação. In: Meneses, P. R., Netto, J. S. M. *Sensoriamento remoto, reflectância dos alvos naturais*. Brasília – DF: Editora Universidade de Brasília - UNB, Embrapa Cerrados, p 157-199.
- Pouliot, D.A., King, D.J., Pitt, D.G., Bell, F.W., 2002. Automated tree crown detection and delineation in high-resolution digital camera imagery of coniferous forest regeneration. *Remote Sensing of Environment*, 82, 322-334.
- Qi, J., Chehbouni, A., Huete, A.R., Keer, Y.H., Sorooshian, S., 1994. A modified soil vegetation adjusted index. *Remote Sensing of Environment* 48, 119–126.
- Qi, J., Cabot, F., Moran, M.S., Dedieu, G., 1995. Biophysical parameter retrievals using multidirectional measurements. *Remote Sensing of Environment*, 54, 71–83.
- Qi, J. Kerr, Y.H., Moran, M.S., Wertz, M., Huete, A.R., Sorooshian, S., Bryant, R., 2000. Leaf area index estimates using remotely sensed data and BRDF models in a semiarid region. *Remote Sensing of Environment*, 73, 18-30.
- Quackenbush, L. J., Hopkins, P. F., Kinn, G. J., 2000. Developing forestry products from high resolution digital aerial imagery. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 66 (11), 1337–1364.
- Rawls, W.J., Brakensiek, D.L. 1989. Estimation of soil water retention and hydraulic properties. En Morel-Seytoux, H.J. (Editor). *Unsaturated flow in hydrology: theory and practice*: NATO ASI. Series. Kluwer Academic Publisher. Dordrecht. p: 275-300.
- Richardson, A. J., Wiegand, C. L., Wajura, D. F., Dusek, D., Steiner, J. L., 1992. Multisite analyses of spectral– biophysical data for sorghum. *Remote Sensing of Environment*, 41, 71–82.

- Ripple W. J., Wang S., Isaacson D.L., Paine D. P., 1991. A preliminary comparison of Landsat Thematic Mapper and SPOT-1 HVR multispectral data for estimating coniferous forest volume. *International Journal of Remote Sensing*, v (12) n°9 1971-1977.
- Roderick M., Smith R., Cridland S., 1996. The precision of the NDVI derived from AVHRR observations. *Remote Sensing of Environment*, 56, 57–65.
- Robinson, T., Lakso, A., 1991. Bases of Yield and Production Efficiency in Apple Orchard System. *Journal American. Society Horticulture. Science*, 116(2): p. 118-192.
- Robinson, T., Lakso, A., Ren, Z., 1991. Modifying Apple Tree Canopies for Improved Production Efficiency. *Horticulture Science*, v. 26(8).
- Rock, B. N., Hoshizaki, T., Miller, J. R., 1988. Comparison of In Situ and airborne spectral measurements of the blue shift associated with forest decline, *Remote Sensing. of Environment*. 24, 109-127.
- Ross, J., 1975. Radioactive transfer in plant communities. En: Montheith, J.L. (Ed). *Vegetation and the atmosphere, Volume 1: Principles*. Academic Press, London. p.278.
- Rougean, J.L., Breon, F. M., 1995. Estimating PAR absorbed by vegetation from bidirectional reflectance measurements. *Remote Sensing of Environment*, 51, 37-384.
- Rondeaux, G., Steven, M., Baret, F., 1996. Integration of hyperspectral vegetation indices for adjusted vegetation indices. *Remote Sensing of Environment*, 55, 95–107.
- Rosema, A.W., Verhoef, W., Noorbergen, H., Borgesius, J.J., 1992. A new forest light interaction model in support of forest monitoring. *Remote Sensing of Environment* 42, p. 23-41.
- Rouse, J.W., Hass, R. H., Schell, J. A., Deering, D. W., Harlan, J. C., 1974. Monitoring the vernal advancements and retrogradation of natural vegetation. En: NASA/GSFC, Final Report, Greenbelt, MD, USA, p.:1-137.
- Running, S.W., Peterson, D. L., Spanner M.A., Teuber K. B. 1986. Remote sensing of coniferous forest leaf area. *Ecology*, 67, 273-276.
- Running, S. W., Nemani, R. R., Peterson, D. L., Band, L. E., Potts, D. F., Pierce L. L., Spencer M. A., 1989. Mapping Regional Forest Evapotranspiration and Photosynthesis by Coupling Satellite Data with Ecosystem Simulation. *Ecology*, v.70, nª. 4, p. 1090-1101.
- Schulze, E. D., De Vries, W., Hauhs, M., 1989. Critical loads for nitrogen deposition in forest ecosystems. *Water, Air and Soil Pollution*, 48, 451– 456.
- Sellers PJ, 1985. Canopy reflectance, photosynthesis and transpiration. *International Journal Remote Sensing*, 6: 1335–1372.

- Sellers, P.J., Mintz, Y., Sud, Y.C., Dalcher, A., 1986. A simple biosphere model (SiB) for use within general circulation models. *J. Atmos. Sci.* 43:505–531.
- Soudani K., Trautmann J. Walter J.M, 2001. Comparaison de méthodes optiques pour estimer l'ouverture de la canopée et l'indice foliaire en forêt feuillue. *C.R. Acad.Sci. Paris.Sciences de la vie.* 324, 381-392.
- Spanner, M. A., Pierce, L. L., Peterson, D. L., Running, S. W., 1990. Remote sensing of temperate coniferous forest leaf area index. The influence of canopy closure, understory vegetation and background reflectance. *International Journal Remote Sensing of Environment*, 11, 95–111.
- Tagliavini, M., Rombola, A.D., 2001. Iron deficiency and chlorosis in orchard and vineyard ecosystems, *European Journal of Agronomy* 15, 71-92.
- Teillet, P. M., Staenz K., Williams D.J., 1997. Effects of spectral, spatial and radiometric characteristics on remote sensing vegetation indices of forest regions. *Remote Sensing of Environment*, 61, 139-149.
- Tucker J., Holben B. N., Elgin J. H., McMurtrey J.E., III., 1981. Remote sensing of total dry matter accumulation in winter wheat. *Remote Sensing of Environment*, v.11, n.1, p.171-179.
- Turner, D. P., Cohen, W. B., Kennedy, R. E., Fassnacht, K. S., Briggs, J. M., 1999. Relationships between leaf area index and Landsat TM spectral vegetation indices across three temperate zone sites. *Remote Sensing of Environment*, 70, 52– 68.
- Verhoef, W., 1984. Light scattering by leaf layers with application to canopy reflectance modelling: the SAIL model. *Remote Sensing of Environment*, 16, 125-141.
- Vertessy, R.A., Benyon, R.G., O'Sullivan, S.K., Gribben, P.R., 1995. Relationships between stem diameter, sapwood area, leaf area and transpiration in a young mountain ash forest. *Tree Physiology*, 15, 559–567.
- Villalobos, F. J., Orgaz, F., Mateos L., 1995. Non-destructive measurement of leaf area in olive (*Olea europea* L.) trees using a gap inversion method. *Agriculture, Forest and Meteorology*, 73, 29-42.
- Vogelmann, J. E., Rock, B. N., Moss, D. M., 1993. Red edge spectral measurements from sugar maple leaves, *International Journal of Remote Sensing*. 14, 1563-1575.
- Wallace, A., 1991. Rational approaches to control of iron deficiency other than plant breeding and choice of resistant cultivars, *Plant Soil* 130, 281-288.
- Warner, T. A., Lee, J. Y., McGraw, J. B., 1999. Delineation and identification of individual trees in the eastern deciduous forest. *Proc. International Forum: Automated*

- Interpretation of High Spatial Resolution Digital Imagery for Forestry, Canadian Forest Service, Pacific Forestry Centre Victoria, British Columbia, February 10–12, 1998 (p. 81–91).
- Welles J M., Cohen S., 1996. Canopy structure measurement by gap fraction analysis using commercial instruments. *Journal of Experimental Botany*, 47(302), 1335–1342
- Welles, J.M., Norman, J.M., 1991. Instrument for indirect measurement of canopy architecture. *Agriculture Journal*, 83, 818–825.
- Weiss, M., Baret, F., Myneni, R.B., Pragnère, A., Knyazikhin, Y., 2000. Investigation of a model inversion technique to estimate canopy biophysical variables from spectral and directional reflectance data. *Agronomie*, 20, 3-22.
- Weiss M; Baret F; Smith G J; Jonckheere I; Coppin P., 2004. Review of methods for in situ leaf area index (LAI) determination. Part II, estimation of LAI, errors and sampling. *Agricultural and Forest Meteorology*, 121, 37–53
- Wulder, M., Niemann, K. O., Goodenough, D. G., 2000. Local maximum filtering for the extraction of tree locations and basal area from high spatial resolution imagery. *Remote Sensing of Environment*, 73, 103– 114.
- Zarco-tejada, P.J., Miller, J.R., Mohammed, G.H., Noland, T.L., 2000. Chlorophyll fluorescence effects on vegetation apparent reflectance: I. Leaf-level measurements and simulation of reflectance and transmittance spectra. *Remote Sens. Environ.* 74(3), 582–595.
- Zarco-tejada, P.J., Miller, J.R., Mohammed, G.H., Noland, T.L., Sampson, P.H., 2001: Scaling-up and model inversion methods with narrow-band optical indices for chlorophyll content estimation in closed forest canopies with hyperspectral data, *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 39(7), 1491-1507.

6. ANEXO: Artículo presentado en el V Congreso Ibérico de Ciencias Hortícolas realizado entre 22 y 27 de Mayo de 2005 en Porto, Portugal

Estimación de Variables Biofísicas en Olivar mediante Métodos de Teledetección por Satélite y Sensores Aerotransportados para su Integración en Agricultura de Precisión

João da Gama Minas¹, Pablo J. Zarco-Tejada¹, José A. Gómez¹ & M. Auxiliadora Soriano²

¹ Instituto de Agricultura Sostenible (IAS-CSIC), Córdoba, España, jminas@ias.csic.es

² Dpto. de Agronomía, Universidad de Córdoba, Córdoba, España

Resumen

El presente trabajo tiene por objetivo avanzar en la investigación de métodos para la estimación correcta de la distribución espacial de parámetros biofísicos en cultivo de olivar mediante teledetección. Durante 2003 y 2004 se realizaron medidas de área proyectada y transmisividad de copa en un olivar intensivo y otro extensivo situados en las fincas “El Tobazo” (Jaén) y “Alameda del Obispo, CIFA” (Córdoba), en España. Los datos de campo para validación se tomaron de 95 árboles seleccionados con alta variabilidad del índice de área foliar y área proyectada de copa, utilizando metodologías automatizadas de estimación de área de copa a partir de imágenes multiespectrales y pancromáticas del sensor aerotransportado CASI y el satélite QUICKBIRD. Las imágenes obtenidas de alta resolución espacial (entre 0,6 y 2,5 m) y espectral permitieron la aplicación de los algoritmos automáticos TD_LWS y TD_GF_REF de identificación y delineamiento de las copas de olivo para la estimación de dichas variables biofísicas. Los resultados obtenidos en la estimación del área de copa sugieren la viabilidad de los métodos propuestos, resultando coeficientes de determinación (r^2) entre 0,52 y 0,83, y errores cuadráticos medios (RMSE) entre 5 y 9 m². En la estimación de la transmisividad de la copa mediante CASI y QUICKBIRD fueron $r^2=0,71$ y $r^2=0,68$, respectivamente, permitiendo la estimación del índice de área de planta (IAP) con $r^2=0,55$.

Palabras clave: CASI, Quickbird, área proyectada, transmisividad, índice de área foliar

Abstract

Title: Estimation of crown biophysical variables in olive trees through airborne and satellite remote sensing methods. Progress made on the development of methods for the correct estimation of tree biophysical variables using remote sensing imagery is presented. Projected crown area and crown transmittance were measured in the field on 95 trees from two orchards in Córdoba and Jaén, southern Spain in 2003 and 2004, assuring a gradient in crown sizes, volume, area and crown transmittance. Automated methods were applied to multispectral and panchromatic imagery, using the TD_LWS - TD_GF_REF crown delineation algorithm to estimate projected crown area using

airborne multispectral CASI imagery of 1 m spatial resolution and 8 bands, and Quickbird satellite images acquired on the multispectral (4 bands) and panchromatic modes (1 band) in the visible and near infrared spectrum. Indices were calculated to study their relationships with crown transmittance.

Keywords: CASI, Quickbird, projected crown area, transmittance, leaf area index

Introducción

Las nuevas tecnologías, en particular la teledetección y los sensores aerotransportados de tipo digital y multiespectral, pueden permitir la evaluación de cultivos con elevado grado de precisión. El uso de índices de vegetación ha demostrado ser eficaz para la determinación de las propiedades biofísicas de cubiertas vegetales, puesto que éstos permiten maximizar la señal espectral de la vegetación minimizando efectos colaterales derivados de las condiciones de iluminación y suelo. Estos índices son combinaciones de dos o más bandas que pueden calcularse a partir de la señal de reflectancia obtenida por el sensor (Jackson y Huete, 1991). Esta facilidad de cálculo ha hecho que sean ampliamente usados en la actualidad como una herramienta no destructiva para la estimación de variables biofísicas (índice de área foliar, cobertura del suelo, biomasa) y como indicadores del estado de la vegetación (Baret y Guyot, 1991; Elvidge y Chen, 1995; Broge y Mortensen, 2002). Este trabajo tiene como objetivo la evaluación de la estimación del área proyectada de copa mediante algoritmos de delineación automática de copas de olivo utilizando imágenes del sensor aerotransportado CASI y del satélite Quickbird. Esta metodología tiene por objeto final la realización de mapas de distribución espacial del porcentaje de cobertura en olivar, permitiendo avanzar en la identificación de zonas de riesgo de erosión. Se hizo también la validación de la transmisividad de copa y del índice de área de planta a través de técnicas de análisis de imagen basadas en diferencias espectrales de la reflectancia de la vegetación, utilizando índices de vegetación de tipo multi e hiperespectral.

Material y Métodos

Los datos de campo necesarios para la posterior validación de los métodos propuestos se tomaron en dos explotaciones de olivar. El olivar extensivo, plantado a 12m x 12m, con 2-3 pies, está situado en la finca "El Tobazo" en Alcaudete (Jaén), mientras que el olivar intensivo pertenece al CIFA "Alameda del Obispo" de Córdoba, con olivos de un solo pie a un marco de 3,5m x 7m. En el olivar extensivo se seleccionaron 66 árboles y en el intensivo 29 árboles, asegurando un gradiente de densidades de área foliar. Posteriormente en cada uno de los árboles seleccionados se midió la radiación por encima (A) y por debajo (B) de la copa mediante el uso del PCA (LAI-2000 Plant Canopy Analyzer, LI-COR), con objeto de obtener los valores de transmisividad de copa (B/A). Para la medida del área proyectada por la copa sobre el suelo (A_p , m²) se dibujó sobre el terreno el contorno proyectado por la copa, para ello en cada olivo se trazaron un número variable de transectos (de 17 a 26, según la irregularidad de la copa) desde el tronco hasta el borde de la copa y se midió la longitud de cada transecto. La superficie proyectada por cada olivo se determinó sumando las áreas de los sectores circulares correspondientes a cada uno de los transectos. La transmisividad de la copa se relacionó con la Densidad de Área de Planta (DAP, área de

planta por unidad de volumen de cubierta, m^2/m^3), inclinación foliar efectiva (G) y el espesor de la copa (S) mediante la Ecuación 1 (Ross, 1975; Norman y Welles, 1983):

$$DAP = [-\ln(B/A)] / (G \times S) \quad [1]$$

El Índice de Área de Planta (IAP, área de planta por unidad de área de suelo, m^2/m^2) se calculó utilizando los datos de volumen de copa (V), DAP y A_p según la Ecuación 2:

$$IAP = DAP \times (V/A_p) \quad [2]$$

Las fincas de olivar intensivo y extensivo se sobrevolaron los días 21 y 22 de julio de 2003, respectivamente, con el sensor aerotransportado CASI (*Compact Airborne Spectrographic Imager*, ITRES Research Ltd, Canada). El sensor CASI permitió la generación de imágenes digitales programables multiespectrales en el intervalo del espectro del visible (490,7 nm) al infrarrojo cercano (800 nm), con 8 bandas espectrales y 1 m de resolución espacial. La resolución radiométrica de 12 bits de los datos obtenidos con el CASI fueron procesados a radiancia del sensor usando coeficientes de calibración obtenidos en laboratorio por el *Centre for research in Earth and Space Technology* (CRESTech) y York University (Canadá). La imagen multiespectral del sensor aerotransportado CASI permitió la posterior simulación de las características espectrales de imágenes de satélite de menor resolución espacial y de tipo pancromático (1 banda). Se utilizaron también imágenes del satélite Quickbird, una de tipo pancromático y otra multiespectral, obtenidas el 23 de julio de 2003. La imagen del canal pancromático, de resolución radiométrica de 11 bits y 0,6 m de resolución espacial, comprende una sola banda espectral en el rango de 450-900 nm. La imagen de tipo multiespectral tiene resolución radiométrica de 11 bits, 2,4 m de resolución espacial y 4 bandas espectrales (azul, 450-520 nm; verde 520-600 nm; rojo, 630-690 nm; infrarrojo cercano, 760-900 nm). La calibración radiométrica se realizó mediante coeficientes de calibración, utilizando el modelo de transferencia radiativa MODTRAN (Spectral Sciences, Inc., Burlington, MA) en ACORN (Remote Systems, Inc., Boulder, CO). Las parcelas elegidas en campo y los árboles seleccionados fueron identificadas en las imágenes mediante el sistema de tratamiento de imágenes digitales ENVI 3.6 (ENVI, 2000).

Para la identificación y delineamiento de copas de olivo se aplicaron a cada una de las imágenes el algoritmo automático TD_LWS - TD_GF_REF (Pouliot *et al.*, 2002) programados en IDL Virtual Machine 6.1, utilizando parámetros de entrada con objeto de obtener la estimación precisa del área proyectada en función de las características de la cubierta vegetal. La estimación del área proyectada se llevó a cabo en el olivar extensivo (a partir de la imagen del sensor CASI multiespectral, CASI simulando una imagen pancromática, y satélite Quickbird de tipo pancromática). En el análisis de las imágenes CASI y Quickbird de tipo multiespectral se calcularon 4 índices de vegetación para estudiar su relación con la transmisividad de copa y el IAP, utilizando los valores de campo medidos en el olivar extensivo e intensivo. Se utilizó el Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) desarrollado por Rouse *et al.* (1974), Renormalized Difference Vegetation Index (RDVI) mejorado por Rougen y Breon (1995), Modified Simple Ratio (MSR) propuesto por Chen (1996), y el Simple Ratio Index (SR) (Jordan, 1969; Rouse *et al.*, 1974). El cálculo de dichos índices se describe en la Ecuaciones [3] a [6],

$$NDVI = (R_{NIR} - R_{RED}) / (R_{NIR} + R_{RED}) \quad [3]$$

$$RDVI = (R_{NIR} - R_{RED}) / \sqrt{R_{NIR} + R_{RED}} \quad [4]$$

$$MSR = \frac{(R_{NIR} / R_{RED}) - 1}{\sqrt{(R_{NIR} / R_{RED}) + 1}} \quad [5]$$

$$SR = (R_{NIR} / R_{RED}) \quad [6]$$

siendo R_{NIR} y R_{RED} la reflectancia en el infrarrojo cercano (R_{800}) y en el rojo (R_{690}), respectivamente. Para cada árbol se estimó al valor medio de los índices citados anteriormente, considerando las tres componentes, suelo, sombra y vegetación.

Resultados

Las mejores relaciones entre la superficie proyectada de copa medida en el olivar extensivo y la estimada mediante algoritmos automáticos (Figura 1a) a partir de las imágenes CASI, CASI simulando una imagen pancromática y Quickbird de tipo pancromático, se muestran en las Figuras 1b, 2a y 2b. Los resultados indican una aceptable estimación del área proyectada a partir de las imágenes, mostrando de forma consistente que con la imagen CASI se obtuvo el mayor coeficiente de determinación ($r^2=0,83$) y menor error cuadrático medio ($RMSE=5,3 \text{ m}^2$), debido a sus características de alta resolución espacial y de tipo multiespectral. Pese a la limitación de las características de tipo pancromático de la imagen del satélite Quickbird (1 sola banda entre 450-900 nm), este trabajo sugiere la viabilidad de la estimación del área proyectada a nivel de árbol en grandes extensiones mediante satélite ($r^2=0,53$; $RMSE=9,0 \text{ m}^2$). En la Tabla 1 se muestran los resultados de la relación obtenida entre los índices obtenidos a partir de las imágenes y los valores de transmisividad de copa para todos los olivos medidos en las dos fincas con el PCA. De su análisis se constata que el índice NDVI fue el que mejor se correlacionó con la transmisividad, tanto en la imagen CASI ($r^2=0,71$) como en la del Quickbird ($r^2=0,68$). Los resultados obtenidos entre los índices calculados a partir de las imágenes y los valores del IAP medidos en los olivos de las 2 fincas se observan en la Tabla 2, utilizando como primera aproximación al método los valores conocidos de espesor de la copa (S) y volumen de copa (V) para cada árbol. El índice SR fue en este caso el que mejor se correlacionó en la imagen CASI ($r^2=0,55$) mientras que en la imagen de satélite Quickbird fue el índice NDVI el que proporcionó los mejores resultados ($r^2=0,52$).

Discusión

El algoritmo automatizado TD_LWS y TD_GF_REF (Pouliot *et al.*, 2002) demostró ser una metodología viable de identificación y delineamiento de copas de árbol para la estimación del área proyectada y transmitancia a partir de imágenes de teledetección de alta resolución espacial, tanto de tipo aerotransportado como a nivel de satélite con Quickbird en modo pancromático. Esta metodología permite la automatización en la delineación de copas en grandes superficies y la generación de mapas de su distribución espacial, útiles en estudios de riesgo de erosión, interceptación de la radiación y agricultura de precisión. Pese a que la metodología muestra peores

resultados en imágenes de tipo pancromático que en multiespectral, este trabajo muestra la viabilidad de transferir estos métodos a escala de satélite para la realización del seguimiento global de grandes extensiones de olivar.

Referencias

- Baret, F. and Guyot, G. (1991). Potentials and limits of vegetation indexes for LAI and APAR assessment. *Remote Sens. Environ.* 35:161-173
- Broge, N.H. and Mortensen, J.V. (2002). Deriving green crop area index and canopy chlorophyll density of winter wheat from spectral reflectance data. *Remote Sens. Environ.* 81:45-57.
- Chen, J. (1996). Evaluation of vegetation indices and modified simple ratio for boreal applications. *Can. J. Remote Sens.* 22:229-242.
- Elvidge C.D. and Chen, Z. (1995). Comparison of Broad-Band and Narrow Band Red and Near-Infrared Vegetation Indices. *Remote Sens. Environ.* 54:38-48.
- Jackson, R.D. and Huete, A.R. (1991). Interpreting vegetation indices. *Prev. Vet. Med.* 11:185-200.
- Jordan, C. F. (1969). Derivation of leaf-area index from quality of light on the forest floor. *Ecology* 50(4):663-666.
- LI-COR. (1992). LAI-2000 plant canopy analyser: Instruction manual. Li-cor Inc. Lincoln, Nebraska. 182 p.
- Norman, J. M. and Welles, J. M. (1983). Radioactive transfer in an array of canopies. *Agron. J.* 75:481-488.
- Pouliot, D.A., King, D.J., Pitt, D.G. and Bell, F.W. (2002). Automated tree crown detection and delineation in high-resolution digital camera imagery of coniferous forest regeneration. *Remote Sens. Environ.* 82:322-334.
- Ross, J. (1975). Radioactive transfer in plant communities. En: Montheith, J.L. (Ed). *Vegetation and the atmosphere, Volume 1: Principles.* Academic Press, London. 278 p.
- Rougean, J.L. and Breon, F. M. (1995). Estimating PAR absorbed by vegetation from bidirectional reflectance measurements. *Remote Sens. Environ.*, 51:375-384.
- Rouse, J.W., Hass, R. H., Schell, J. A., Deering, D. W. and Harlan, J. C. (1974). Monitoring the vernal advancements and retrogradation of natural vegetation. En: NASA/GSFC, Final Report, Greenbelt, MD, USA, pp.:1-137.

Tablas y Figuras

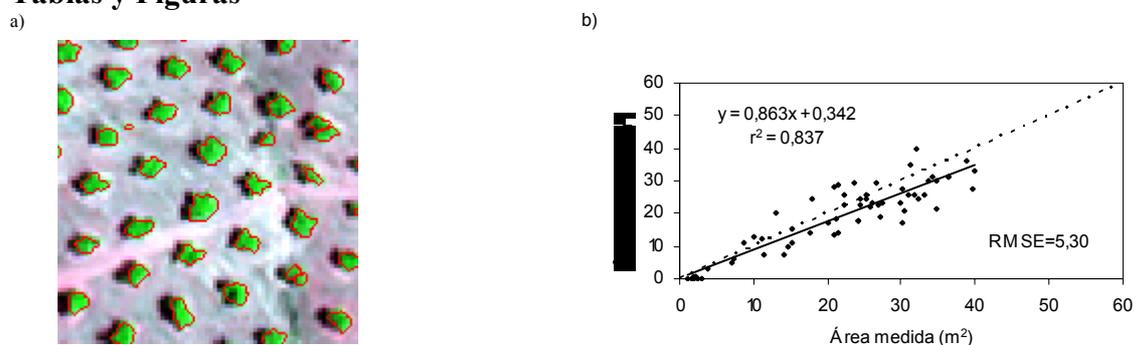


Figura 1.- Imagen CASI con la identificación y delineación de las copas ejecutada por el algoritmo (a) y relación entre las medidas de campo de área proyectada y las estimadas en la imagen CASI mediante el algoritmo TD_LWS - TD_GF_REF (b). (n=64 árboles).

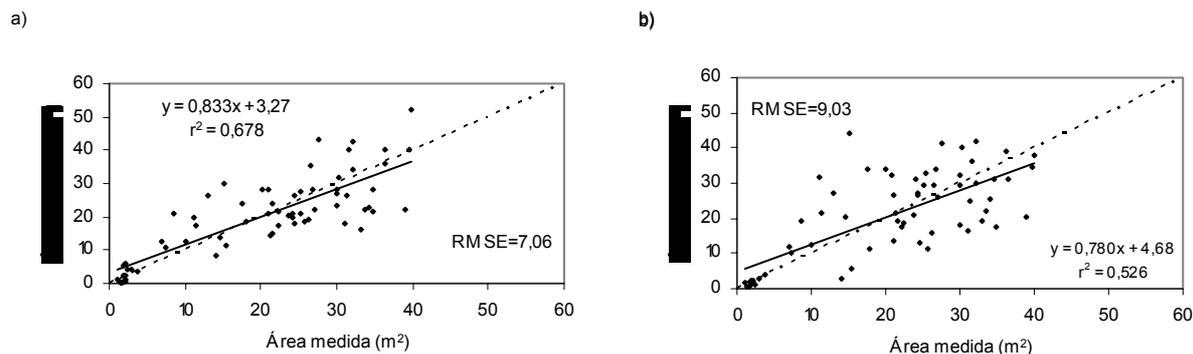


Figura 2.- Relación entre las medidas de campo de área proyectada y las estimadas mediante el algoritmo TD_LWS - TD_GF_REF a partir de imágenes CASI simulando pancromática (a) y Quickbird pancromática (b). (n=64 árboles).

Tabla 1.- Coeficientes de determinación (r^2) y errores cuadráticos medios (RMSE) resultantes de la relación entre las medidas de transmisividad de copa obtenidas en campo con el PCA y los valores promedios de los índices obtenidos mediante las imágenes del sensor CASI y la del satélite Quickbird de tipo multiespectral. (n=95 árboles).

Imagen CASI		Imagen Quickbird-Multiespectral	
Índice	r^2 (RMSE)	Índice	r^2 (RMSE)
NDVI	0,71 (1,31)	NDVI	0,68 (1,35)
RDVI	0,69 (1,41)	RDVI	0,67 (1,43)
MSR	0,69 (1,12)	MSR	0,66 (1,19)
SR	0,70 (0,56)	SR	0,67 (0,43)

Tabla 2.- Coeficientes de determinación (r^2) y errores cuadráticos medios (RMSE) resultantes de la relación entre los valores promedios de los índices obtenidos mediante las imágenes (sensor CASI, satélite Quickbird de tipo multiespectral) y el IAP. (n=95 árboles).

Imagen CASI		Imagen Quickbird-Multiespectral	
Índice	r^2 (RMSE)	Índice	r^2 (RMSE)
NDVI	0,54 (1,84)	NDVI	0,52 (1,89)
RDVI	0,51 (1,94)	RDVI	0,51 (1,96)
MSR	0,52 (1,66)	MSR	0,50 (1,74)
SR	0,55 (0,52)	SR	0,52 (0,62)