



Curso de especialista en SIG y Teledetección

2009-2010

Universidad de Castilla La Mancha

INSTITUTO DE DESARROLLO REGIONAL



**PROCESADO DE IMÁGENES DE SATÉLITE:
OBTENCIÓN DE MAGNITUDES
BIOFÍSICAS DE LA VEGETACIÓN**

Autores:

Ignacio Poveda Sánchez-Guerrero, Ing. Téc. Forestal (UCLM)

Inmaculada González Martín, Ing. Téc. Forestal (UCLM)

Alberto Díaz San Andrés, Lic. Geografía (UCM)

Claudio Balbontín Nesvara, Ing. Agrónomo (UCHile)

Albacete, 19 enero 2010

Contenido

1. Resumen
2. Introducción
3. Objetivos
4. Materiales y Métodos
 - 4.1. Recopilación de información cartográfica
 - 4.2. Sitios de estudio y periodo de estudio
 - 4.2.1. Definición vectorial de los sitios
 - 4.2.1.1. Parcelas agrícolas
 - 4.2.1.2. Parcelas forestales
 - 4.3. Tratamiento de las imágenes Landsat
 - 4.3.1. Corrección geométrica
 - 4.3.2. Corrección atmosférica
 - 4.3.3. Calculo de reflectividades
 - 4.3.4. Índice de vegetación normalizado (NDVI)
 - 4.4. Parámetros biofísicos y modelos de FPAR, LAI, Fc, Kc.
5. Resultados y discusión
 - 5.1. Evolución temporal de NDVI
 - 5.2. Estimación de la evolución temporal de FPAR, LAI, Fc y Kc
6. Conclusiones y recomendaciones

7. Referencias

Anexos

Anexos I. Listado imágenes Landsat

Anexo II. Mapas

Anexo III. M

1. Resumen

El presente informe Técnico consiste en el tratamiento y procesado de imágenes del satélite Landsat 5 TM, en una serie multitemporal definida entre el 2004 y 2005, con el objetivo de obtener magnitudes biofísicas de la vegetación natural y cultivada. Para esto se ha calculado el índice de vegetación de diferencias normalizado (NDVI) y se ha aplicado diversos modelos seleccionados de la literatura diseñados para obtener fracción de la radiación fotosintéticamente activa absorbida por las plantas (FPAR), Índice de área foliar (IAF), fracción de cobertura verde (Fc) y el coeficiente de cultivo definido (Kc) por FAO (Allen et al., 1998). La selección de los sitios se realizó con base en el desarrollo anual de las especies, hábito de persistencia foliar, tratamiento agronómico e importancia ecológica. Se comprobó la capacidad de la tecnología para el seguimiento anual del desarrollo de las especies estudiadas, para diferenciar especies y para recoger eventos climáticos sobre la vegetación cultivada. Se recomiendan abrir frentes de estudio ambiental, forestal y agronómico desde una aproximación a las posibilidades abiertas por la herramienta tecnológica de la Teledetección de imágenes de satélite y de los Sistemas de Información Geográfica.

2. Introducción

La obtención de parámetros biofísicos a partir de información proveniente de sensores remotos permitirán dar seguimiento a la dinámica espacio temporal de la vegetación de manera eficiente y económica (Calera et al., 2005). Actualmente se han logrado extensos avances en esta materia estableciéndose robustas relaciones entre los índices de vegetación y parámetros biofísicos como son la producción de biomasa, el desarrollo del coeficiente de cultivo, la evapotranspiración, la fracción de cobertura, así como otros parámetros obtenidos a partir de las reflectividades de la cubierta como son el albedo, radiación fotosintéticamente activa absorbida, la temperatura superficial, etc. La importancia del desarrollo de esta línea de investigación es la óptica aportada en el análisis de la información especializada y con resolución temporal. Esto ha abierto nuevos campos de investigación y monitoreo tanto de la vegetación natural como cultivada permitiendo dar seguimiento a la evolución con un costo relativamente pequeño. Hoy en día se está mejorando la resolución temporal lo que le confiere potencialidad en el programa de tratamientos agronómicos en tiempo real.

3. Objetivos

El objetivo principal de este trabajo es la obtención de magnitudes biofísicas de la vegetación natural y cultivada a partir de información radiométrica originada por el satélite Landsat TM5. Como objetivo secundario se plantea la comparación de modelos definidos en la literatura para la extracción de dichas magnitudes a partir del índice de vegetación NDVI.

4. Materiales y Métodos

4.1. Información utilizada

Las bases de datos cartográficas consultadas en la selección de las áreas de estudio fueron:

- Base Cartográfica Numérica, BCN 200. Instituto Geográfico Nacional.
- IDE-CLM - Infraestructura de Datos Espaciales de Castilla - La Mancha.
- Ortofotos PNOA 1:10000.
- Spider. System of Participatory Information Decisison support and Expert Knowledge for River-basin management. On line service - Proyecto PLEIDeS.
- ERMOT: Estudio sobre la Evolución de Superficies de Regadío mediante Teledetección en el Ámbito del Acuífero de la Mancha Oriental.
- Tercer Inventario Nacional Forestal.
- Capas identificadores de series de vegetación de Rivas-Martínez digitalizadas.
- Mapa Forestal de España (MFE) 1:50000
- Mapa de Cultivos y aprovechamientos agrarios (MCE) 1:50000
- Imágenes Landsat 5 TM.

En el anexo 1 se indica el listado de imágenes del satélite Landsat utilizadas.

4.2. Sitios y período de estudio

El tipo de sensor utilizado es el TM del satélite Landsat-5, y el periodo de estudio se define en base a los datos originales que comprenden imágenes de las zonas elegidas entre los años 2004 y 2005. El área de trabajo estará limitada a la Provincia de Albacete. En la Figura 1 se muestran la ubicación del área de estudio y los sitios seleccionados.

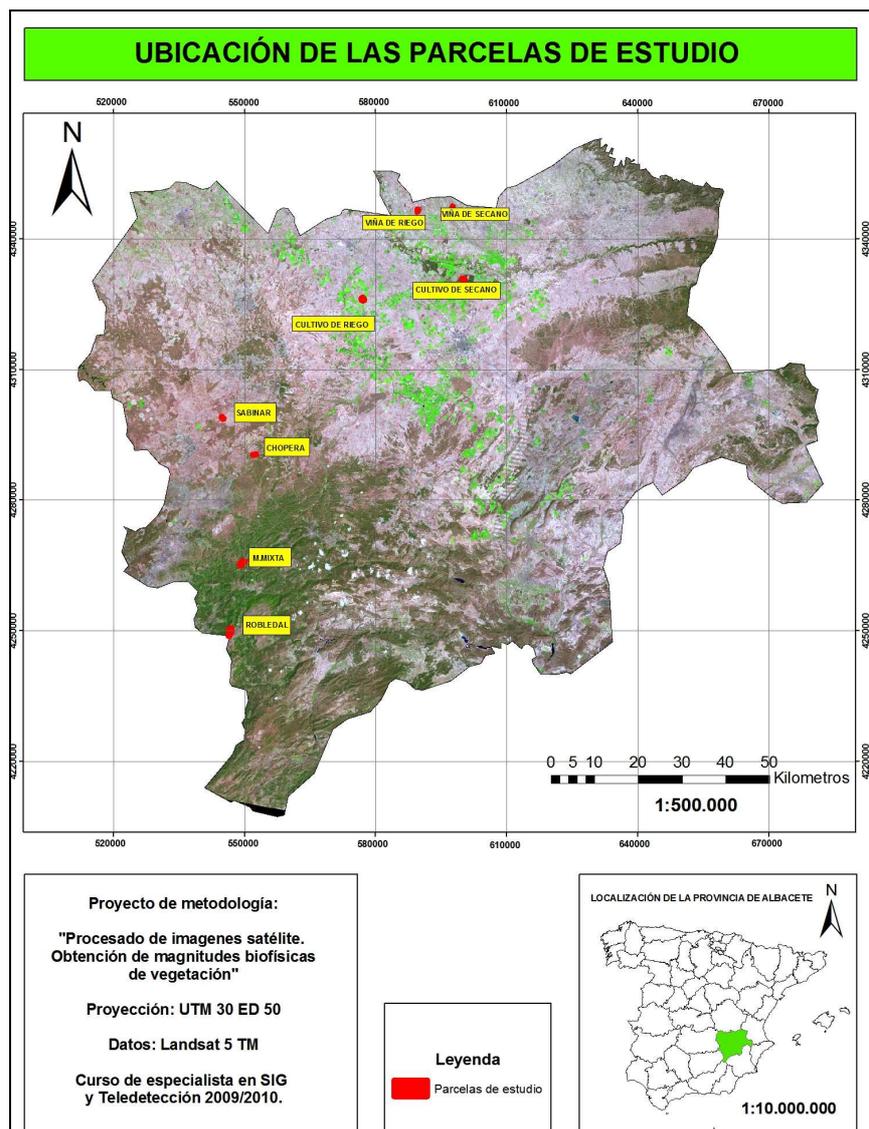


Fig. 1. Ubicación de los sitios de estudio en la provincia de Albacete.

La selección de los sitios de estudio se ha realizado bajo criterios de representatividad y contraste. Es decir, se han seleccionado grupos de vegetación que por una parte son representativos de la vegetación presente en el área de estudio y por otro lado presentan características que ayudan a su diferenciación al utilizar información de satélites. Se han definido dos grupos de estudiar: uno de vegetación forestal y otro con vegetación agrícola.

Dentro del grupo forestal se han seleccionado bosques de especies de diferente persistencia foliar (bosque predominante de caducifolias, perennifolias y un bosque mixto con variedad en su composición) además de un cultivo forestal puro. En el grupo de los cultivos agrícolas las características diferenciadoras estuvieron en función del tipo de cultivo (herbáceo o leñoso), del régimen hídrico (secano o riego) y de la duración del ciclo

vegetativo (cultivos de primavera o verano). En el Cuadro 1 se resume los sitios-cultivos seleccionados.

Cuadro 1. Clasificación de la composición vegetal, ubicación, especie dominante de las parcelas de estudio.

CLASIFICACIÓN	ZONA	ESPECIE/S PREDOMINANTE/S	NOMBRE COMÚN
Cultivo leñoso de regadío	Tarazona de la Mancha	<i>Vitis vinifera</i>	Viña riego
Cultivo leñoso de secano I	Tarazona de la Mancha	<i>Vitis vinifera</i>	Viña secano
Cultivo agrícola de riego	Albacete	<i>Zea maíz</i>	Maíz
Cultivo agrícolas de secano II	Albacete	<i>Triticum sativum</i> <i>Hordeum vulgare</i>	Cereal
Cultivos forestales monoespecíficos	Albacete	<i>Populus sp.</i>	Chopera
Masas forestales de caducifolias	Riopar	<i>Quercus pyrenaica</i>	Robledal
Masas forestales de perennifolias	El Balletero	<i>Juniperus thurifera</i>	Sabinar
Masas forestales mixtas en umbría	Almenara	<i>Acer opalus</i> <i>Quercus rotundifolia</i> <i>Quercus faginea</i>	Masa mixta

4.2.1. Definición vectorial de los sitios

4.2.1.1. Parcela Agrícolas

Los cultivos seleccionados presentan hábitos condicionados al manejo agronómico que se les da, esto es fecha de siembra o aplicación de riego. De esta manera se espera obtener clases diferenciables en las evoluciones temporales de los parámetros biofísicos obtenidos a partir de imágenes de satélite.

De acuerdo a la clasificación de uso de suelo del convenio ERMOT (Evolución del regadío en la Unidad Hidrogeológica 0829: Mancha Oriental), las especies seleccionadas son; cultivo de secano (probablemente trigo o cebada) y una especie leñosa (viña) bajo dos manejos del riego (riego y secano). Las parcelas seleccionadas se señalan en las Figuras 2, 3, 4 y 5.

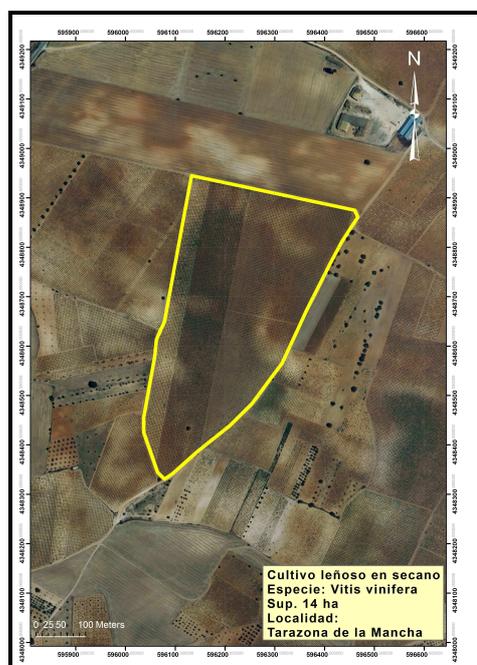


Fig. 2. Parcela de cultivo leñoso en secano (*Vitis vinifera*).

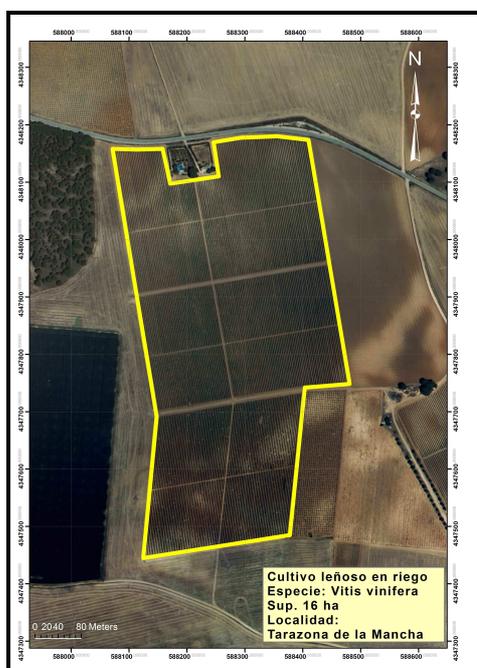


Fig. 3. Parcela de cultivo leñoso en riego (*Vitis vinifera*).

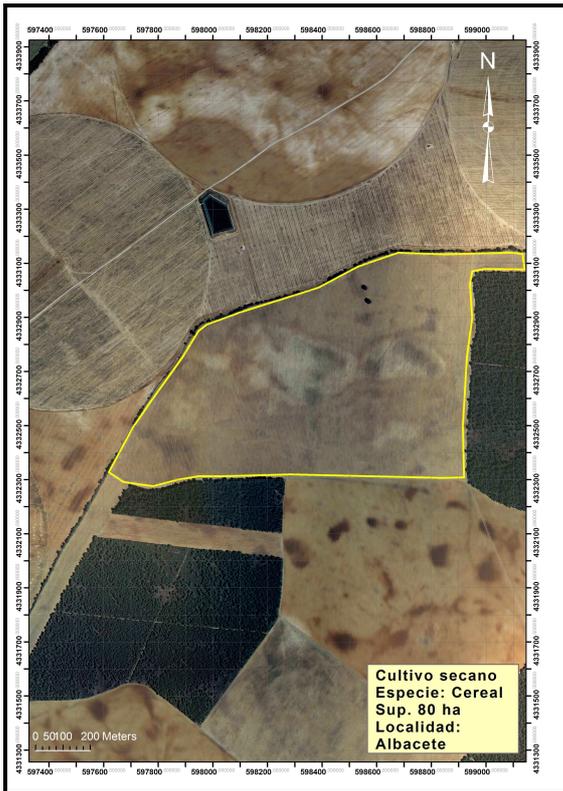


Fig. 4. Parcela de cultivo herbáceo en seco (trigo o cebada).

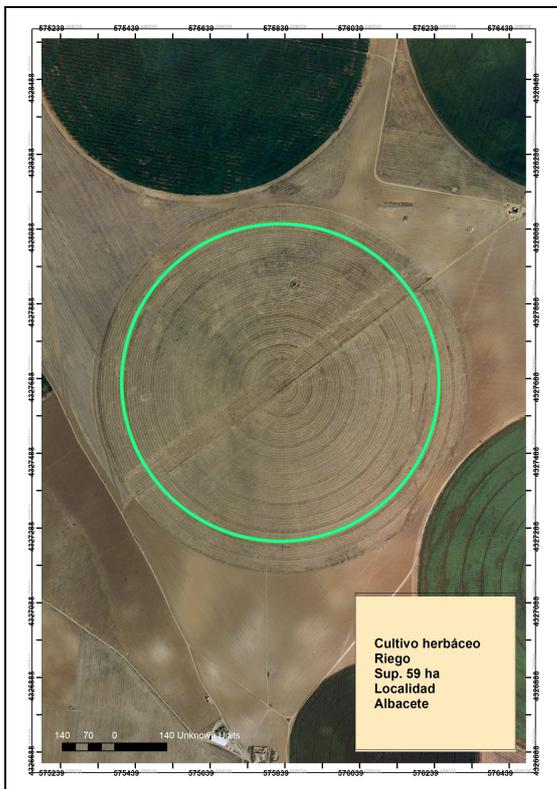
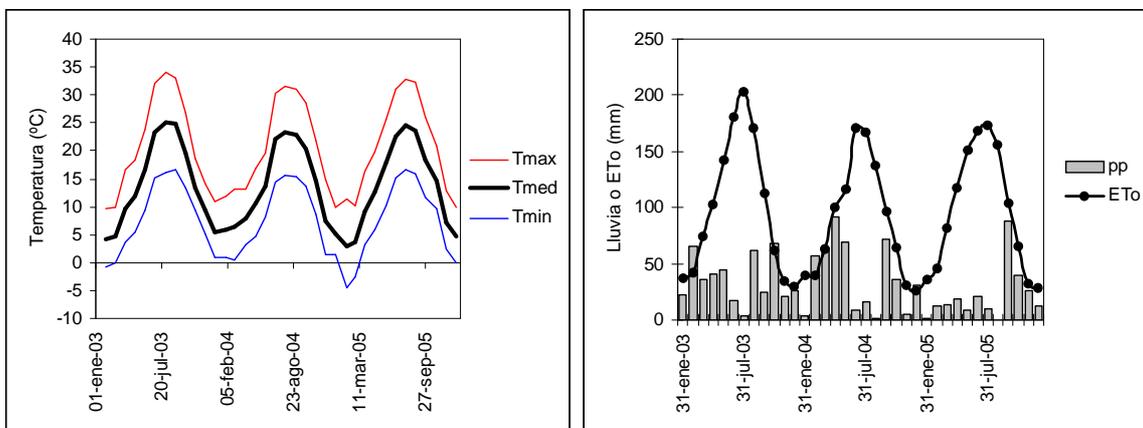


Fig. 5. Parcela de cultivo herbáceo en riego (Maíz).

Las condiciones meteorológicas durante el período 2003-2005 se han resumido en la Figura 6. De esta información se pueden destacar dos situaciones que tendrán efecto en los parámetros estudiados; los montos totales de las precipitaciones en el año 2005 fueron sólo 251 mm que representan aproximadamente el 50% de lo precipitado en años anteriores. Esta situación, contrastada con la curva de evapotranspiración potencial y con un índice de aridez (pp/Eto) que definen a la primavera del 2005 como muy seca. La segunda situación fue la presencia de eventos extremos en el invierno del 2005. Los días 27 y 28 de enero se registraron temperaturas mínimas de -11.5 °C y -12.2 °C los cuales provocaron grandes daños en los cultivos herbáceos y leñosos de la región.



Año	T (°C)			pp (mm)	ETo (mm)	Δ (mm)	Índice Aridez pp/ETo
	media	máxima	minima				
2003	14.00	20.67	7.89	433.4	1191	757.50	64%
2004	13.37	20.24	7.33	455.2	1051	596.20	43%
2005	13.49	20.79	6.93	251.4	1157	905.80	22%

Fig. 6. Medias mensuales de a) temperaturas máximas, medias y mínimas y b) ETo y montos de las precipitaciones durante el periodo 2003-2005 (Estación Tarazona de La Mancha del SIAR).

4.2.1.2. Parcela forestales

Las especies forestales fueron diferenciadas entre caducifolias, perennifolias, mixtas y un cultivo forestal monoespecífico, esperando así obtener conclusiones de la información satelital debida a diferencias en la fisiología, morfología y composición en las especies elegidas. Basándose en la parcelación del MFE 1:50.000 y en el propio

conocimiento de las zonas, se proponen las parcelas de las Figuras 7, 8, 9 y 10. Además de las diferencias fenológicas de las especies se han elegido las masas forestales naturales en función de su gran importancia ecológica, siendo espacios catalogados como Lugares de Interés Comunitario (LIC) en la Agenda 21.

Se evidenció que el MFE no coincide exactamente con la realidad de algunos polígonos, al contener errores en la descripción de las especies primarias, secundarias y terciarias que contienen. Es el caso del bosque de *Quercus pyrenaica* en las inmediaciones del Calar del Mundo, donde según el MFE no existe tal especie, ni siquiera en toda la provincia de Albacete.

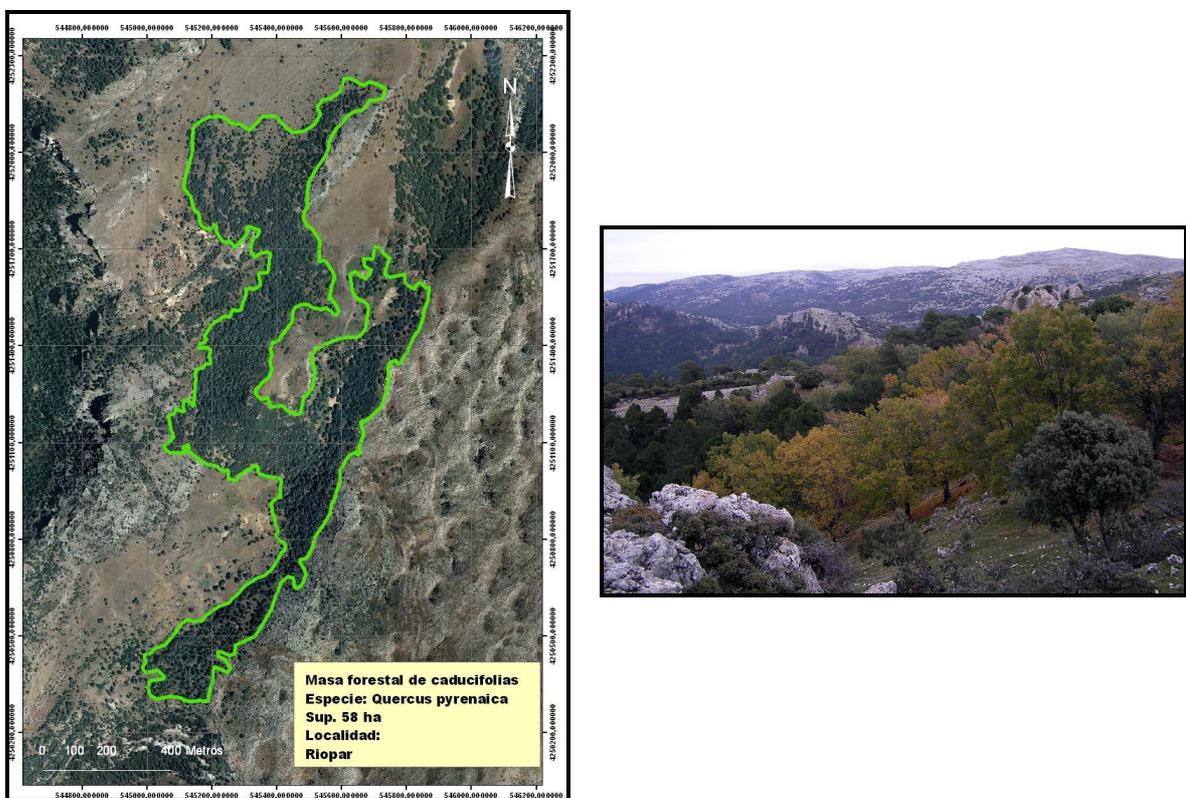


Fig. 7. Parcela de masa forestal de caducifolias, Robledal (*Quercus pyrenaica*).



Fig. 8. Parcela de masa forestal de perennifolias, Sabinar (*Juniperus thurifera*).



Fig. 9. Parcela de cultivo herbáceo forestal monoespecífico, Chopera (*Populus sp.*)

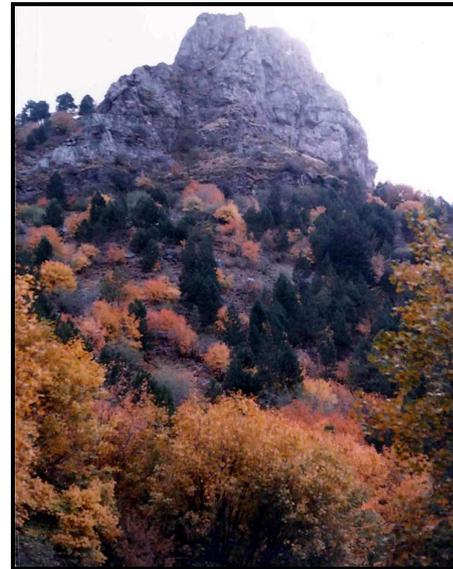
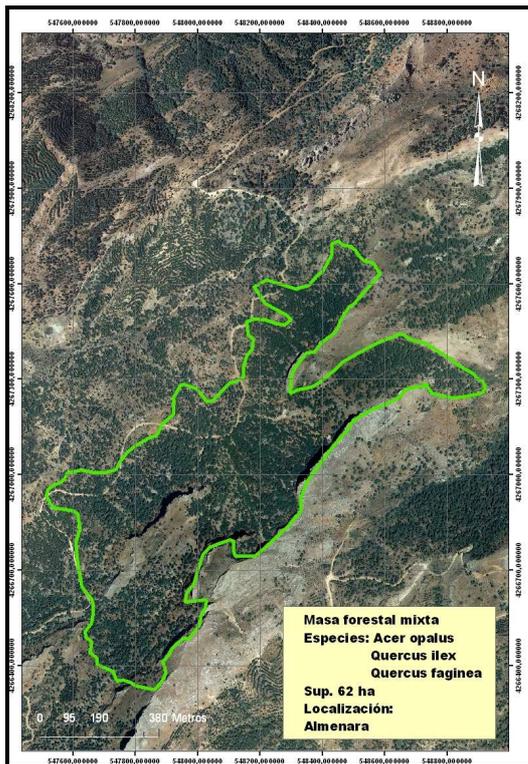


Fig. 10. Parcela de masa forestal mixta, arces, encinas y quejigos (*Acer opalus*, *Quercus ilex* y *Quercus faginea*).

Las condiciones climáticas históricas de la estación meteorológica Riopar Fabrica C.H.S., ubicada en la zona y a 1000 m s.n.m. señalan valores medios de precipitaciones de 791 mm y una temperatura media anual de 12.4 °C.

4.3. Tratamiento de las imágenes Landsat

4.3.1. Corrección atmosférica y geométrica

Las imágenes utilizadas en este trabajo provenían de los archivos del Instituto de Desarrollo Regional de la UCLM. En este centro las imágenes son recibidas y georeferenciadas utilizando la proyección UTM 30, Datum Europeo 1950 y elipsoide internacional. Para la corrección de las imágenes se ha utilizado el método de los puntos de control.

Debido a la distorsión que produce la interacción entre la radiación solar y los componentes de la atmósfera en la información recibida por el satélite, las imágenes fueron corregidas antes de derivar la reflectancia de la superficie. Los principales

componentes de la atmósfera que deben ser caracterizados y cuantificados con objeto de disminuir su efecto son el vapor de agua y la carga de aerosoles (Guanter et al., 2007). En el presente trabajo la corrección atmosférica se basó en un modelo simplificado de transferencia radiativa, en el que los valores de reflectividad se obtienen a partir de datos obtenidos de la propia imagen. Para ello se utilizó un programa informático (Demeter Atmospheric Correction v.3), diseñado por Luis Guanter, específicamente para imágenes del sensor Landsat. Este programa establece los parámetros atmosféricos desde datos multispectrales aportados por la imagen Landsat en las seis bandas del espectro solar (1-5 y 7), tomados de la radiancia en cinco píxeles de referencia en el techo de la atmósfera (top of atmosphere, TOA). Una vez que la reflectancia atmosférica y las funciones de transmisión son calculadas, el algoritmo separa los efectos de la radiación en superficie y atmosférica asumiendo un comportamiento Lambertiano en la reflectancia objetivo. Después de esto se procede a un simple tratamiento de eliminación de los efectos que emborronan los productos obtenidos por múltiples dispersiones (scattering) entregando una imagen BOA (bottom of atmosphere). Este proceso no presentó ningún problema importante en la mayoría de las imágenes a excepción de la imagen del 24 de diciembre de 2005, donde se evidenciaron valores de NDVI iguales a 1 posterior a la corrección. Esta situación fue analizada comparando el NDVI-TOA y NDVI-BOA (Figura 11). Como se observa en la grafica, para un amplio rango de valores NDVI TOA su respuesta es un NDVI-BOA con valor igual a uno. Se pudo constatar que el proceso de corrección, ésta amplía los valores extremos de las reflectividades y, en el caso de la banda 3, la vuelve muy pequeña con lo que su diferencia con la banda 4 es mínima y el cociente se vuelve 1. Esto es un error de proceso y altera los valores calculados al realizar promedio espaciales. Por estos motivos esta imagen fue desechada.

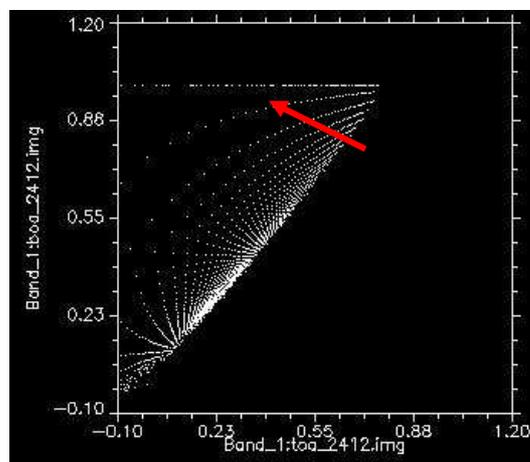


Fig. 11. Correlación entre la imagen NDVI-TOA y NDVI-BOA sobre el sitio mixto.

En la Figura 12 la imagen NDVI-BOA del 5 de agosto y NDVI-TOA en las que la corrección atmosférica resultó adecuada. Las correlaciones aparecen lineales sin desviaciones de la tendencia principal.

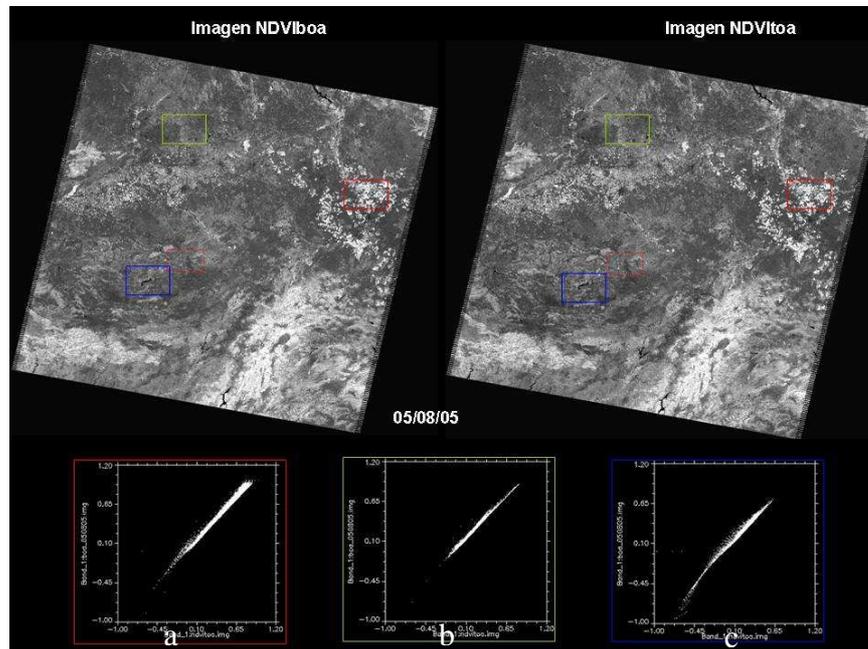


Fig.12. Imágenes NDVI-BOA y TOA del 5/08/05 con las gráficas de comparación en a) y b) sobre cultivos y en c) sobre un embalse.

4.4. Índice de Vegetación de Diferencias Normalizado (NDVI)

Un índice de vegetación es una combinación de valores de reflectancia en diferentes longitudes de onda, con alta sensibilidad cambios en la vegetación y baja sensibilidad a otra información (atmósfera o suelo). La gran mayoría de los IV están basados en el alto contraste entre la banda del rojo (R) y la del infrarrojo cercano (IRC) para la vegetación viva y verde (Tucker, 1979). Para el análisis temporal de la vegetación, en este trabajo se ha seleccionado el Índice de Vegetación de Diferencias Normalizadas (NDVI por sus siglas en inglés) introducido por Rouse (1974). Las limitantes en su uso radican en el efecto distorsionador del suelo y su saturación en valores altos de área foliar.

La ecuación que lo define es:

$$NDVI = \frac{IRC - R}{IRC + R} = \frac{TM_4 - TM_3}{TM_4 + TM_3}$$

Donde:

TM: Número de banda de la imagen satélite LandSat

Por su definición los valores del NDVI varían entre +1 y -1 con valores más altos para la vegetación densa y valores muy bajos (o negativos) para nieve, agua y nubes.

La especialización de los valores de NDVI dentro de las parcelas de estudio fue realizada cruzando las capas vectoriales con los NDVI en formato raster. La edición de la capa de parcelas se realizó a partir de la digitalización y selección del Mapa de Cultivos y aprovechamientos agrarios 1:50.000 y el Mapa Forestal, también a escala 1:50.000. Los cálculos fueron realizados utilizando el software ERDAS IMAGEN ver. 8.7. Este procedimiento se calculó valores máximo, mínimos, medios y la desviación estándar de los píxeles incluidos en cada polígono.

4.5. Parámetros Biofísicos: f_{PAR} , IAF, Fc, kc

Los parámetros biofísicos son aquellos que permiten describir el estado y los ritmos de cambio de una cubierta vegetal (Calera et al., 2004). La tecnología de los sensores remotos permite dar seguimiento al crecimiento y desarrollo de la vegetación, a través de relaciones empíricas entre las variables biofísicas de los cultivos y los índices de vegetación espectrales (IV) (Gilabert et al., 2002). En este estudio se han seleccionado los siguientes parámetros biofísicos:

- Fracción de radiación fotosintéticamente absorbida por la cubierta (f_{APAR}): corresponde a la proporción de la radiación incidente en el rango entre 400 y 700 nm (PAR_i) que es absorbida por las plantas ($f_{APAR} = APAR/PAR_i$, (Asrar et al., 1992)). La fortaleza de esta relación radica en su relación directa con el crecimiento de las plantas ya que evalúa la energía consumida en el proceso fotosintético. De los estudios revisados se seleccionaron dos para la comparación en el pronóstico de FPAR:

$$f_{PAR} = NDVI * 1.222 - 0.1914 \quad (r^2=0.965, \text{Asrar et al., 1992})$$

$$f_{PAR} = -0.344 + 0.229 * \exp(1.95 * NDVI) \quad (r^2=0.973, \text{Wiegand et al., 1991})$$

Estas relaciones han sido desarrolladas sobre cubiertas homogéneas (maíz en el caso de Wiegand et al., 1991) y vegetación desértica en Asrar et al., 1992.

- Índice de área foliar (IAF): corresponde al cociente entre el área total de las hojas verdes (cara superior) y el área donde crecen. El sentido físico de esta medida es de una medida aproximada de la superficie foliar verde por unidad de radiación solar disponible.

Las relaciones seleccionadas fueron:

$$IAF = 5.7 * NDVI - 0.25 \quad (r^2=0.73, \text{Johnson et al., 2003})$$

$$NDVI = 0.020689 + 0.043675 * IAF \quad (r^2=0.92, \text{Montero et al., 1999})$$

$$NDVI = 0.93 - 0.76 * e^{-0.45 * IAF} \quad (r^2=0.90, \text{González et al., 2003})$$

Estas relaciones fueron desarrolladas en viñedo y Maíz en González et al. y en vid los otros dos.

- Fracción de cobertura vegetal verde (F_c): definida como la fracción ocupada por la cubierta verde o la proporción de la superficie de suelo que es interceptada por la proyección vertical de la vegetación. Su alta relación con el crecimiento de la vegetación le confiere utilidad en la definición de etapas en la metodología kc -ETo. Las funciones utilizadas:

$$F_c = 1.19 * NDVI - 0.16 \quad r^2=0.96, (\text{González-Piqueras, 2006})$$

$$F_c = 1.11 * NDVI - 0.11 \quad r^2=0.96, (\text{López-Urrea et al., 2009})$$

Estas relaciones fueron desarrolladas en trigo y maíz.

- Coeficiente de cultivo (K_c): es definido como el cociente entre la evapotranspiración de cultivo (ETc) y la evapotranspiración de una superficie de referencia (ETo). La semejanza en la evolución temporal del NDVI y el K_c es el que le confiere utilidad y ha sido estudiada en el desarrollo de metodologías operativas para supervisión del riego. En este trabajo se exploraron dos referidas al coeficiente de cultivo basal (K_{cb}) que considera la evapotranspiración proveniente de las plantas. Las ecuaciones son:

$$k_{cb} = 1.36 * NDVI - 0.06 \quad (\text{Bausch and Neale, 1987})$$

$$k_{cb} = 1.44 * NDVI - 0.10 \quad r^2=0.96, (\text{Campos et al.})$$

Estas relaciones están desarrolladas sobre maíz y viñedo.

5. Resultados y discusión

5.1. Variación temporal de NDVI

En la Figura 13 se señalan las evoluciones temporales del NDVI en las especies bajo estudio. Como se puede apreciar los valores máximos y mínimos del índice estuvieron directamente relacionados con el desarrollo fenológico de las especies. Esta clara diferenciación temporal permite identificar la estacionalidad del desarrollo de la

vegetación. Los valores del NDVI en el viñedo alcanzaron valores similares sin importar el regime hídrico. Durante el año 2005 se observaron menores valores de NDVI en el viñedo de secano probablemente debido a los menores valores de las precipitaciones (251 mm) y a eventos climáticos extremos (-11.5°C , -14.7°C y -16.9°C los días 26, 27 y 28 de enero). Esta situación también se aprecia en cuanto al cultivo herbáceo de secano con valores medios del NDVI menores en 2005. Los valores máximos de NDVI fueron alcanzados por el cultivo herbáceo bajo riego (0.89) ya que éste presenta una cobertura total de la superficie y condiciones óptimas de aportes hídricos.

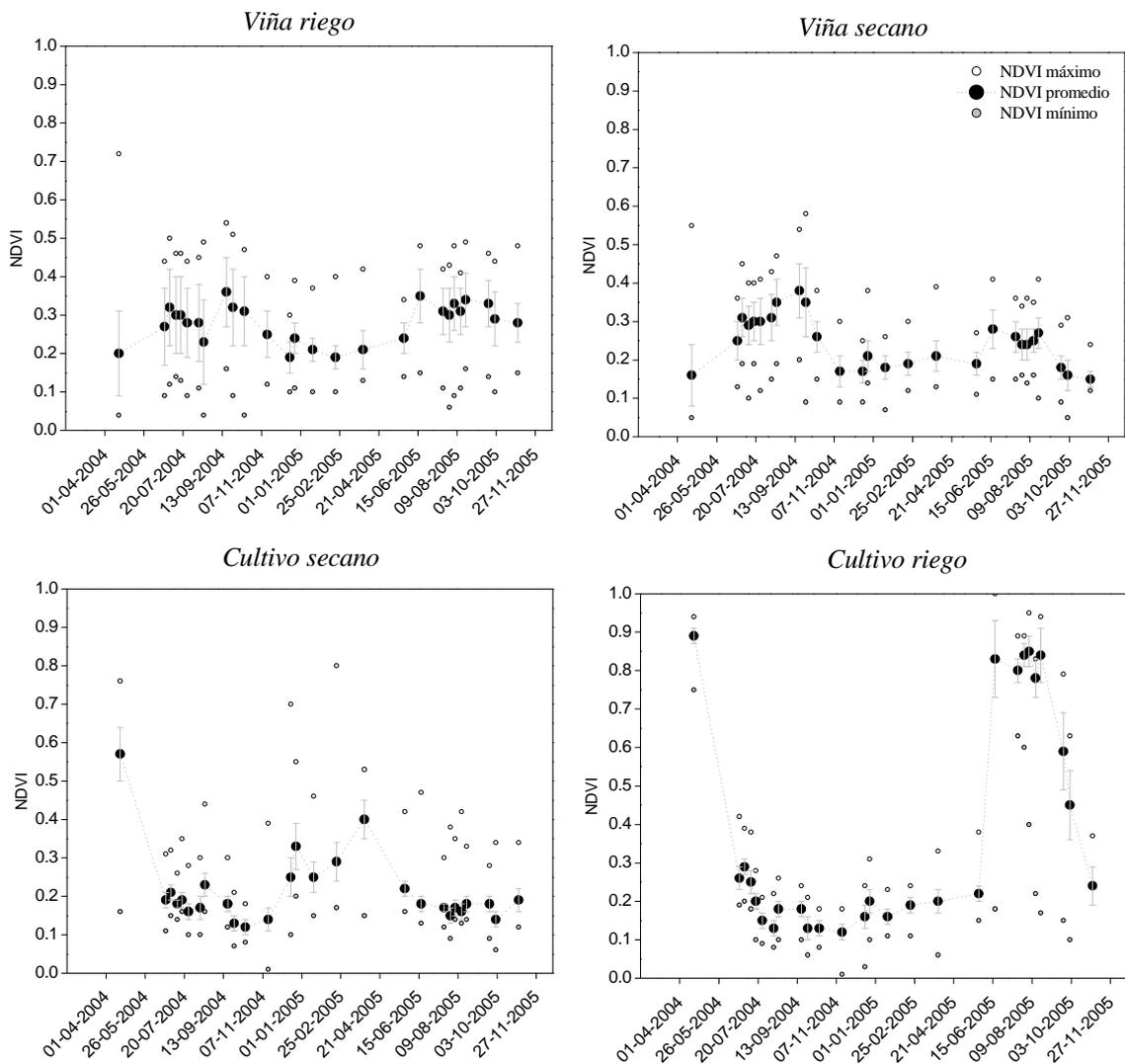


Fig. 13. Evolución temporal del NDVI en los cultivos agrícolas durante el período de estudio.

El análisis del NDVI en las especies forestales presentó una baja resolución temporal de imágenes que no permitió un análisis anual completo, en especial en los meses invernales y la discusión se centró en los meses de verano y otoño. Debido a que los sitios bajo estudio están ubicados dentro del “path 200” del recorrido Landsat, la

resolución temporal fue menor que para los cultivos agrícolas. Adicionalmente, la imagen del 30 de marzo presentó nubes en las localidades de interés por lo que los valores del índice fueron menores y finalmente desechados.

Por otra parte, la ubicación espacial del sitio mixto en la sierra determinó la presencia de largas sombras a la hora de adquisición de las imágenes y esto afectó el desempeño de la corrección atmosférica, señalando valores de NDVI máximos erróneos con valores cercanos o iguales a 1.

En general, las especies con hábitos de crecimiento naturales (sin intervención agronómica) presentaron valores de NDVI estables en el tiempo, con una ligera disminución en el año 2005 tal vez producto de las condiciones climáticas ya comentadas.

De este grupo de especies, el Robledal presentó los valores más altos del índice. Los valores más bajos correspondieron al Sabinar donde la baja cobertura de la especie (alrededor de un 15% como se indicará más adelante) indujo altos efectos del “background” sobre el índice. La única especie forestal que mostró disminuciones estacionales de los valores de índice de vegetación hacia diciembre fue la Chopera, probablemente debido la caída de la hoja en los meses otoñales, situación que no se repite en la masa forestal caducifolia (Robledal), como característica general de los sitios naturales estudiados. Esta diferencia fundamental con los cultivos se debe al complejo de las especies del cortejo que conforman la masa forestal y que intervienen en el valor del NDVI total. Se reproduce una pauta generalizada en las forestales naturales teniendo unos valores menores en verano y un carácter ascendente en otoño, invierno y primavera (afirmación intuía en parte de la estación invernal y en toda la primavera).

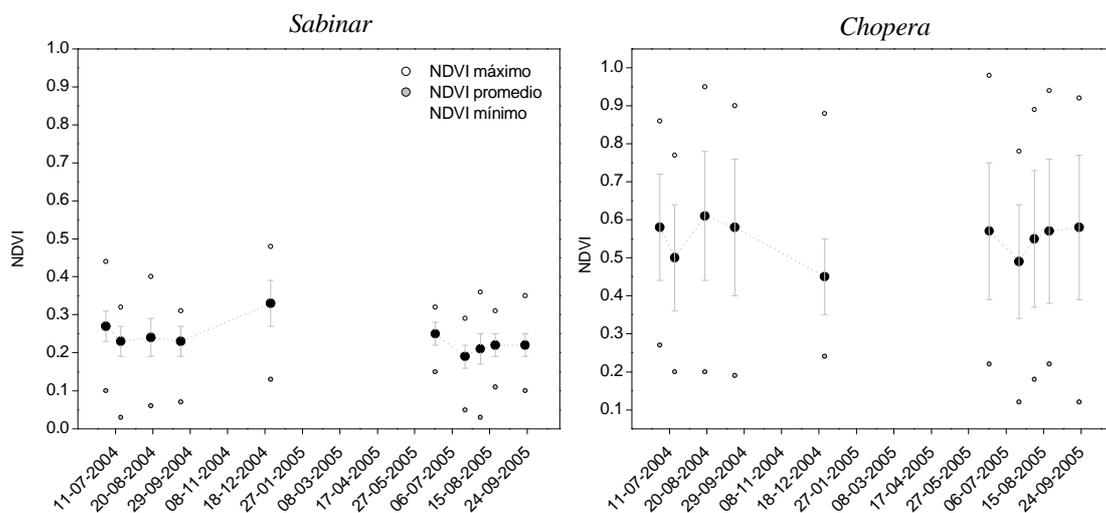


Fig. 14. Evolución temporal del NDVI de las especies forestales durante el período de estudio. Se indica con círculos rojos valores anómalos del NVDI-BOA.

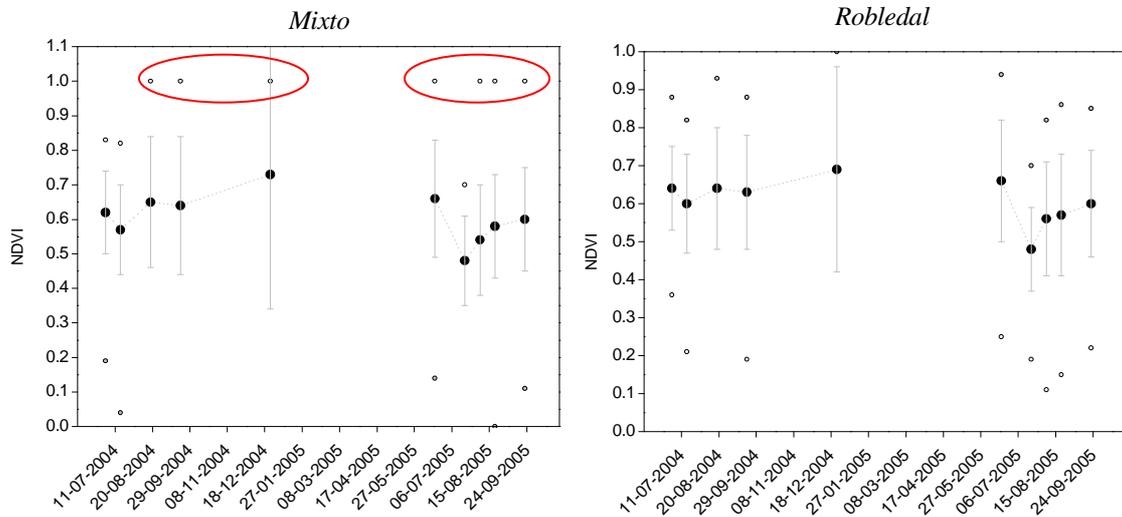


Fig. 14. Evolución temporal del NDVI de las especies forestales durante el período de estudio. Se indica con círculos rojos valores anómalos del NVDI-BOA (continuación).

Con el objeto de comparar los valores del NDVI entre todas las especies estudiadas, se realizó una sumatoria temporal de los valores medios del índice a partir de las imágenes donde todos los sitios estaban representados en la misma fecha (Figura 15). Se pudo observar que los valores más altos correspondieron a dos especies forestales; el Robledal y el cultivo de Chopos. También aparece con valores acumulados altos el sitio del cultivo de riego que, a pesar de estar la mayor parte del tiempo con el suelo sin cobertura, sus altos valores durante el ciclo de crecimiento y su gran cobertura del suelo lo sitúan con valores máximos superiores al resto y un valor promedio también alto. Los cultivos de secano tienen unos valores característicamente bajos entre los que se posee la masa forestal del Sabinar, por su estructura de parque o bosque adhesionado (López González Ginés, 1982).

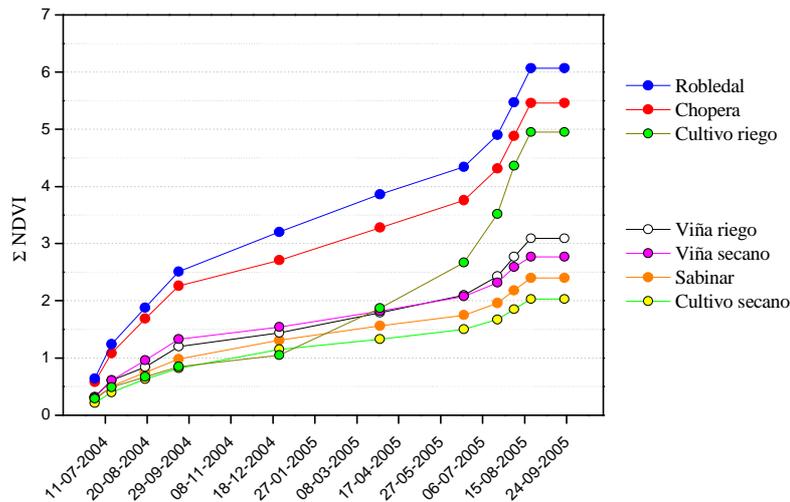


Fig. 15. Valores de NDVI acumulados.

Es interesante destacar la forma sigmoidea de la curva de NDVI acumulado similar a la curva de acumulación o crecimiento de la biomasa. Este tipo de salidas será útil exclusivamente si se compara la especie consigo misma y entre especies. El desarrollo de biomasa anual de un cultivo no puede ser comparable con la biomasa producida por una especie perenne donde además existirán crecimientos no visibles por el índice.

5.2. Variación temporal del FPAR, LAI, Fc y kc

A continuación se detallan los resultados de la aplicación de los modelos para la obtención de variables biofísicas. En la Figura 16 se muestra el comportamiento estacional de los valores del FPAR. Ambas funciones indicaron claramente los momentos de mayor batería fotosintética de la vegetación. Esta situación es especialmente evidente en los cultivos agrícolas, ya que en ellos ocurren cambios marcados por el desarrollo de la vegetación verde. La serie temporal completa permite contrastar de mejor forma la evolución temporal de este parámetro. Dentro de los cultivos agrícolas, los valores máximos de FPAR fueron observados en el cultivo de riego, llegando a valores cercanos al 85% en momentos de máximo NDVI. Por su parte, el cultivo leñoso (viña) alcanzó valores en torno al 20% en verano. En este cultivo, para el año 2004 no se observan marcadas diferencias en los valores de FPAR promedio en el verano entre el riego y el secano y sólo un pequeño desfase en el momento de alcanzar los valores máximos. No fue así en el año 2005 donde se observaron diferencias entre el riego y secano el cual estuvo influido por las características climáticas del año. En cuanto al cultivo herbáceo de secano éste también mostró diferencias en cobertura entre los dos años inducido por la sequedad de la

primavera. Los modelos aplicados para definir FPAR a partir del NDVI no mostraron exactamente los mismos resultados. En general, el modelo Wiegand et al., (1991) subestima al modelo Asrar et al., (1992) pero se apega mejor al suelo desnudo. En el cultivo herbáceo de riego se observó un mejor nivel de ajuste entre los valores FPAR a valores de NDVI altos. De acuerdo a experiencias para definir valores de FPAR en campo, los valores esperables en el cultivo de viña se asemejan en mayor medida a lo indicado por el modelo de Asrar et al., (Campos comunicación personal) en los momentos de máximo desarrollo.

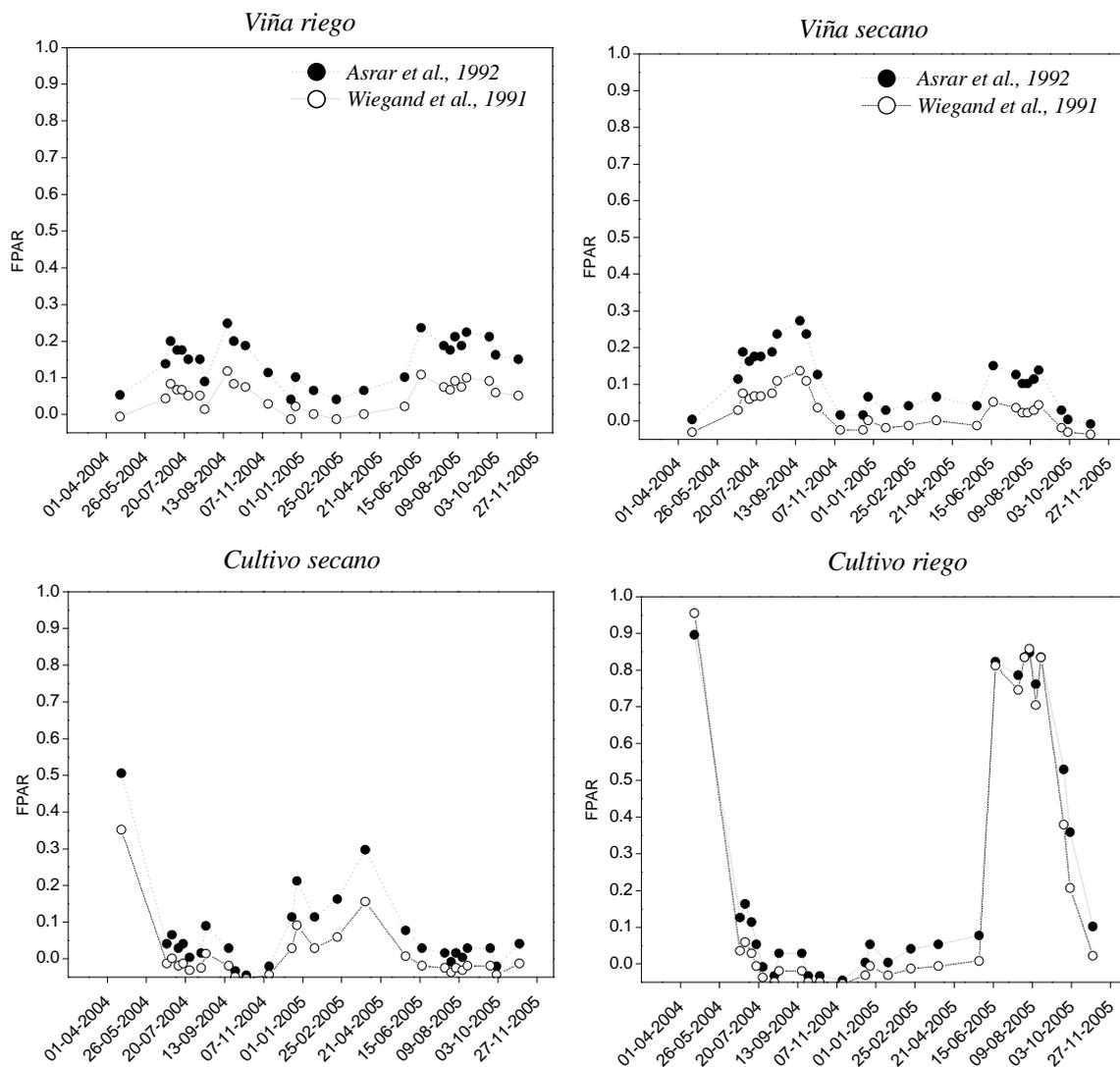


Fig. 16. Evolución temporal del FPAR modelado en cultivos agrícolas.

En cuanto a la vegetación forestal los valores de FPAR más bajos estuvieron en el sitio de las Sabinas (10%) donde las pequeñas alzas observadas en este parámetro se deben más al ritmo de crecimiento del estrato herbáceo (cortijo) que ha variaciones de la especie (Figura 17). Los valores más altos de FPAR estuvieron representados nuevamente en el

sitio del Robledal con valores cercanos al 60%. En cuanto a los modelos predictivos de FPAR se pudo observar un mejor nivel de ajuste entre ellos en comparación con la vegetación agrícola, en especial en altas coberturas. Es posible indicar que en la medida que la cobertura de vegetación verde disminuye, el efecto del suelo desnudo no afecta a ambos modelos por igual. Esto puede ser visualizado en el caso de la Chopera que al perder el follaje (valor de diciembre) los valores de predicción de ambos modelos se separan.

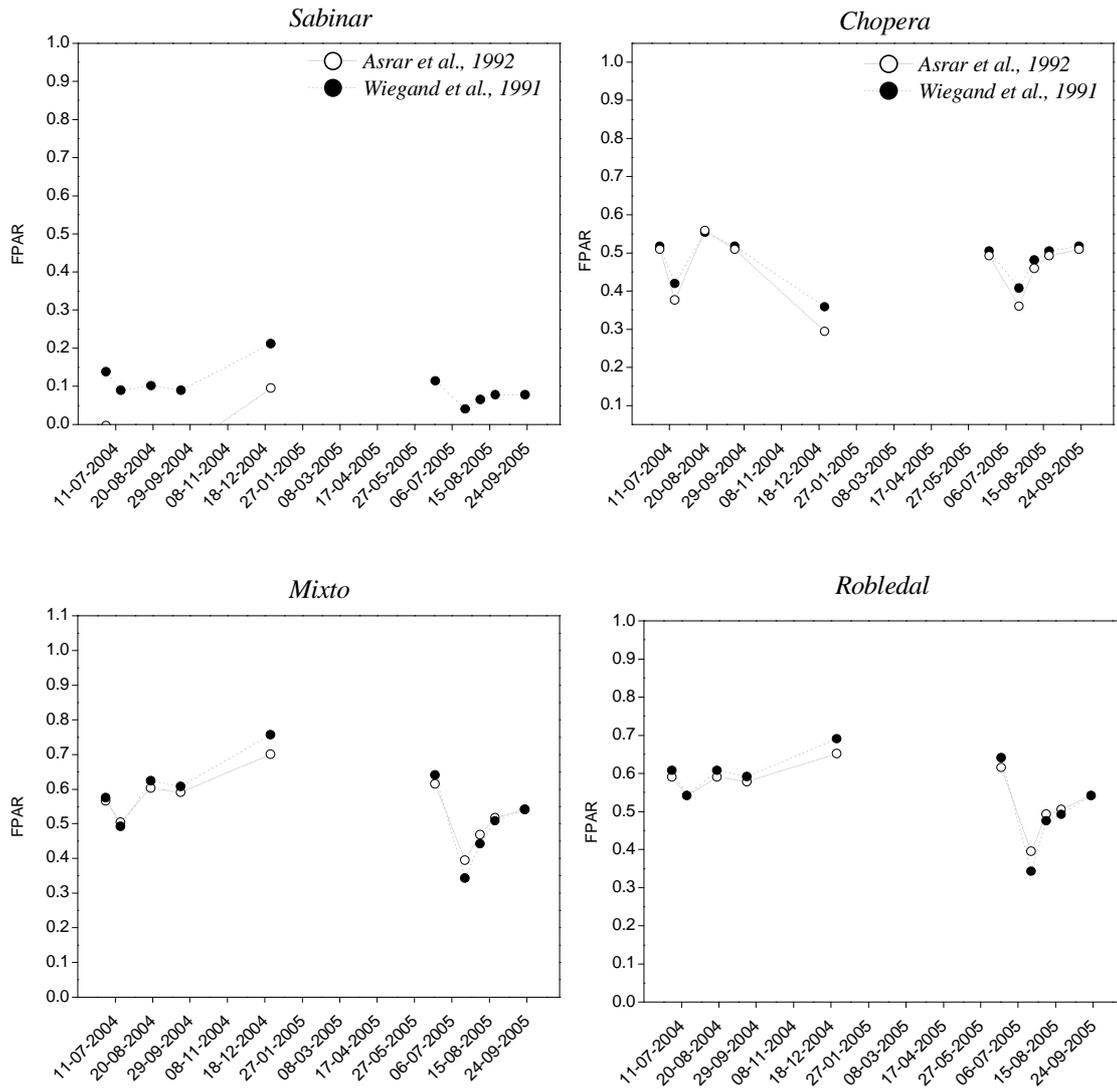


Fig. 17. Evolución temporal del FPAR modelado en masas forestales.

Esta situación puede tener una explicación si se recuerda que el desempeño del índice de vegetación NDVI disminuye con la presencia de suelo desnudo.

Por otro lado, la evolución temporal del LAI fue analizada con la ayuda de los dos modelos ya mencionados y son representados en la Figura 18. Como se puede observar

que el modelo de Montero et al., (1999) realiza pronósticos completamente fuera de los valores de referencia. Mientras que el comportamiento (la forma) es similar al modelo propuesto por Johnson et al., (2003), los ordenes de magnitud son erróneos. En este sentido nosotros creemos que el proceso de corrección atmosférica, específicamente la normalización radiométrica pudo ser errónea ya que los valores de NDVI presentados son muy bajos.

El modelo de Johnson et al. (2003), describe valores adecuados de IAF para las especies evaluadas. El cultivo de viñedo presentó valores medios máximos muy similares entre el riego y el secano (1.8 y 1.89 respectivamente) en el año 2004 y diferentes en el año 2005 (1.75 y 1.33) seguramente influido por las condiciones climáticas. Por su parte, para el cultivo herbáceo en secano el modelo predice un IAF de 2.99 en el primer año y 2.1 en el segundo. Finalmente, el pronóstico del IAF con el modelo, para el sitio con el cultivo herbáceo de riego, fue de 4.79. Algunas precauciones deberán tomarse en la confiabilidad de este valor debido a la conocida saturación del índice NDVI a valores de IAF superiores a 3 (NDVI asintótico) quedando una parte del desarrollo del LAI sin modelación (Baret and Guyot, 1991). Las diferencias entre los modelos pueden deberse a la diferencia en los cultivos en los que fueron desarrollados. Mientras que el modelo de Johnson et al., desarrollado en vides, indica valores similares a los encontrados en la literatura para viña, el modelo de González et al., (2006) desarrollado en maíz y trigo, señala valores más ajustados para el cultivo herbáceo de riego y además señala un comportamiento esperable del IAF en el momento de suelo desnudo (AIF=0).

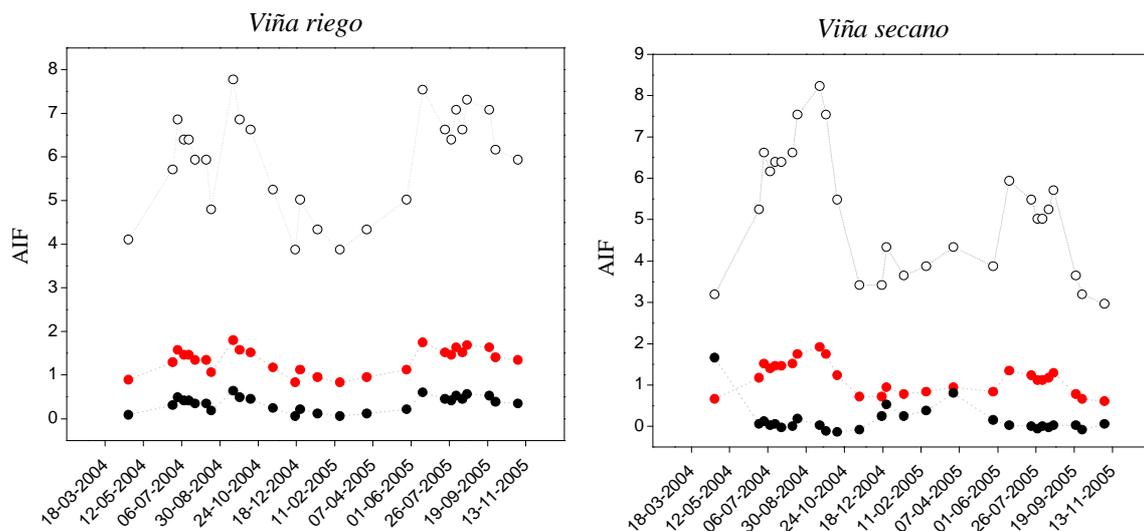


Fig. 18. Evolución temporal del IAF modelado en cultivos agrícolas.

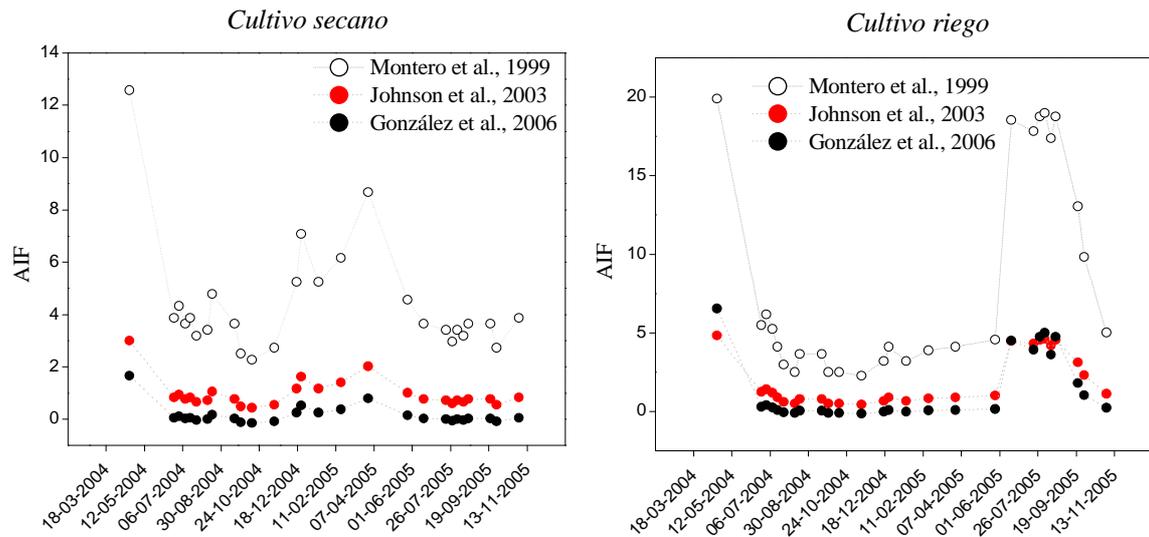


Fig. 18. Evolución temporal del IAF modelado en cultivos agrícolas (continuación).

Por su parte, las especies forestales mostraron valores estables de IAF modelado, con valores en torno a 3 en la Chopera y el Roble y próximo a 1 en el sitio de las Sabinas (Fig. 19).

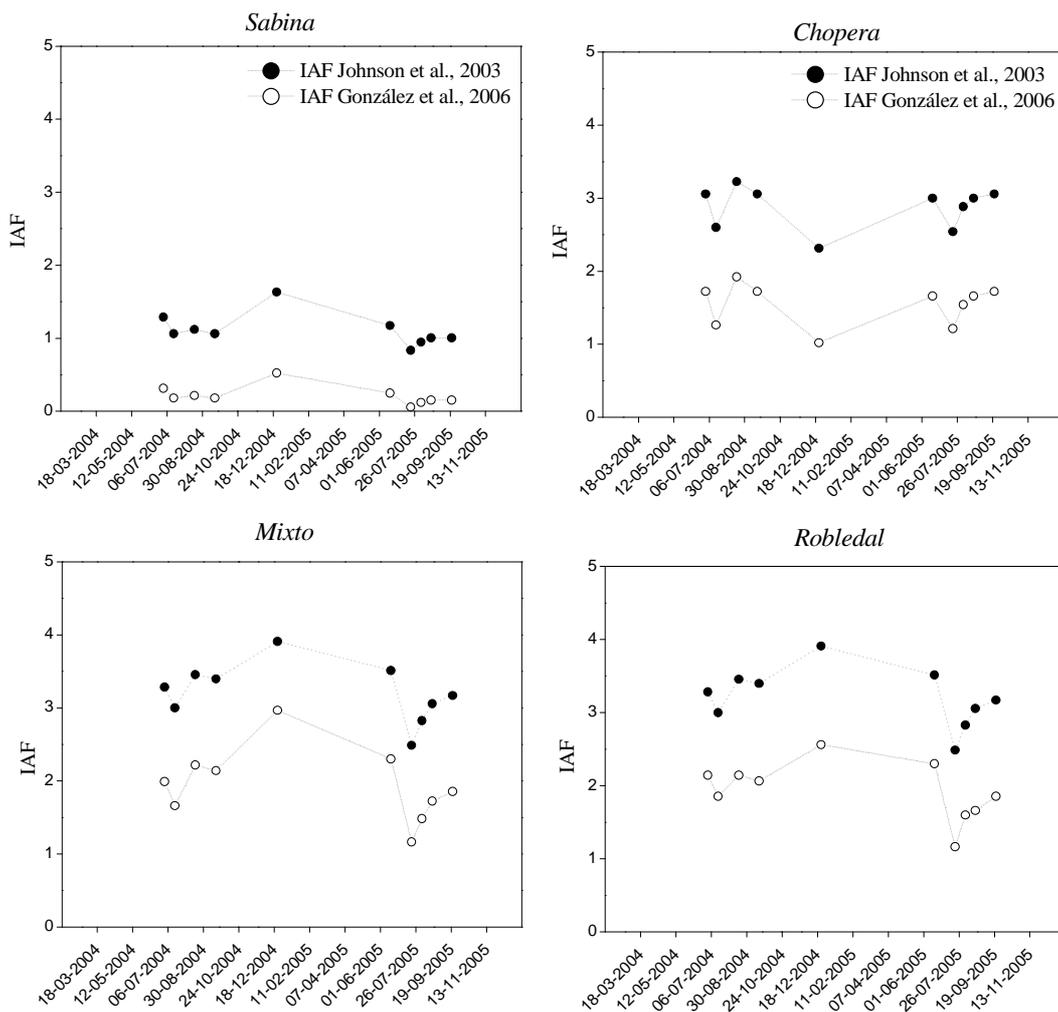


Fig. 19. Evolución temporal del IAF modelado en masas forestales.

El siguiente parámetro biofísico evaluado a través de su relación con el IV fue la evolución temporal de la fracción de cobertura F_c . Los modelos seleccionados desde la literatura se grafican en la Figura 20 y 21.

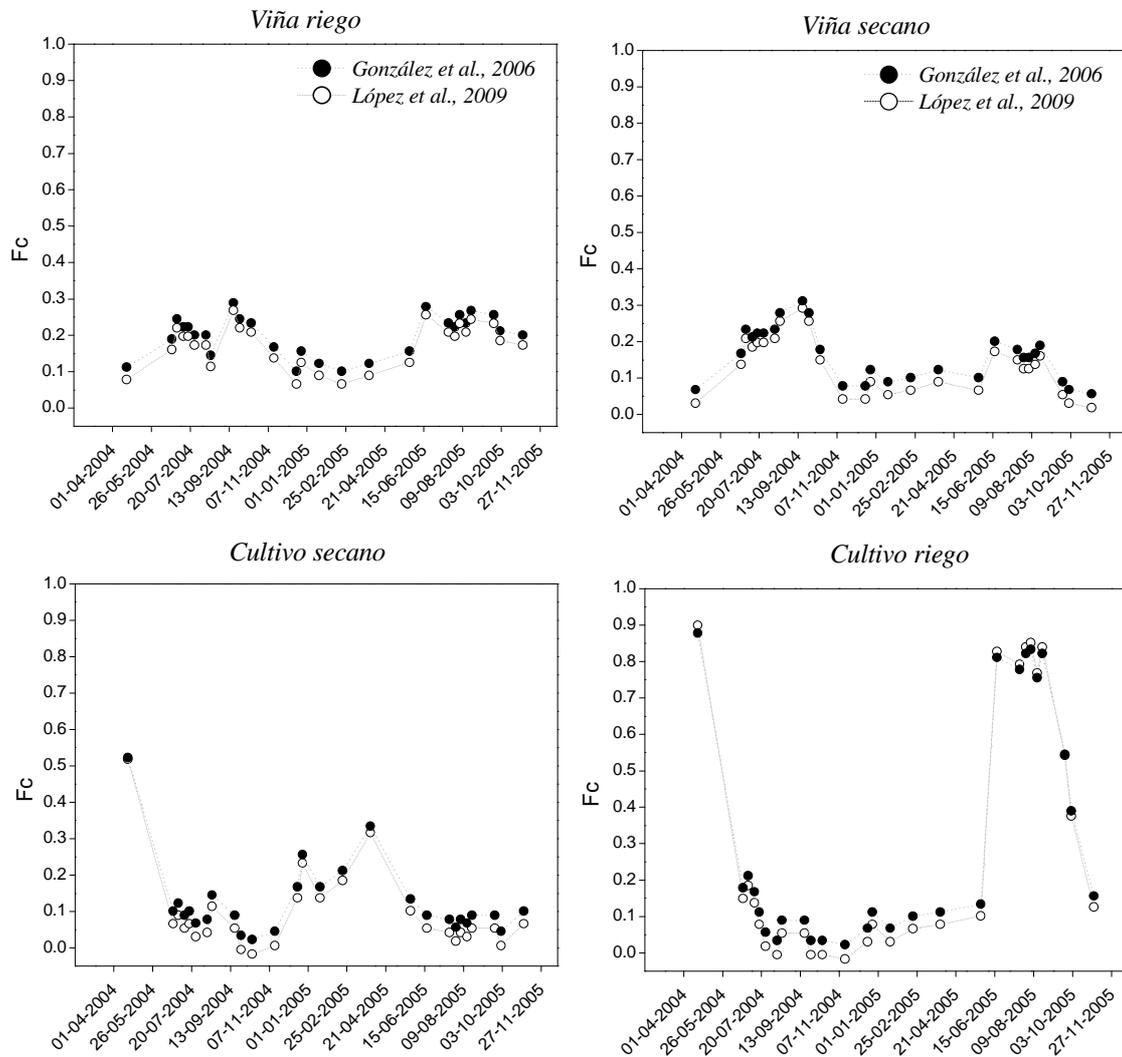


Fig. 20. Fracción de cobertura en cultivos agrícolas.

Los valores promedio de la fracción de cobertura modelada se resumen en el Cuadro 2. Es interesante destacar que todos los valores de fracción de cobertura fueron menores el año 2005 a excepción del sitio del cultivo herbáceo de riego el cual por su manejo agronómico y su fecha de siembra no acusó las inclemencias climáticas.

Cuadro 2. Valores promedio de F_c en los sitios de estudio.

Año	Viña riego	Viña secano	Cultivo Secano	Cultivo herbáceo o riego	Sabina	Chopera	Mixto	Robledal
2004	0.27	0.29	0.52	0.18	0.15	0.48	0.60	0.60
2005	0.26	0.17	0.32	0.85	0.11	0.45	0.44	0.50

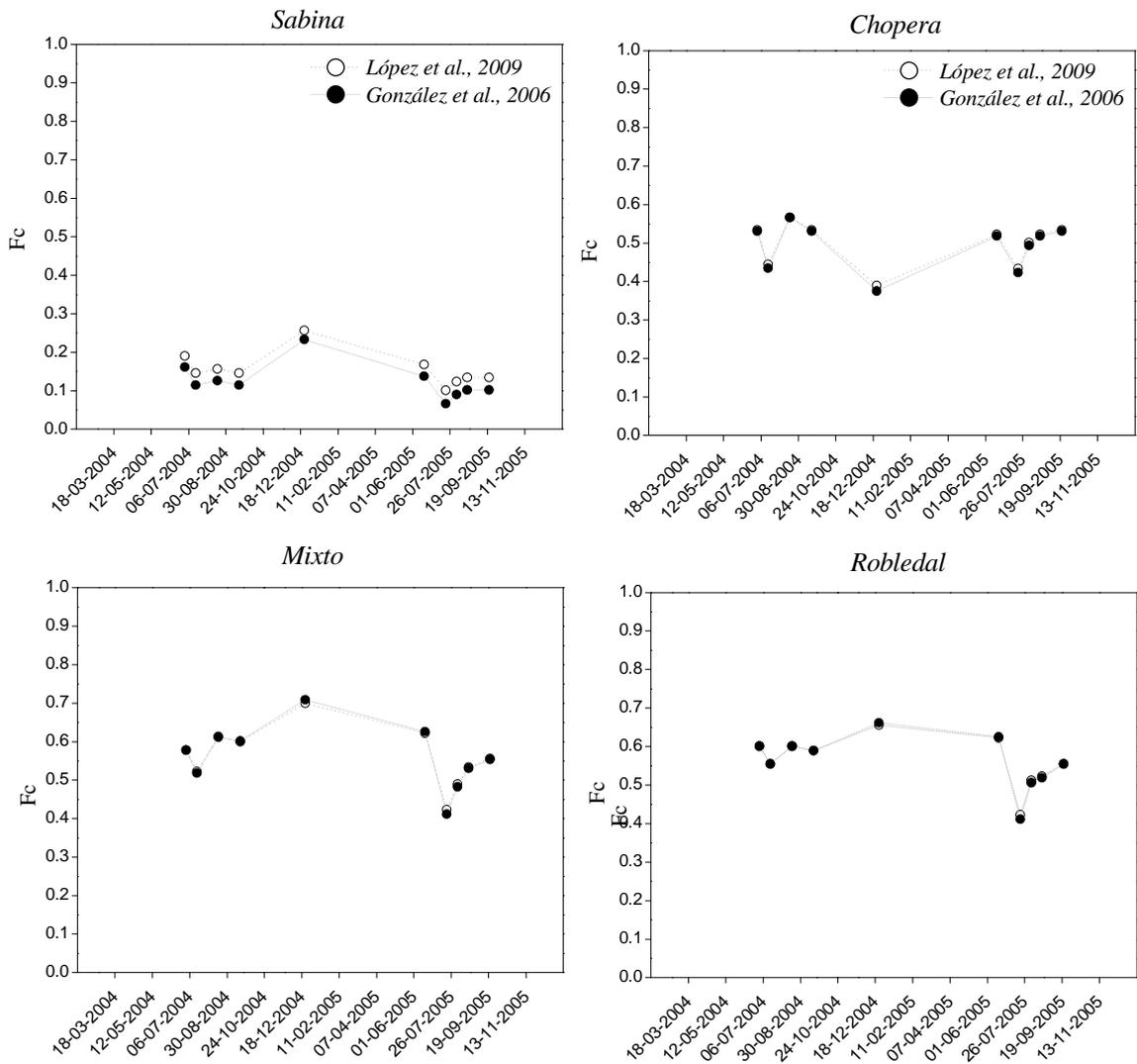


Fig. 21. Fracción de cobertura en sitios forestales.

Debido a que la metodología Kc -FAO ha sido desarrollada para cultivos agrícolas, el análisis de su modelación con el índice de vegetación se restringirá a este grupo de vegetación. Los valores indicados por los modelos utilizados difieren muy poco entre sí (alrededor de un 6% en el Kc) las cuales pueden tener relación con las condiciones climáticas propias del sitio y el período de datos con los que fueron desarrollados. En la Figura 22 se grafica su evolución.

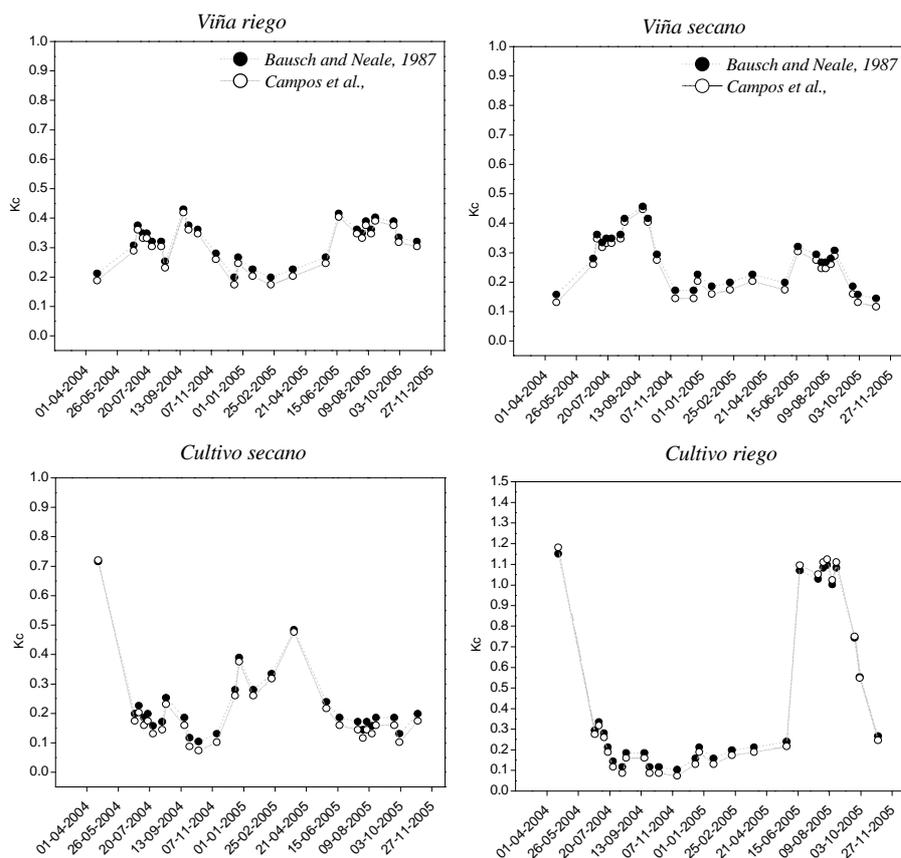


Fig. 22. Evolución temporal de Kc estimado a partir del NDVI.

Los valores modelados durante el periodo denominado *Kc*-medio (mediados de temporada, posterior a crecimiento vegetativo, sin cambios de cobertura y cuando el *Kc* ha alcanzado su valor máximo) se resumen en la Cuadro 3.

Cuadro 3. Valores promedio de Kc durante el período denominado *Kc medio*.

Año	<i>Kc</i>							
	Viña riego	DS	Viña secano	DS	Cultivo secano	DS	Cultivo riego	DS
2004	0.33	±0.04	0.34	±0.02	0.72	±0.06	0.32	±0.07
2005	0.37	±0.01	0.27	±0.05	0.32	±0.04	1.12	±0.02

Como se puede observar, los valores de *Kc* en el cultivo de viña, fueron muy similares entre el secano y el riego para el año 2004. El siguiente año, ya con condiciones de sequía, los valores de *Kc* medio bajaron en el sitio los sitios sin riego. Para el cultivo herbáceo de riego, el *Kc* alcanzó un valor promedio de 1.17, similar al valor recomendado por FAO para el maíz y el tipo climático semi-árido presente en el sitio.

6. Conclusiones

Se analizaron de manera temporal modelos predictivos de variables biofísicas basados en su correlación con el Índice de Vegetación de Diferencias Normalizado (NDVI). El índice de vegetación recogió de manera adecuada la evolución temporal de la vegetación en la mayoría de las fechas analizadas. Los modelos utilizados fueron capaces de predecir las variables biofísicas de interés de manera adecuada de acuerdo a comparación con datos de literatura. El índice fue capaz de reproducir eventos extremos (sequía o helada).

El comportamiento del índice NDVI debe ser verificado en caso de valores extremos ya que el proceso de corrección atmosférica puede introducir resultados erróneos en zonas sombrías.

En el caso de las parcelas forestales naturales el comportamiento del IV es poco variable (plano) por lo que es importante tratar el complejo formado por la especie predominante y su cortejo correspondiente de forma conjunta. De este modo nos aproximamos a un enfoque totalmente diferente al de los cultivos, ya que la importancia en las parcelas forestales seleccionadas viene dada por el valor ecológico de las formaciones boscosas, lo que nos impone un análisis que debe atender a la calidad ecológica de la zona. Para posibilitar éste análisis se propone estudiar el estado climático en el que se encuentra la parcela, en función de la serie de vegetación correspondiente según la clasificación de Rivas Martínez 1978. Sacando una relación entre la serie de vegetación y el estado de la misma, según los niveles temporales de NDVI característicos de cada estado, se podría llegar a identificar, por medio de la teledetección, valores ambientales y calidades ecológicas de zonas sólo con el análisis de parámetros biofísicos de la vegetación.

Las limitantes técnicas detectadas se relacionan principalmente a la temporalidad de las imágenes en zonas sin traslape de los recorridos del sensor y en posición de montaña, lugar con mayor frecuencia de nublados y por tanto menor número de imágenes útiles. Otra limitante detectada corresponde fallas en el proceso de corrección atmosférica, en sitios con sombra en relieve montañoso.

7. Referencias

- Allen, R.G., Pereira, L.S., Raes, D. and Smith, M., 1998. Crop evapotranspiration. Guidelines for computing crop water requirements. FAO Irrigation and Drainage, 56. FAO, Rome, Italy, 298 pp.
- Asrar, G., Myneni, R.B. and Choudhury, B.J., 1992. Spatial heterogeneity in vegetation canopies and remote sensing of absorbed photosynthetically active radiation: A modeling study. *Remote Sensing of Environment*, 41(2-3): 85-103.
- Baret, F. and Guyot, G., 1991. Potentials and limits of vegetation indices for LAI and APAR assessment. *Remote Sensing of Environment*, 35: 161-173.
- Bausch, W.C. and Neale, C.U., 1987. Crop coefficients derived from reflected canopy radiation: a concept. *Trans. ASAE*(30): 703-709.
- Calera, A., González-Piqueras, J. and Meliá, J., 2004. Monitoring barley and corn growth from remote sensing data at field scale. *International Journal of Remote Sensing*, 25(1): 97-109.
- Campos, I., Neale, C.U., Calera, A., Balbontín, C. and González-Piqueras, J., Assessing Satellite-based basal crop coefficients FOR Irrigated grapes (*Vitis vinifera* L.). *Agricultural Water Management*.
- Gilbert, M.A., González-Piqueras, J., García-Haro, F.J. and Meliá, J., 2002. A generalized soil-adjusted vegetation index. *Remote Sensing of Environment*, 82(2-3): 303-310.
- González-Piqueras, J., 2006. Evapotranspiración de la cubierta vegetal mediante la determinación del coeficiente de cultivo por teledetección, Universitat de Valencia, Valencia, España, 337 pp.
- Guanter, L., González-Sanpedro, M.D.C. and Moreno, J., 2007. A method for the atmospheric correction of ENVISAT/MERIS data over land targets. *International Journal of Remote Sensing*, 28(3/4): 709-728.
- Johnson, L.F., Roczen, D.E., Youkhana, S.K., Nemani, R.R. and Bosch, D.F., 2003. Mapping vineyard leaf area with multispectral satellite imagery. *Computers and Electronics in Agriculture*, 38(1): 33-44.
- López-Urrea, R., Montoro, A., González-Piqueras, J., López-Fuster, P. and Fereres, E., 2009. Water use of spring wheat to raise water productivity. *Agricultural Water Management*, 96(9): 1305-1310.
- Montero, F.J., Meliá, J., Brasa, A., Segarra, D., Cuesta, A. and Lanjeri, S., 1999. Assessment of vine development according to available water resources by using remote sensing in La Mancha, Spain. *Agricultural Water Management*, 40(2-3): 363-375.
- Rouse, J.W., Haas, R.W., Shell, J.A., Deering, D.W. and Harlan, J.C., 1974. Monitoring the vernal advancement and retrogradation of natural vegetation. Final Report.
- Tucker, C.J., 1979. Red and photographic infrared linear combinations for monitoring vegetation. *Remote Sensing of Environment*, 8(2): 127-150.
- Wiegand, C.L., Richardson, A.J., Escobar, D.E. and Gerbermann, A.H., 1991. Vegetation indices in crop assessments. *Remote Sensing of Environment*, 35(2-3): 105-119.

ANEXO I

Cuadro 1. Listado de imágenes utilizadas en el estudio.

Código	Path	Row	Año	Fecha adquisición	Sensor
CC_L5_19933_100704	199	33	2004	10/07	LANDSAT 5
CC_L5_19933_110804	199	33	2004	11/08	LANDSAT 5
CC_L5_19933_141004	199	33	2004	14/10	LANDSAT 5
CC_L5_19933_151104	199	33	2004	15/11	LANDSAT 5
CC_L5_19933_171204	199	33	2004	17/12	LANDSAT 5
CC_L5_19933_210404	199	33	2004	21/04	LANDSAT 5
CC_L5_19933_240604	199	33	2004	24/06	LANDSAT 5
CC_L5_19933_260704	199	33	2004	26/07	LANDSAT 5
CC_L5_19933_280904	199	33	2004	28/09	LANDSAT 5
CC_L5_19933_011005	199	33	2005	01/10	LANDSAT 5
CC_L5_19933_021105	199	33	2005	02/11	LANDSAT 5
CC_L5_19933_140805	199	33	2005	14/08	LANDSAT 5
CC_L5_19933_180105	199	33	2005	18/01	LANDSAT 5
CC_L5_19933_190205	199	33	2005	19/02	LANDSAT 5
CC_L5_19933_260505	199	33	2005	26/05	LANDSAT 5
CC_L5_19933_290705	199	33	2005	29/07	LANDSAT 5
CC_L5_20033_010704	200	33	2004	01/07	LANDSAT 5
CC_L5_20033_180804	200	33	2004	18/08	LANDSAT 5
CC_L5_20033_241204*	200	33	2004	24/12	LANDSAT 5
CC_L5_20033_170704	200	33	2004	17/07	LANDSAT 5
CC_L5_20033_190904	200	33	2004	19/09	LANDSAT 5
CC_L5_20033_050805	200	33	2005	05/08	LANDSAT 5
CC_L5_20033_180605	200	33	2005	18/06	LANDSAT 5
CC_L5_20033_210805	200	33	2005	21/08	LANDSAT 5
CC_L5_20033_300305*	200	33	2005	30/03	LANDSAT 5
CC_L5_20033_090105	200	33	2005	09/01	LANDSAT 5
CC_L5_20033_200705	200	33	2005	20/07	LANDSAT 5
CC_L5_20033_220905	200	33	2005	22/09	LANDSAT 5

*: imágenes excluidas del proceso por condiciones de sombra o nubes.

ANEXO II. Descripción especies

Fenología y características de interés de las especies en masas forestales puras naturales, Ceballos y Fernández de Córdoba (1979).

Quercus pyrenaica Willd, Roble Melojo:

Árbol de talla media (hasta 20m), hojas simples, marcescentes o subpersistentes; en las estaciones frías se marchitan en otoño, mientras que en climas benignos pueden llegar verdes a Noviembre y Diciembre. La foliación tiene lugar bien entrada la primavera.

Florece en Mayo y las bellotas maduran en Octubre-Noviembre del mismo año.

Muy extendido en la Península Ibérica.

Juniperus thurifera, Sabina Albar:

Árbol resinoso siempreverde de mediana talla (5-10m), sistema radical muy poderoso y desarrollado que produce un crecimiento aéreo lento y una densidad en sus masas puras baja. Posee un temperamento durísimo y una gran vitalidad.

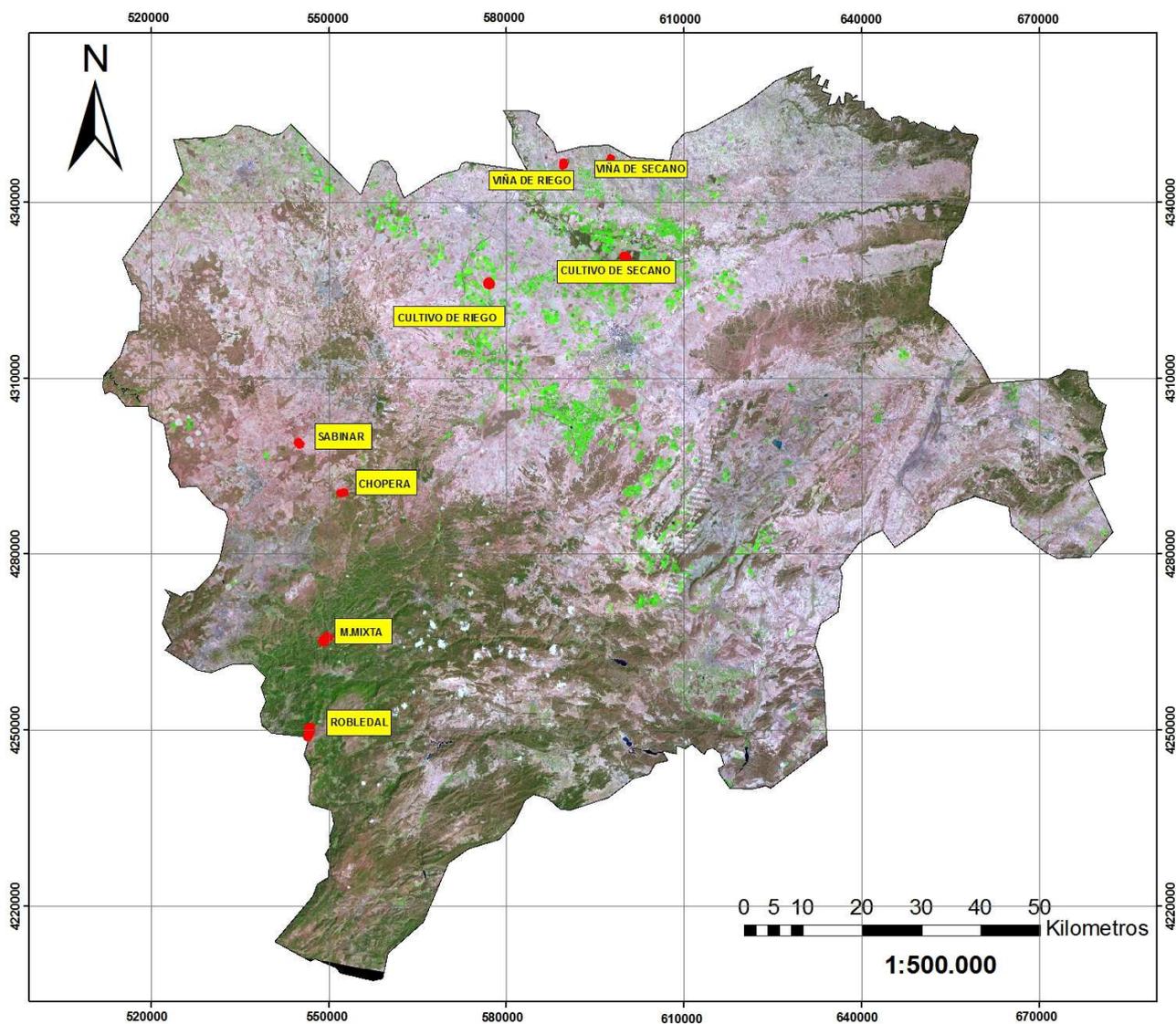
Hojas escumiformes siendo el conjunto del follaje muy oscuro o algo glauco.

Florece en primavera y los gálbulos maduran en otoño o invierno del año siguiente.

En el área Ibérica habita en altas mesetas y páramos.

ANEXO III. Mapas

UBICACIÓN DE LAS PARCELAS DE ESTUDIO



Proyecto de metodología:

"Procesado de imágenes satélite.
Obtención de magnitudes biofísicas
de vegetación"

Proyección: UTM 30 ED 50

Datos: Landsat 5 TM

Curso de especialista en SIG
y Teledetección 2009/2010.

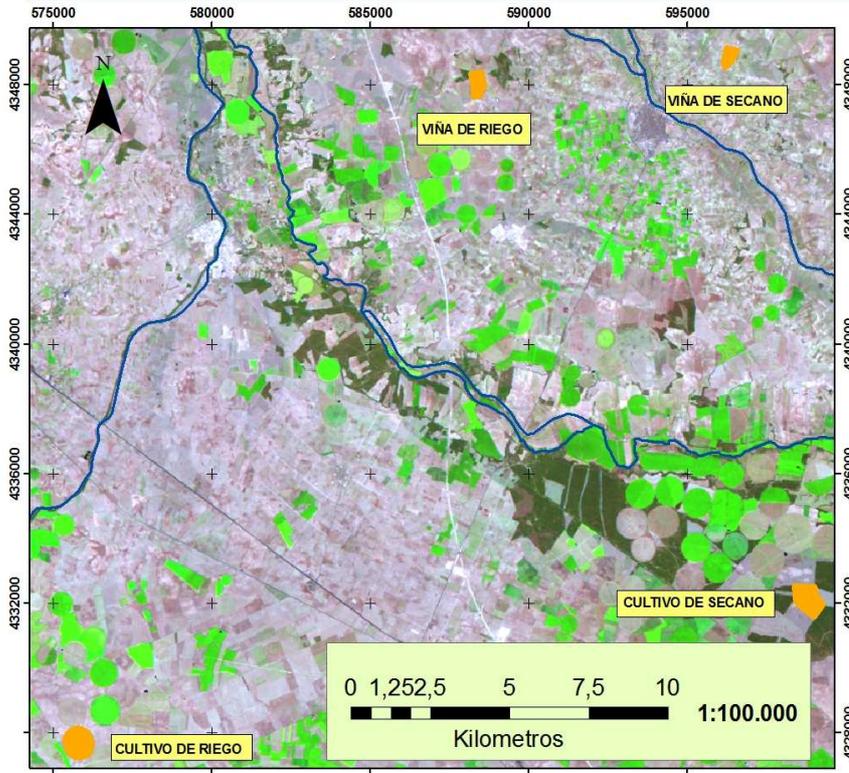
Leyenda

 Parcelas de estudio

LOCALIZACIÓN DE LA PROVINCIA DE ALBACETE



PARCELAS AGRÍCOLAS Y PARCELAS FORESTALES

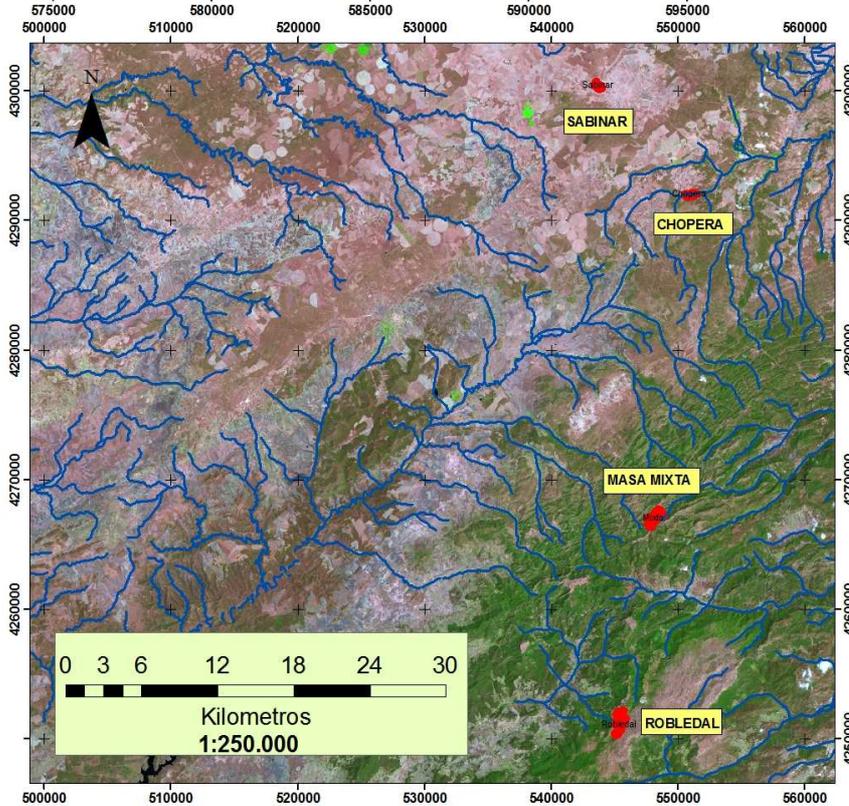


Proyecto de metodología:
"Procesado de imagenes satélite. Obtención de magnitudes biofísicas de vegetación"

Proyección: UTM 30 ED 90

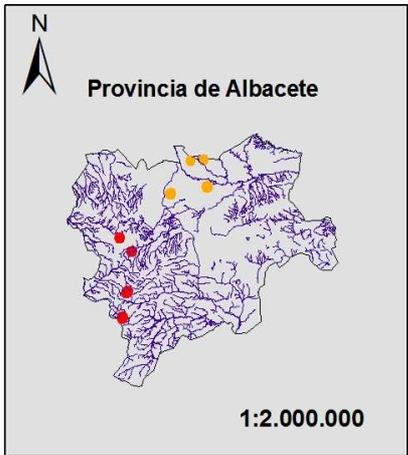
Datos: Landsat 5 TM

Curso de especialista en SIG y Teledetección 2009/2010.

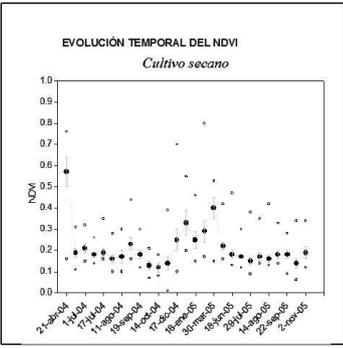
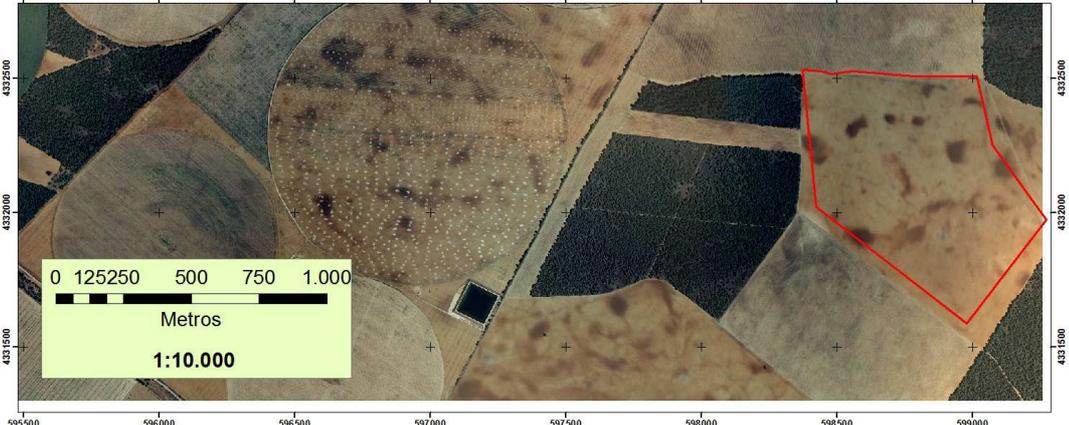
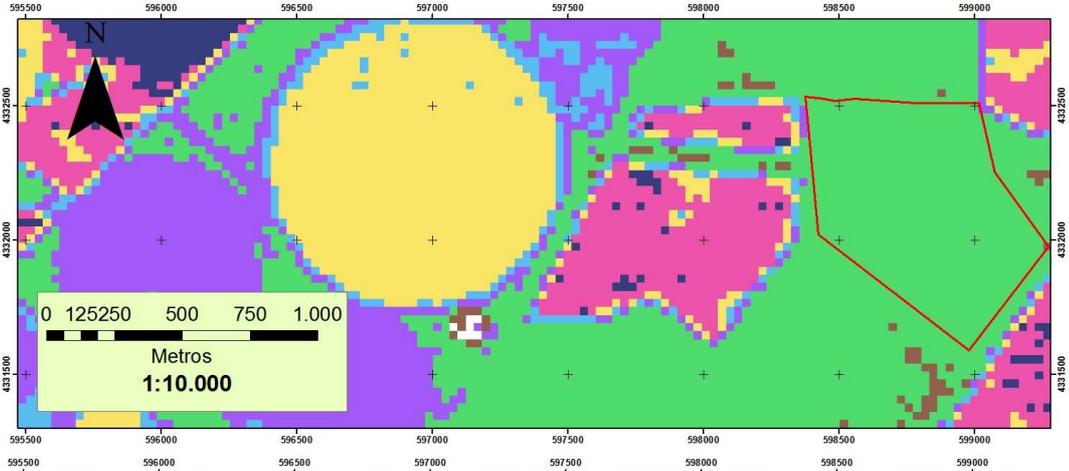


Leyenda

- Red hidrográfica
- Parcelas agrícolas
- Parcelas forestales



NDVI ACUMULADO 04/05. CULTIVO DE SECANO.



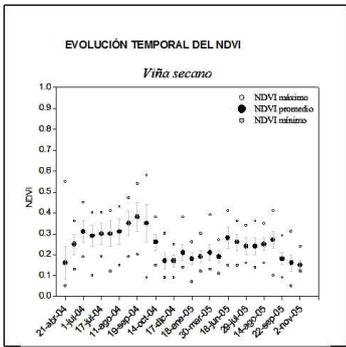
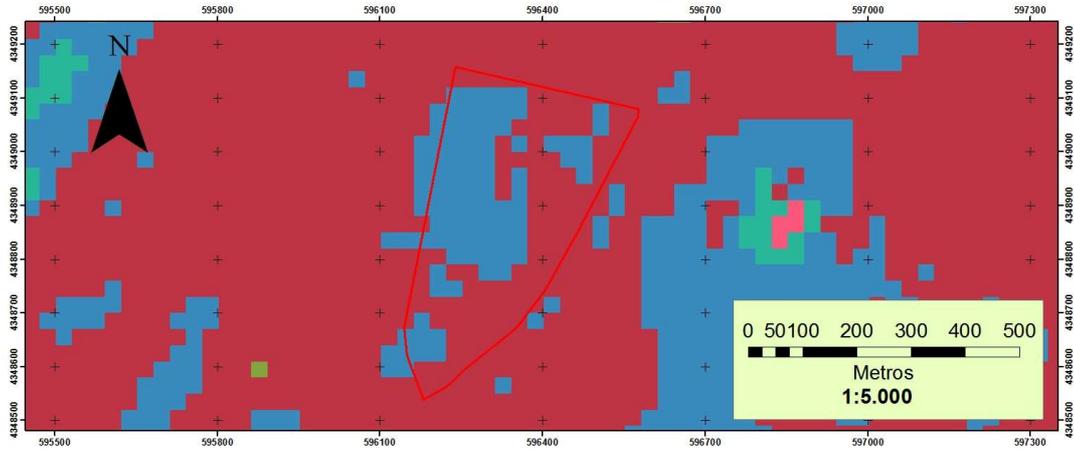
Proyecto de metodología:
"Procesado de imagenes satélite.
Obtención de magnitudes biofísicas
de vegetación"

Proyección: UTM 30 ED 50

Datos: Landsat 5 TM

Curso de especialista en SIG
y Teledetección 2009/2010.

NDVI ACUMULADO 04/05. VIÑA DE SECANO.



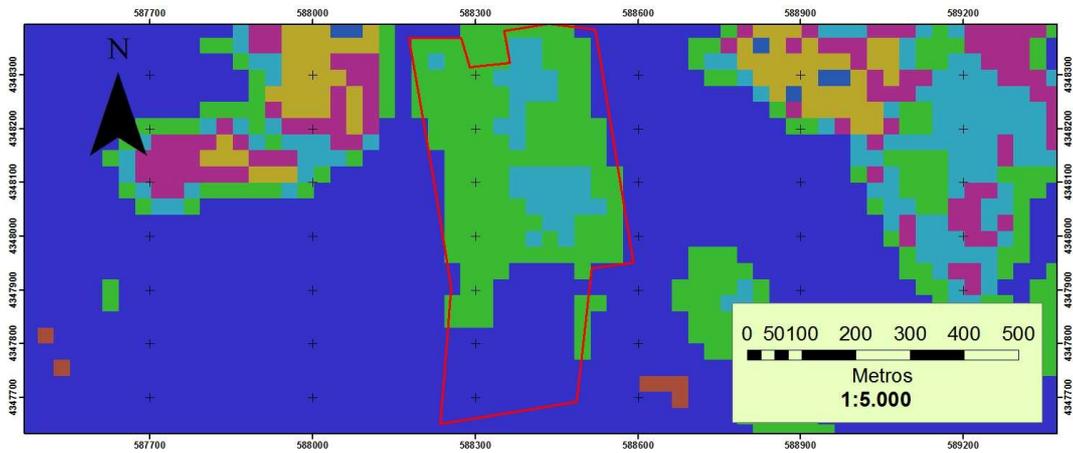
Proyecto de metodología:
"Procesado de imágenes satélite.
Obtención de magnitudes biofísicas
de vegetación"

Proyección: UTM 30 ED 50

Datos: Landsat 5 TM

Curso de especialista en SIG
y Teledetección 2009/2010.

NDVI ACUMULADO 04/05. VIÑA DE RIEGO.



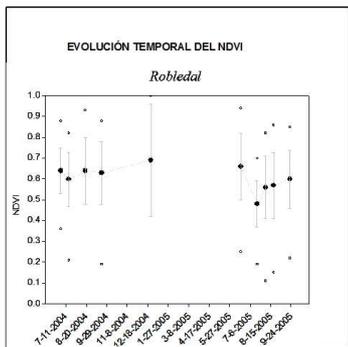
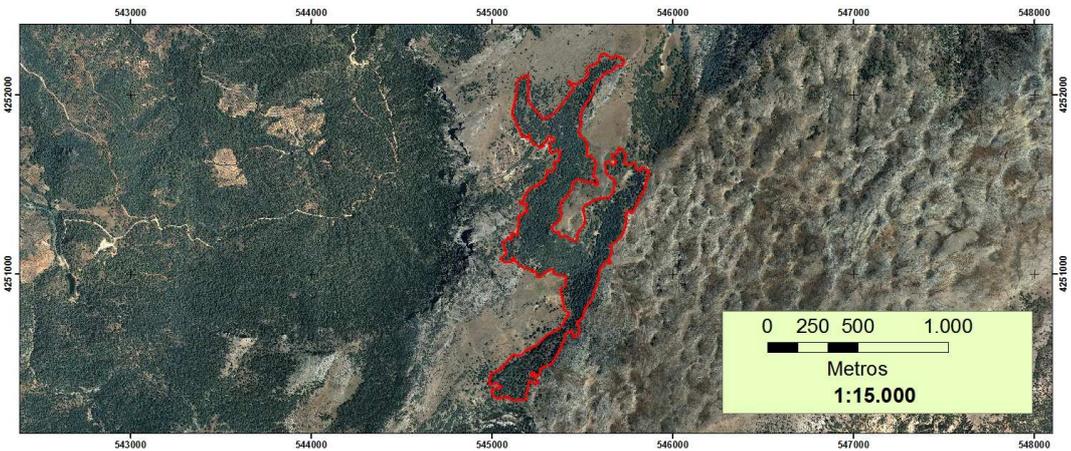
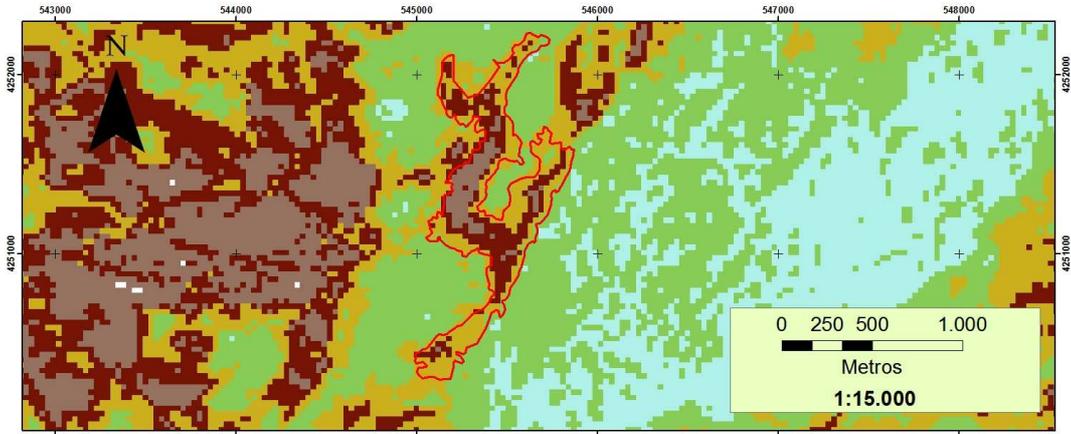
Proyecto de metodología:
 "Procesado de imágenes satélite.
 Obtención de magnitudes biofísicas
 de vegetación"

Proyección: UTM 30 ED 50

Datos: Landsat 5 TM

Curso de especialista en SIG
 y Teledetección 2009/2010.

NDVI ACUMULADO 04/05. ROBLEDAL.



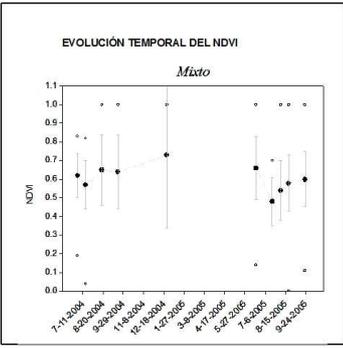
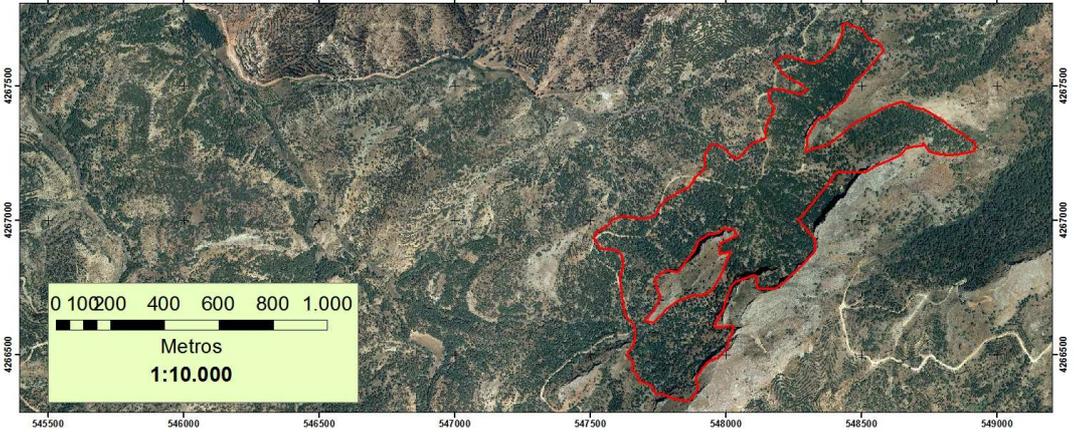
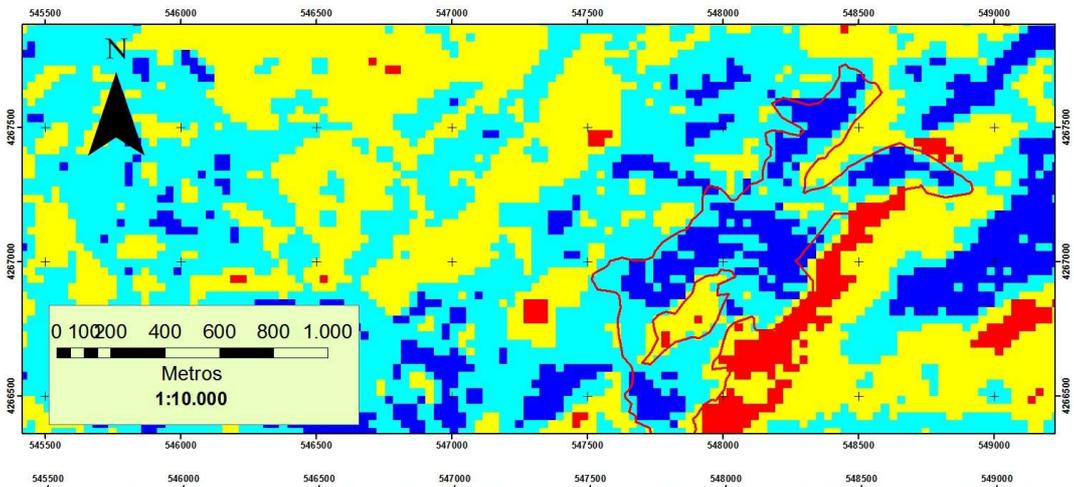
Proyecto de metodología:
 "Procesado de imágenes satélite.
 Obtención de magnitudes biofísicas
 de vegetación"

Proyección: UTM 30 ED 50

Datos: Landsat 5 TM

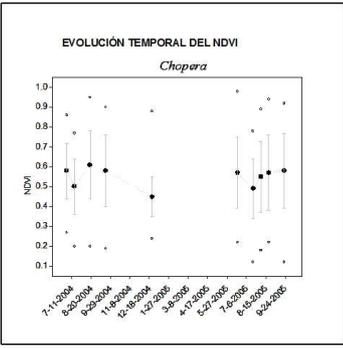
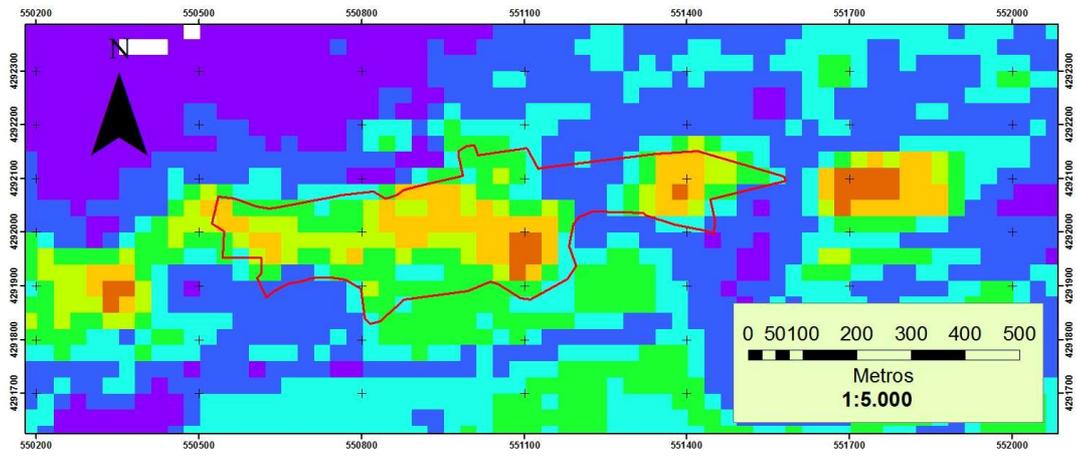
Curso de especialista en SIG
 y Teledetección 2009/2010.

NDVI ACUMULADO 04/05. MASA MIXTA.



Proyecto de metodología:
 "Procesado de imágenes satélite.
 Obtención de magnitudes biofísicas
 de vegetación"
 Proyección: UTM 30 ED 50
 Datos: Landsat 5 TM
 Curso de especialista en SIG
 y Teledetección 2009/2010.

NDVI ACUMULADO 04/05. CHOPERA.



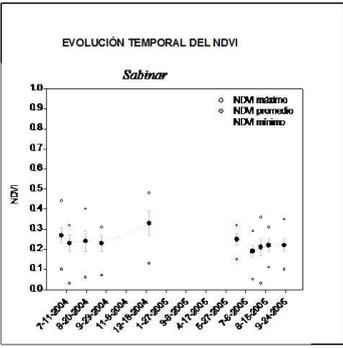
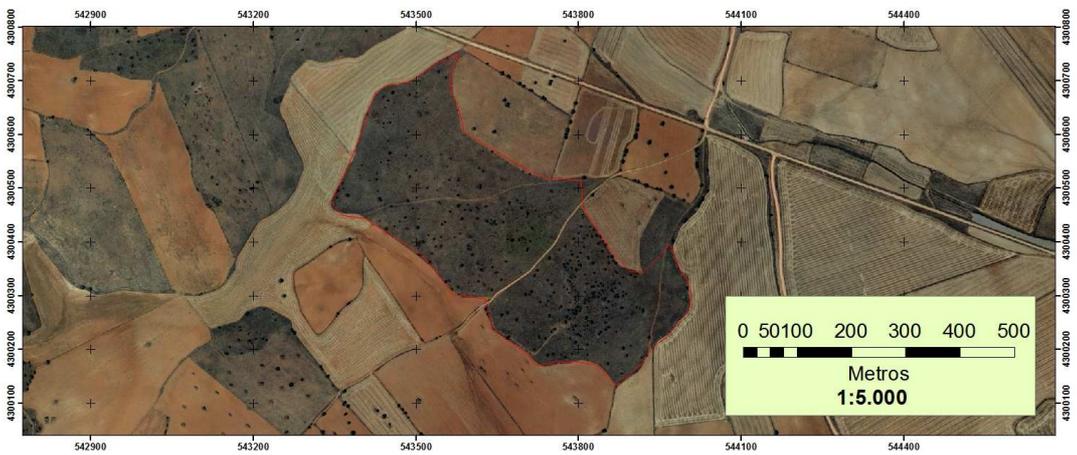
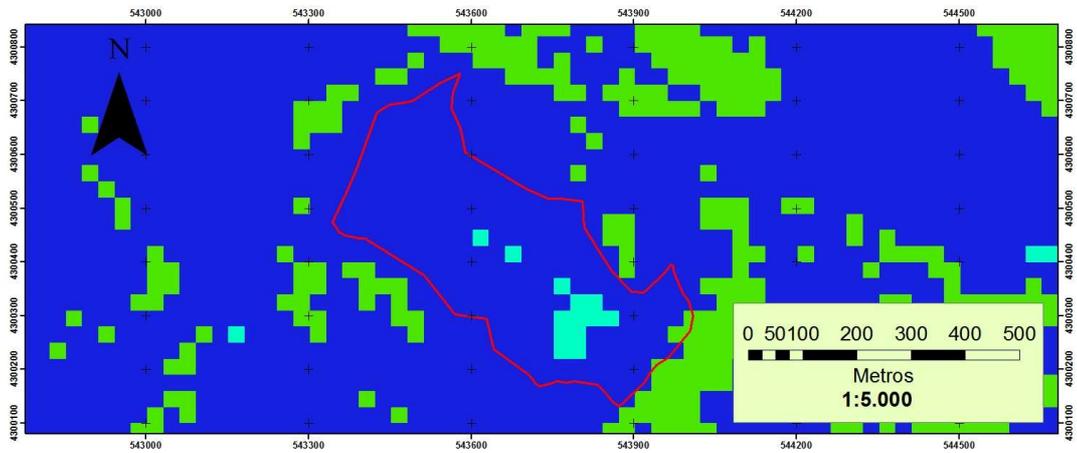
Proyecto de metodología:
 "Procesado de imágenes satélite.
 Obtención de magnitudes biofísicas
 de vegetación"

Proyección: UTM 30 ED 50

Datos: Landsat 5 TM

Curso de especialista en SIG
 y Teledetección 2009/2010.

NDVI ACUMULADO 04/05. SABINAR.



Proyecto de metodología:
 "Procesado de imágenes satélite.
 Obtención de magnitudes biofísicas
 de vegetación"

Proyección: UTM 30 ED 50

Datos: Landsat 5 TM

Curso de especialista en SIG
 y Teledetección 2009/2010.

ANEXO III. Galería fotográfica



Sitio Sabinar



Sito Sabinar



Sitio Sabinar



Sitio Sabinar



Sitio masa mixta



Sitio masa mixta



Sitio masa mixta



Sitio masa mixta



Sitio masa mixta



Sitio masa mixta



Sitio Robledal



Hoja Robledal



Sitio Robledal



Sitio Robledal



Sitio Robledal



Sitio Robledal