Análisis estacional de la influencia climática sobre la variabilidad espacio-temporal del NDVI en el centro del valle del Ebro

S.M. Vicente-Serrano^{1,2}, J.M. Cuadrat-Prats² y A. Romo³ sergio.vicente-serrano@cesbio.cnes.fr

 ¹ Centre d'Etudes Spatiales de la Biosphère (CESBIO), 18 avenue. Edouard Belin, bpi 2801, 31401 Toulouse cedex 9. Francia.
² Departamento de Geografía. Universidad de Zaragoza. C/ Pedro Cerbuna 12. 50009. Zaragoza, España ³ Laboratorio de Teledetección. Departamento de Física Aplicada I. Facultad de Ciencias. Universidad de Valladolid. 47071. Valladolid, España.

RESUMEN

En este trabajo se analiza la influencia de diferentes variables climáticas sobre la variabilidad interanual del NDVI en las regiones semiáridas del sector central del valle del Ebro. Se ha utilizado una serie de NDVI a un kilómetro de resolución espacial entre 1988 y 2000. Mediante análisis SIG e interpolaciones espaciales se han obtenido series de precipitación, evapotranspiración y balance hídrico del suelo a la misma resolución espacial. Los análisis se han realizado estacionalmente para identificar al papel diferencial de las variables climáticas a lo largo del año en la explicación de las variaciones interanuales del NDVI. El análisis se ha realizado de forma continua, considerando cada uno de los píxeles y también mediante la agregación de los valores de NDVI considerando los principales usos del suelo. Los resultados obtenidos indican que la influencia de las diferentes variables climáticas sobre el NDVI presenta notables diferencias estacionales y también en función de las cubiertas y usos del suelo.

PALABRAS CLAVE: NDVI, NOAA-AVHRR, semiárido, SIG, interpolación, precipitación, balance hídrico, evapotranspiración, valle del Ebro

ABSTRACT

This paper analyses the influence of different climatic variables on the interannual variability of the NDVI in the semi-arid regions of the middle Ebro valley (North-east of Spain). We have used a NDVI data set at 1 km² of spatial resolution between 1988 and 2000. Using Geographical Information Systems and spatial interpolation techniques we obtained continuous and multi-temporal maps of precipitation, evapotranspiration and soil water balance at the same spatial resolution that NDVI images. Seasonal analysis has been carried out to identify the role of the climatic variables on the NDVI during the year. The analysis has been carried out continuously (pixel per pixel) and also aggregating the NDVI values for the main land-uses. The results indicate that the influence of the different climatic variables on the NDVI has important seasonal differences and also as a function of the main land-uses of the study area.

KEY WORDS: NDVI, NOAA-AVHRR, semi-arid regions, GIS, interpolation, precipitation, soil water balance, evapotranspiration, Ebro valley.

INTRODUCCIÓN

Alrededor del 70%-80% de la variación temporal global del NDVI puede ser explicada mediante la utilización de un pequeño número de índices climáticos utilizados como variables predictoras (Potter y Brooks, 1998). Numerosos autores han analizado el impacto de las condiciones climáticas sobre la vegetación natural o sobre los cultivos a diferentes escalas espaciales mediante el NDVI (Índice de Vegetación Normalizado) obtenido de imágenes de satélite (Hutchinson, 1991; Hellden y Eklundh, 1988). Ichii *et al.* (2002) relacionaron los valores de NDVI con los de temperaturas y precipitaciones a escala global, observando una relación positiva y significativa entre el NDVI y las temperaturas en las latitudes medias y altas de Europa y Asia, mientras que la mayor correlación entre el NDVI y las precipitaciones las registraron en regiones desérticas y subdesérticas.

En las regiones áridas y semiáridas del mundo el principal limitante para la actividad vegetal es la disponibilidad de agua (Le Houerou, 1984). Los estudios realizados sobre el impacto de las condiciones hídricas sobre la dinámica vegetal utilizando imágenes de satélite han sido frecuentes en las regiones semiáridas de África (Tucker et al., 1983; Townshend y Justice, 1986; Malo y Nicholson, 1990; Davenport y Nicholson, 1993). De estos estudios se concluye que las variaciones temporales del NDVI están íntimamente relacionadas con las precipitaciones (Santos y Negrín, 1997; Farrar et al., 1994), pero también se ha comprobado que la respuesta de la vegetación es mayor ante déficits pluviométricos acumulados que ante precipitaciones puntuales (Potter y Brooks, 1998; Narasimha-Rao et al., 1993; Davenport y Nicholson, 1993), por ello frecuentemente se han utilizado ecuaciones de balance hídrico del suelo o precipitaciones acumuladas en el tiempo, que consideran las condiciones de humedad a escalas temporales amplias, para determinar la respuesta de la vegetación ante determinadas condiciones de humedad (Kerr et al., 1989; Narasimha-Rao et al., 1993).

Pero además de las condiciones hídricas, las temperaturas también pueden tener una influencia directa sobre el crecimiento vegetal (Yang *et al.* 1997). En las regiones semiáridas mediterráneas el máximo de actividad vegetal se registra en primavera. La suavización térmica tras el invierno permite un buen desarrollo de la vegetación siempre que las condiciones hídricas sean adecuadas, por lo que hay que considerar que la variabilidad interanual del NDVI podría estar muy condicionada por los valores de transpiración si no hay problemas respecto a la disponibilidad de agua en el suelo (Millington *et al.*, 1994; Milich y Weiss, 2000).

Pero además del diferente impacto que pueden tener distintas variables climáticas sobre la dinámica de la vegetación, hay que tener en cuenta que la respuesta puede ser muy diferente en función de las diferentes formaciones vegetales, de sus características fisiológicas, su localización geográfica e incluso hay que considerar que el impacto puede variar estacionalmente de forma muy importante en función de las necesidades hídricas y térmicas de la vegetación. Por ejemplo, la asociación entre precipitaciones y NDVI varía entre las formaciones vegetales, ya que los distintos tipos de vegetación difieren en la ratio de crecimiento o en la producción primaria por unidad de lluvia, aspecto que cambia la eficacia en el uso del agua y, por tanto, la vulnerabilidad frente a déficits hídricos (Le Houerou, 1984).

En este trabajo se estudia la influencia de diferentes variables climática sobre la variabilidad interanual del NDVI en una de las regiones más áridas de la Península Ibérica: el sector central del valle del Ebro. El análisis se realiza estacionalmente y de forma espacialmente continua para determinar si las influencias cambian a lo largo del año y en función de distintas formaciones vegetales y usos del suelo. Los estudios sobre la influencia del clima sobre la vegetación en la región mediterránea son escasos. Por ello resulta necesario ampliar la red de análisis en un área en la que los modelos climáticos predicen importantes cambios a lo largo del siglo xxI (Houghton et al. 2001), que podrían tener serios impactos sobre la vegetación natural y los cultivos (Lavorel et al. 1998).

ÁREA DE ESTUDIO

El sector central del valle del Ebro (Figura 1) es una de las regiones más áridas de la Península Ibérica, donde la variabilidad climática y especialmente pluviométrica introduce una limitación importante para el desarrollo de determinantes actividades y ecosistemas naturales. Se trata de un área escasamente productiva como consecuencia de la mencionada aridez, por la pobreza del sustrato y por la frecuencia de las sequías (Austin *et al.*, 1998; Vicente-Serrano, 2004).



Figura 1. Localización del área de estudio.

El valle forma una cubeta topográfica, rodeada por cadenas montañosas, lo que confiere al sector central del valle unas condiciones climáticas muy continentales y extremadas, así como la presencia de un tipo de vegetación adaptado a estas condiciones. Un aspecto muy relevante para explicar el paisaje actual son las características climáticas. La extremada amplitud térmica anual, con inviernos muy fríos y veranos extremadamente cálidos, y la escasez de precipitaciones y su variabilidad en el tiempo y el espacio, hacen que el clima sea un factor determinante en la configuración del paisaje agrario y vegetal, con sequías intensas (Vicente-Serrano y Beguería, 2003) que muestran una importante variabilidad en el espacio (Vicente-Serrano y Cuadrat, 2005).

En general, el clima de esta región puede englobarse dentro de los climas mediterráneos, con un importante grado de continentalidad. Los inviernos son fríos y de larga duración, siendo frecuentes las heladas, aspecto que limita, de forma importante, el desarrollo de la vegetación y de los cultivos en el interior del valle. En el centro del valle se registran cuatro meses en los que las temperaturas medias se sitúan por debajo de 10°, con temperaturas extremas en estas zonas inferiores a -10 °C. En verano se registran condiciones de calor muy severo durante prolongados periodos de tiempo; aunque en el centro del valle los valores medios estivales se sitúan en torno a 24 °C, las máximas pueden alcanzar 40 °C, con el consiguiente efecto evaporante (Cuadrat, 1999).

En el caso de las precipitaciones, en las zonas centrales del valle las precipitaciones son escasas durante todos los meses del año, y apenas se aprecia una estacionalidad en los valores de precipitación, aunque es el verano la estación que menos precipitación registra. Los valores medios anuales oscilan entre los 800 mm en las áreas del norte, en contacto con las cadenas pirenaicas y menos de 350 mm en el centro de la depresión. A pesar de las diferencias espaciales, la práctica totalidad del área de estudio muestra balances hídricos negativos (precipitación-evapotranspiración), muy acusados (más de 900 mm de déficit) en las zonas centrales del valle.

El sector central del valle del Ebro se caracteriza por una importante diversidad paisajística (Frutos, 1976). Actualmente los cultivos de secano (a los que se añaden las áreas agrícolas con un mosaico de vegetación natural) representan un importante porcentaje (38.9%), muy superior al de los cultivos de regadío (20.8%). Sin embargo, el uso del suelo que cubre mayor superficie corresponde a las áreas de matorrales y pastizales (25.7%), que a lo largo del siglo xx se han mantenido en aquellas áreas de menor potencialidad para la agricultura. Los bosques constituyen únicamente el 10.1% de la superficie total, y de ellos son dominantes los bosques de coníferas más resistentes y adaptados a los rigores edáficos y climáticos del valle. La vegetación natural se encuentra muy degradada debido a la acción humana, pero representa un importante porcentaje en el total del área de estudio (> 35%). Sobre suelos yesíferos se conforma una gran estepa con amplias áreas de suelo desnudo. El paisaje se caracteriza por la ausencia de un estrato arbóreo, dominando los matorrales de escaso porte y las plantas herbáceas anuales (Suárez Cardona et al., 1991).

METODOLOGÍA

El análisis espacio-temporal entre series de NDVI y variables de carácter climático se ha realizado en un entorno SIG que permitiera introducir múltiples capas de información espacial.

Análisis de la información climática

Inicialmente fue necesario llevar cabo una interpolación de la información climática disponible. Para ello se ha contado con datos pluviométricos diarios de 255 observatorios y datos termométricos (temperaturas máximas, mínimas y medias) de 164 observatorios en el periodo 1985-2000. Se obtuvieron mapas continuos para cada mes de temperatura y precipitación a la misma resolución espacial de las imágenes de satélite utilizadas (NOAA-AVHRR) con el objetivo de obtener una serie temporal climática en cada uno de los píxeles y poder relacionar los valores de NDVI con los de las condiciones climáticas, de forma espacial, y temporalmente continua.

Para ello se utilizaron técnicas de interpolación local, optando por un interpolador mediante *splines* con tensión que en el centro del valle del Ebro ofrece buenos resultados y se adapta a las situaciones concretas de cada mes (Vicente-Serrano *et al.*, 2003).

Una vez obtenidas las cartografías de precipitaciones y temperaturas (medias, máximas y mínimas) se realizaron los cálculos de ETP así como un balance hídrico climático. Los modelos teóricos de balance hídrico del suelo pueden resultar de enorme complejidad e integrar diferentes parámetros. No obstante, en el sector central del valle del Ebro, Seeger (2001) aplicó, con buenos resultados, un balance hídrico climático del suelo para analizar la dinámica de la humedad en espacios de baja cobertura vegetal. Este autor señala que los valores de humedad del suelo medidos en campo están muy relacionados con los valores teóricos obtenidos de un balance hídrico climático, siendo su dinámica temporal comparable. Tanto la infiltración como la escorrentía del agua procedente de las precipitaciones es escasa, y las pérdidas de agua del suelo están condicionadas, fundamentalmente, por la evapotranspiración.

El cálculo del balance hídrico climático fue planteado inicialmente por Thornthwaite (1948), y se basa en la siguiente expresión:

$$B_n = B_{n-1} + P_n - ETP_n$$

Donde B es el balance hídrico, P es la precipitación mensual, ETP es la evapotranspiración potencial, n hace referencia al mes correspondiente.

La ETP se ha calculado mediante el método de Hargreaves (Hargreaves *et al.*, 1985; Allen *et al.*, 1998), que la FAO recomienda cuando no se dispone de otro tipo de información que la térmica. En el sector central del valle del Ebro Martínez-Cob (2002) muestra como el método de Hargreaves estima de forma muy adecuada la ETP y se ajusta de forma excelente a los valores obtenidos mediante el método de referencia de Penman-Monteith. La ETP media mensual se calcula de acuerdo a la expresión (Allen *et al.*, 1998):

 $ETP = 0.0023 \cdot R_a \cdot TD^{0.5} (Tm + 17.8)$

Donde R_a es la radiación extraterrestre en mm/día calculada según Allen *et al.* (1998) en función de la latitud y el mes. TD es la diferencia entre temperaturas máximas y mínimas (medias mensuales) en °C. Tm es la temperatura media mensual.

El cálculo se realizó mediante las cartografías obtenidas con la interpolación de temperaturas máximas, mínimas y medias, y mediante cartografías continuas de radiación solar potencial, que fueron obtenidas mediante la utilización de un modelo digital de elevaciones (Pons, 1997). Los resultados se obtuvieron en J m⁻² día⁻¹. Una vez obtenidas las coberturas continuas para cada mes del año en J m⁻² día⁻¹, éstas se convirtieron en mm (Allen *et al.*, 1998): 1 MJm⁻²día⁻¹ = 0.408 mm día⁻¹.

A partir de las cartografías continuas de ETP, y las de precipitación mensual desde enero de 1986 hasta diciembre de 2000, se calculó el balance hídrico climático cada mes en el entorno SIG. El problema de este balance resultante es que de forma crónica en el sector central del valle del Ebro se produce un déficit anual de entre 700 u 800 mm (Cuadrat, 1999). Por ello, la evolución de los balances no es representativa temporalmente, ya que registra un descenso continuo del contenido de agua en el suelo con el tiempo. Para evitar este problema, se ajustaron modelos empíricos de forma precisa a partir de las series temporales de cada píxel de 1×1 km, trabajando con los residuales resultantes en cada caso. La Figura 2 ilustra el proceso en un píxel seleccionado al azar. En la Figura A se muestra la evolución del balance hídrico mensual aplicando la formulación de Thornthwaite. Se aprecia el descenso progresivo conforme avanzan los meses de la serie, de tal forma que al llegar a diciembre del año 2000 existe un déficit desde 1986 de casi 12000 mm. Para evitar este problema se ajustó un modelo de regresión, en cada uno de los píxeles del área de estudio, entre el balance hídrico y la serie temporal en meses. En todos los casos los modelos fueron significativos p < 0.001. Mediante el cálculo de los residuales se obtuvo una visión real y relativa del balance hídrico en cada uno de los meses. En la Figura B se aprecian los diferentes ciclos anuales, con máximos en la reserva de agua en invierno y mínimos en agosto, y se pueden reconocer los periodos más deficitarios o excedentarios en el píxel considerado. En este caso los veranos de 1994 a 1996.



Figura 2. Modelo de balance hídrico para un píxel concreto en función del timpo (A). En la Figura B se muestran los residuales resultantes del modelo obtenido, que se pueden considerar como el balance hídrico real respecto a unas condiciones medias.

El resultado de todo este proceso metodológico fueron 168 cartografías continuas (una para cada mes entre enero de 1987 y diciembre de 2000) de precipitaciones, temperaturas medias, ETP y balance hídrico, con una resolución espacial de 1×1 km, cuya extensión superficial coincide con la de la serie de imágenes de satélite utilizadas. Finalmente se obtuvieron series estacionales en cada píxel, invierno (DEF), primavera (MAM), verano (JJA) y otoño (SON).

Obtención de la serie de NDVI

Gracias a las propiedades reflectivas de la vegetación en las regiones espectrales del visible e infrarrojo cercano se puede realizar un seguimiento temporal de la cubierta vegetal. Para ello, se suele resumir la información recogida en ambas bandas espectrales por medio de los llamados índices de vegetación (Gilabert *et al.*, 1997). El índice más extendido y utilizado, debido a su sencillez y a que demanda una escasa información espectrales, es el índice de vegetación normalizado (NDVI), cuya formulación es:

$$NDVI = \frac{\rho_{IRC} - \rho_R}{\rho_{IRC} + \rho_R}$$

Siendo, $\rho_{\rm IRC}$ la reflectividad en la región espectral del infrarrojo cercano y $r_{\rm R}$ la reflectividad espectral en la región espectral del rojo. Numerosos autores han puesto de manifiesto la estrecha relación existente entre el NDVI y algunos parámetros ecológicos, como el índice de área foliar (Baret y Guyot, 1991; Carlson y Ripley, 1997), la cantidad de biomasa vegetal producida (Tucker *et al*, 1981 y 1983; Gutman, 1991; Cihlar *et al.*, 1991) o la proporción de superficie vegetal (Gillies *et al.*, 1997, Duncan *et al.*, 1993).

El análisis temporal de la vegetación por medio del NDVI puede realizarse mediante diferentes imágenes de satélite, pero debido a su mayor frecuencia temporal y a su reducido coste, la mayoría de estudios centrados en el análisis de la dinámica vegetal y en el impacto del clima han utilizado imágenes de los satélites NOAA-AVHRR.

No obstante, el uso de las imágenes NOAA-AVHRR no está exento de problemas relacionados con la degradación de la órbita a lo largo del tiempo y por el deterioro del sensor AVHRR, lo que supone que las series resultantes presenten algunas tendencias temporales artificiales (Kogan y Zhu, 2001). La serie de NDVI utilizada en este trabajo ha sido desarrollada por el Laboratorio de Teledetección de la Universidad de Valladolid (LATUV), que dispone de una antena receptora HRPT-NOAA y una serie de índices de vegetación de toda la Península Ibérica a una resolución espacial de 1 km², desde el año 1987. El proceso de elaboración de las imágenes de NDVI en el LATUV tiene en cuenta todos los problemas que presentan las imágenes NOAA-AVHRR. La calibración de los satélites NOAA-9 v NOAA-11 se realizó de acuerdo a Kaufman y Holben (1993), mientras que para el NOAA-14, dada la degradación sufrida por el sensor AVHRR portado por este satélite, se utiliza una ecuación que varía dichos coeficientes (Rao y Chen, 1999; NOAA, 2003). Para la corrección atmosférica se utiliza un modelo operativo basado en el código 5S (Tanré et al., 1990) con algunas transformaciones e introduciendo varios parámetros atmosféricos (Illera et al., 1997). Una vez generado el NDVI, éste se corrige geométricamente mediante un método mixto basado en un modelo orbital y puntos de control (Illera et al., 1996). Finalmente se generan los compuestos mensuales de NDVI para evitar errores residuales según el método propuesto por Holben (1986).

La serie de NDVI construida por el LATUV ha sido testada y ampliamente utilizada para diferentes objetivos en la Península Ibérica: identificación de áreas afectadas por sequía (González-Alonso *et al.*, 1995, 2000 y 2001), determinación de la productividad vegetal y el seguimiento de la vegetación natural (Vázquez *et al.*, 2001), o el riesgo de incendios (Illera *et al.*, 1996b; Calle *et al.*, 2000).

En la serie utilizada (1987-2000) se planteó un problema atmosférico producido por la erupción, en 1991, del monte Pinatubo, lo que supuso un importante incremento del nivel de aerosoles en la atmósfera, reduciendo la fiabilidad de las series de NDVI durante un periodo de alrededor de un año a nivel global a pesar de la aplicación de coeficientes de calibración adecuados (Lucht *et al.*, 2002). Por esta razón, de la serie de datos disponibles se eliminaron los meses comprendidos entre septiembre de 1991 y mayo de 1992, momento en el que la proporción de aerosoles en la atmósfera vuelve a estabilizarse. Esto supuso una pérdida de información para los posteriores análisis.

Las series mensuales de cada píxel fueron convertidas en series estacionales mediante la suma de los valores de NDVI. Los análisis finales consistieron en análisis de correlación píxel por píxel a partir de las series estacionales de NDVI y de los diferentes parámetros climáticos, considerando también las diferencias en función de los usos y cubiertas del suelo mediante la base *CORINE-Land cover*. El nivel de significación se fijó en p < 0.05.

RESULTADOS

En la Figura 3 se muestra la distribución espacial de las correlaciones entre el NDVI y los promedios de las variables climáticas en primavera. Las correlaciones entre los valores de precipitación y los de NDVI muestran patrones espaciales diferenciados, con correlaciones positivas en la mayor parte del área de estudio y significativas en amplias áreas del sector central del valle. Sin embargo, en una extensa área se registran correlaciones negativas entre el NDVI y las precipitaciones. Más extensa es el área afectada por las diferencias interanuales en los valores de balance hídrico del suelo, con correlaciones significativas en amplias áreas, tanto del norte, centro y sur del sector central del valle del Ebro. En cambio, en el caso de la ETP predominan las correlaciones negativas, y únicamente en el sector más meridional se registran valores positivos estadísticamente significativos.

Las precipitaciones estivales no tienen una influencia clara sobre la dinámica interanual del NDVI durante el verano. Únicamente se registran correlaciones estadísticamente significativas en algunas áreas del sector más occidental, donde predomina la vegetación herbácea y arbustiva (Figura 4). Frente a ello, la correlación entre el NDVI estival y los valores promedio de balance hídrico del suelo durante esta estación es significativa en la mayor parte del área de estudio, con correlaciones positivas superiores a 0.8. El verano es la estación del año en la que de forma natural se registran acusadas condiciones de déficit hídrico en el sector central del valle del Ebro. Por ello resulta lógica esta mayor dependencia respecto al agua que se haya acumulado en los meses anteriores, ya que los veranos con mayores reservas permitirán un adecuado desarrollo y actividad vegetal. En el caso de la correlación entre el NDVI y la ETP medios en verano, se comprueba que existen significativas relaciones negativas en amplios espacios, donde unas elevadas tasas de ETP acentuarán las condiciones de estrés hídrico y limitarán el desarrollo de la vegetación. No obstante, en este caso tampoco se puede realizar una generalización espacial, ya que en aquellos espacios de mayor elevación (Prepirineo al norte y puertos de Beceite al sur), se registran correlaciones positivas. Este comportamiento puede deberse a las más bajas condiciones térmicas que registran de forma promedio estos espacios y a las mayores disponibilidades de agua respecto al resto, lo que daría lugar a que superiores tasas de ETP faciliten la actividad vegetal.



Figura 3. Correlación píxel a píxel entre las series temporales del NDVI primaveral y las de ETP, precipitaciones y balance hídrico. El valor de R estadísticamente significativo, para un nivel de p < 0.05, se fija en 0.55.



Figura 4. Correlación píxel a píxel entre las series temporales del NDVI integrado estival y las de ETP, precipitaciones y balance hídrico del suelo. El valor de R estadísticamente significativo, para un nivel de p < 0.05, se fija en 0.55.

En otoño (Figura 5), el NDVI no se encuentra influido por las precipitaciones que se registran durante esos meses y sí, en mayor medida, por el agua que permanece acumulada en el suelo o por los valores medios de ETP. Un adelantamiento de las condiciones frías terminará con los ciclos vegetativos de determinadas especies anuales, disminuirá la actividad en los regadíos, terminará con la actividad de los bosques de frondosas y ralentizará la de las coníferas, por lo que las bajas tasas de ETP (asociadas a bajas temperaturas) en otoño darán lugar a una menor actividad vegetal; al contrario de lo que sucedía en los meses estivales, donde las correlaciones con la ETP resultaban ser eminentemente negativas en amplios espacios del sector central del valle del Ebro.



*Figura 5. Correlación píxel a píxel entre las series temporales del NDVI otoñal y las de ETP, precipitaciones y balance hídrico del suelo. El valor de r estadísticamente significativo, para un nivel de p < 0.05, se fija en 0.55.

Finalmente, en invierno se refuerza el peso de la ETP dentro de la explicación de las diferencias interanuales en el NDVI (Figura 6). Mientras la influencia de las precipitaciones invernales sobre el NDVI en esta estación se reduce a determinadas áreas de regadíos; y los balances hídricos influyen de forma positiva y significativa únicamente en las áreas de bosques de coníferas que siguen activos durante esta estación, la influencia de la ETP sobre la actividad vegetal invernal comprende amplias áreas del sector meridional, donde altos valores de ETP favorecerán la actividad vegetal invernal en todo este espacio.



Figura 6. Correlación píxel a píxel entre las series temporales del NDVI invernal y las de ETP, precipitaciones y balance hídrico del suelo. El valor de r estadísticamente significativo, para un nivel de p < 0.05, se fija en 0.55.

El análisis estacional considerando los principales usos del suelo del área de estudio matiza los resultados. Respecto a los resultados del análisis de correlación entre los valores de precipitación y los de NDVI promedio en cada uno de los diferentes usos del suelo, las correlaciones más altas se registran en primavera y verano, aunque en ningún caso son significativas estadísticamente

En la Tabla 1 se muestran estas correlaciones con relación al balance hídrico del suelo. En este caso sí que se registran significativas correlaciones en primavera y verano (mucho más robustas en este último caso), mientras que en otoño e invierno el peso de las condiciones del balance hídrico del suelo sobre la actividad vegetal es muy inferior.

Respecto a la correlación entre los valores de ETP y los de NDVI estacionales en las diferentes cubiertas, únicamente se registran correlaciones positivas y significativas en el caso de los bosques de coníferas durante la estación invernal (R = 0.51,

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

	primavera	Verano	Otoño	Invierno
Secanos (herbáceas)	0.37	0.75**	0.36	0.03
Secano (permanentes)	0.50	0.72**	0.30	0.05
Regadios	0.64*	0.74**	0.17	0.15
Frondosas	0.66*	0.69**	0.33	0.52
Coniferas	0.66*	0.77**	0.36	0.44
Matorrales	0.56*	0.76**	0.34	0.30

Tabla 1. Correlación entre los valores estacionales de NDVI y los de balance hídrico en las diferentes estaciones del año. Los análisis se realizan a partir de la agregación de la totalidad de los píxeles de cada una de las cubiertas del suelo. * correlación significativa (p < 0.05), ** correlación significativa (p < 0.01).

p < 0.05). El resto de los usos y cubiertas del suelo no presentan una correlación significativa entre la ETP y los valores de NDVI en ninguna de las estaciones. No obstante, se puede señalar que en primavera y verano predominan valores negativos de correlación, mientras que en invierno y otoño, a pesar de no resultar significativas, las correlaciones son altas, y en todos los casos positivas. Ello es indicativo de que todas las formaciones vegetales del área de estudio se verán favorecidas por altos valores térmicos durante estas estaciones del año, mientras que superiores valores térmicos tendrán un peso negativo en primavera y verano, al incrementarse las demandas hídricas por parte de la vegetación.

En la Figura 7 se muestra una clasificación estacional del área de estudio de acuerdo a las variables climáticas que condicionan en mayor medida la variabilidad interanual del NDVI. En primavera se produce una importante fragmentación espacial de acuerdo a la influencia de los factores climáticos en el desarrollo de la vegetación. No obstante, predomina la influencia del balance hídrico y de las precipitaciones en sectores más concretos, aunque las correlaciones no son significativas en la mayor parte del área analizada.

En verano, en cambio, se produce un control general de la variabilidad interanual de la vegetación por parte de los valores del balance hídrico del suelo, con la excepción de las amplias áreas de regadío. Los espacios en los que las correlaciones no resultan significativas son escasos, y suelen corresponderse con sectores de cultivos de regadío que reciben agua de forma artificial y en los que, por lo tanto, las condiciones hídricas tendrán un peso inferior. En otoño e invierno, sin embargo, la influencia de las variables climáticas se reduce espacialmente de forma signifi-



Figura 7. Clasificación del área de estudio de acuerdo a las variables climáticas que más influyen sobre los valores estacionales de NDVI. Sólo se han considerado aquellos píxeles en los que existen correlaciones significativas (p < 0.05). Los espacios en blanco no muestran asociación con ninguna de las variables consideradas.

cativa, perdiendo peso las precipitaciones y las condiciones de balance hídrico del suelo y ganándolo los valores de ETP, sobre todo en el sector más meridional del área de estudio.

Con relación al porcentaje de superficie de los diferentes usos del suelo en los que las distintas variables climáticas presentan una correlación significativa con las diferencias interanuales de NDVI, hay que destacar que en primavera dominan las áreas en las que no se registran correlaciones significativas, aunque importantes porcentajes de los bosques de frondosas y coníferas responden claramente a las condiciones del balance hídrico del suelo.

En verano, en cambio, predomina la influencia de las condiciones de humedad expresadas por el balance hídrico del suelo en todos los usos, aunque en mayor medida en los cultivos de secano (herbáceas y permanentes) y en las áreas de matorrales y pastizales (Tabla 2). Las áreas boscosas presentan una menor respuesta, ya que en su mayoría se ubican en los sectores que reciben mayores precipitaciones, por lo que los déficits absolutos serán, en realidad, inferiores.

Usos del suelo	No significativo	Precipitación	ETP	Balance H.
Cultivos de secano (herbáceas)	10.06%	0.73%	0.22%	89.00%
Cultivos de secano (permanentes)	4.73%	4.05%	2.70%	88.51%
Cultivos de regadio	25.39%	0.24%	3.40%	70.98%
Bosques de frondosas	21.86%	0.00%	3.29%	74.85%
Bosques de coníferas	18.43%	0.27%	3.06%	78.24%
Matorrales y pastizales	14.55%	0.19%	0.77%	84.50%
Total general	16.54%	0.39%	1.59%	81.47%

Tabla 2. Porcentaje de superficie ocupada por las diferentes cubiertas del suelo en las que los mayores valores de correlación significativa corresponden con alguna de las variables climáticas consideradas durante el verano.

Las áreas de secano ya se encuentran cosechadas en esta estación, y el desarrollo de especies herbáceas naturales, tras la recolección, dependerá de las condiciones acumuladas de humedad del suelo (Braun-Blanquet y Bolós, 1957), ya que tanto estas especies, como las que ocupan las áreas de matorrales y pastizales naturales, presentan sistemas radiculares poco desarrollados y su actividad dependerá en gran medida de la humedad que conserve el suelo. Los espacios boscosos o los cultivos de regadío, en este caso gracias a los aportes mediante riego, muestran un menor porcentaje de superficie afectada por las condiciones de humedad del suelo que el resto de los usos.

En otoño desciende la superficie en la que los factores climáticos tienen un peso significativo. Sin embargo, la influencia de la ETP aumenta en las áreas de bosques, tanto de frondosas como de coníferas, ya que condiciones térmicas más suaves aumentarán el periodo vegetativo de, por ejemplo, los robledales que se ubican en los puertos de Beceite o en el sector prepirenaico. Dado que las condiciones de humedad del suelo durante esta estación son superiores a las estivales, la actividad de los bosques se verá favorecida.

Finalmente, en invierno aumenta la superficie, respecto al otoño, de las diferentes cubiertas del suelo en las que la influencia de los diferentes factores climáticos es significativa. No obstante, el área en la que se registran correlaciones significativas es superior en las áreas de vegetación natural que en los espacios cultivados, aunque en todos los casos (excepto en las áreas de cultivos de regadío, donde es la precipitación la variable con la que se registra una mayor superficie de correlación significativa), aumenta el peso de la ETP.

DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES

En este trabajo se ha mostrado que la influencia de diferentes variables climáticas (precipitación, temperatura, ETP y balance hídrico) sobre el NDVI presenta notables diferencias estacionales y también en función de las diferentes cubiertas y usos del suelo. No obstante, se ha comprobado que en una región de marcadas características semiáridas son las condiciones hídricas del suelo y, fundamentalmente, en las estaciones más cálidas como son la primavera y el verano, el factor que explica, en mayor medida, las diferencias anuales en el NDVI. En todos los casos las precipitaciones que se registran durante la propia estación tienen un peso inferior sobre los diferentes usos del suelo que los valores de balance hídrico, los cuales registran las condiciones de humedad acumuladas durante periodos de tiempo más amplios y reflejan en mejor medida que las precipitaciones los contenidos reales de agua en el suelo.

La producción vegetal está, pues, más íntimamente relacionada con las condiciones de humedad del suelo que con las precipitaciones que se registran en una estación del año determinada. Ello, no obstante, resulta lógico en las áreas mediterráneas, pues un importante porcentaje de las precipitaciones se registra durante la estación fría, lo que supone que la relación precipitación-producción resulte diferente a la de las áreas en las que las precipitaciones se producen durante los periodos de más altas temperaturas. Este aspecto dificulta el análisis de la influencia de las precipitaciones sobre la actividad vegetal, y explica que no sean las precipitaciones que se reciben en una estación, sino la acumulación de agua en el suelo, a lo largo de amplios periodos de tiempo, la que explique, en mayor medida, las diferencias temporales en el NDVI. En este sentido, diferentes estudios de campo realizados en el sector central del valle del Ebro han probado que las producciones de los cultivos responden, en mayor medida, a las precipitaciones que se registran entre noviembre y abril, que producirán la recarga de agua aprovechable en los momentos de menores precipitaciones (Austin et al. 1998; McAneney y Arrúe, 1993).

Así pues, en la influencia del clima sobre la vegetación en las regiones semiáridas puede existir un posible retardo en la respuesta vegetal, debido a que el suelo tiene una cierta capacidad de retención de agua y la vegetación puede hacer uso de ella tiempo después de las precipitaciones. Las plantas presentan una gran capacidad para limitar la transpiración por medio del control de los estomas, y porque las raíces pueden tener acceso a la humedad que se encuentra a mayor profundidad. Por ello, un descenso en la disponibilidad de agua puede no traducirse directamente en un descenso del NDVI. Este aspecto puede explicar el bajo peso de las precipitaciones en la explicación de la actividad vegetal en las diferentes estaciones.

En general, diferentes estudios señalan que suelen registrarse correlaciones más altas entre el NDVI y los valores de precipitación acumulada durante diferentes meses. Numerosos trabajos muestran que la vegetación no sólo responde a las condiciones climáticas de las estaciones o periodos de crecimiento vegetal, sino que en muchas ocasiones se puede producir un retardo, e incluso una importante influencia de las condiciones climáticas que se registraron en el anterior periodo de crecimiento vegetativo (Richard y Poccard, 1998; Justice et al., 1986; Davenport y Nicholson, 1993). Por ejemplo, Wang et al. (2003) señalaron que la producción vegetal de los cultivos herbáceos de secano y de los pastizales en las llanuras centrales de EE.UU. está condicionada por las precipitaciones, pero no sólo por las recibidas durante el periodo de crecimiento anual, sino también por las que se reciben durante el año anterior. Este aspecto puede explicar las mayores correlaciones obtenidas en el sector central del valle del Ebro con los valores de humedad del suelo, ya que la respuesta de estos balances ante las precipitaciones, o las condiciones térmicas de un mes concreto, es escasa.

Además, el momento en que se produce y la intensidad con la que ha caído la precipitación es crítico en la determinación de la utilidad de las precipitaciones para la producción vegetal en ámbitos semiáridos. Justice e Hiernaux (1986) identificaron 2 eventos de precipitación que representan un importante papel en el desarrollo de la vegetación anual. El primero son las precipitaciones que aportan la humedad suficiente para permitir la germinación y las primeras fases de crecimiento vegetal. El segundo es el inicio de las precipitaciones regulares que permiten un desarrollo vegetal continuo sin interrupción y corresponde con el periodo de crecimiento, floración y fructificación. Esto da idea de las condiciones de estrés hídrico en ambas fases, que pueden afectar de forma diferenciada a las condiciones vegetales.

En general, los principales factores identificados en el control de la producción vegetal incluyen la suma total de precipitaciones y el periodo de tiempo en que se producen las mismas, las cuales controlan la disponibilidad de humedad en el suelo que determina las diferentes fases fenológicas en el ciclo de las plantas anuales. Otros factores que no se han tenido en cuenta, como la escorrentía superficial, que pudiera producirse en los eventos de mayor intensidad en el centro del valle, o la infiltración de los suelos, podrían alterar las relaciones NDVI-clima. Pero incluso otro tipo de factores relacionados con las prácticas antrópicas podrían llegar a explicar, por ejemplo, la diferenciación espacial que se ha comprobado dentro de las áreas de cultivos de secano. Lampurlanés et al. (2001) indican que la infiltración de agua en los campos de secano del sector central del valle del Ebro varía significativamente en función de los sistemas de laboreo. Igualmente, las heladas tardías de primavera suelen tener unos muy negativos efectos sobre los cultivos, sobre todo en las áreas de regadíos (Martí, 1993; Hernández, 1992), por lo que es de esperar que no todos los espacios muestren una variabilidad vegetal explicada por los factores considerados.

Junto a todos estos factores también hay que tener en cuenta la diversidad fisiológica de las diferentes cubiertas vegetales. Debemos ser cuidadosos al interpretar los resultados de las comparaciones entre los datos de satélite y los datos pluviométricos debido a la variabilidad que se produce en la eficacia en el uso del agua disponible por parte de la vegetación. Tucker y Choudhury (1987) indican valores con un rango de 0.5 kg/ha/mm/año en especies subdesérticas, entre 3 y 6 kg/ha/mm/año para espacios semiáridos, y unos 30 kg/ha/mm/año en campos de cultivo en áreas fértiles y con elevada gestión humana.

Y a todo ello hay que añadir que las diferencias estacionales en la dinámica vegetal y climática todavía añaden complejidad a los análisis. Por ejemplo, el papel de las precipitaciones y las condiciones hídricas del suelo varían según las condiciones térmicas. En primavera y verano las condiciones hídricas tendrán más importancia que en invierno, estación en la que debido a las bajas temperaturas la actividad vegetal es muy baja. El papel de las temperaturas y, por consiguiente, de la ETP, será también diferenciado en función de las fases fenológicas en las que se encuentra la vegetación. En invierno, valores térmicos altos favorecerán el desarrollo vegetal y potenciarán la actividad vegetativa de las plantas. Sin embargo, en verano, unas elevadas temperaturas propiciarán un incremento del riesgo de estrés hídrico y, por lo tanto, un descenso de los valores de NDVI, ya que la disponibilidad de agua será crucial.

Así pues, además de la diferenciación entre cubiertas del suelo, en cuanto a la determinación de la influencia de las variables climáticas sobre el NDVI, hay que señalar que existe una diferenciación entre ámbitos climáticos más o menos áridos. Independientemente de las cubiertas de suelo existentes, en las áreas que se reciben mayores precipitaciones la variabilidad de las curvas de NDVI será inferior y menor será la respuesta a las condiciones que indique el balance hídrico del suelo. En cambio, en las áreas que de forma "crónica" muestran mayores déficits hídricos la dependencia respecto a las condiciones de humedad del suelo es muy superior, tanto en las áreas de cultivos de secano, matorrales y pastizales, como en los bosques de coníferas. El agua es, pues, el principal limitante que condiciona en mayor medida dicha actividad vegetal, ya que los cultivos de regadío, aunque se encuentren en dicho sector árido, al recibir aportes de agua en riego, reducen en mayor medida su dependencia ante el balance hídrico climático.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo ha contado con el apoyo de los proyectos de investigación: "Caracterización espaciotemporal de las sequías en el valle medio del Ebro e identificación de sus impactos" (BSO2002-02743), "Variabilidad climática y dinámica forestal en ecosistemas de ecotono" (REN2003-07453) financiados por la CICYT y FEDER, y el Programa de grupos de investigación consolidados (grupo Clima, Cambio Global y Sistemas Naturales, BOA 147 of 18-12-2002), financiado por el Gobierno de Aragón. La investigación del primer autor fue apoyada por una beca postdoctoral del Ministerio de Educación, Cultura y Deporte.

BIBLIOGRAFÍA

ALLEN, R.G., PEREIRA, L.S., RAES, D. y SMITH, M. 1998. *Crop evapotranspiration: guidelines for computing crop requeriments*. Irrigation and drainage paper 56. FAO. Roma. Italia.

- AUSTIN, R.B., CANTERO-MARTÍNEZ, C., ARRÚE, J.L., PLAYÁN, E. y CANO-MARCE-LLÁN, P. 1998. Yield-rainfall relationships in cereal cropping systems in the Ebro river valley of Spain. *European Journal of Agronomy.* 8: 239-248.
- BARET, F. y GUYOT, G. 1991. Potentials and limits of vegetation indices for LAI and APAR assessment. *Remote Sensing of Environment.* 35: 161-173.
- BRAUN-BLANQUET, J. y BOLÓS, O. 1957. Les groupements vegetaux du bassin de l'Ebre. *Anales de la Estación Experimental de Aula Dei*. 5: 1-4.
- CALLE, A., CASANOVA, J.L., ROMO, A. y GONZÁLEZ-ALONSO, F. 2000. An operational system for the forest fire risk assessment by means of NOAA images. Pp 363-368 en J.L. Casanova (ed.) *Remote Sensing in the 21st Century: economic and environmental applications*. Balkema. Rotterdam.
- CARLSON, T.N. y RIPLEY, D.A. 1997. On the relation between NDVI, fractional vegetation cover, and leaf area index. *Remote Sensing of Environment*. 62: 241-252.
- CUADRAT, J.M. 1999. *El clima de Aragón*. Cai 100. 109 pp. Zaragoza.
- DAVENPORT, M.L. y NICHOLSON, S.E. 1993. On the relation between rainfall and the normalized difference vegetation index for diverse vegetation types in east Africa. *International Journal of Remote Sensing*. 14: 2369-2389.
- DUNCAN, J., STOW, D., FANKLIN, J. y HOPE, J. 1993. Assessing the relationship between spectral vegetation indices and shrub cover in the Jornada Basin, New Mexico. *International Journal of Remote Sensing*. 14: 3395-3416.
- FARRAR, T.J., NICHOLSON, S.E. y LARE, A.R., 1994. The influence of soil type on the relationships between NDVI, rainfall and soil moisture in semiarid Botswana II: NDVI response to soil moisture. *Remote Sensing of Environment.* 50: 121-133.
- FRUTOS, L.M. 1976. Estudio geográfico del campo de Zaragoza. CSIC. 342 pp.
- GILABERT, M.A., GONZÁLEZ-PIQUERAS, J. y GARCÍA-HARO, J. 1997. Acerca de los índices de vegetación. *Revista de Teledetección*. 8: 35-45.
- GILLIES, R.R., CARLSON, T.N., CUI, J., KUS-TAS, W.P. y HUMES, K.S. 1997. A verification of the triangle method for obtaining surface soil water content and energy fluxes from remote measurements of the Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) and surface radiant

temperature. International Journal of Remote Sensing. 18: 3145-3166.

- GONZÁLEZ-ALONSO, F., CUEVAS, J.M., CASANOVA, J.M., CALLE, A. e ILLERA, P. 1995. Drought monitoring in Spain using satellite remote sensing. In *Sensors and environmental applications of remote sensing* (Askne. Ed). Balkema. Rotterdam. 88-90.
- GONZÁLEZ-ALONSO, F., VÁZQUEZ, A., CUE-VAS, J.M., CALLE, A. y CASANOVA, J.L., 2000. Towards an operational monitoring of drought conditions in Spain using satellite images. En remote sensing in the 21st century: economic and environmental applications. (Casanova, J.L. Ed.). Balkema. Rotterdam: 403-405.
- GONZÁLEZ-ALONSO, F., CALLE, A., VÁZ-QUEZ, A., CASANOVA, J.L., CUEVAS, J.M. y ROMO, A. 2001. Seguimiento de la sequía en España, en el año 2000, mediante técnicas de teledetección espacial. En *Teledetección, Medio Ambiente y Cambio Global*. (J.I. Rosell y J.A. Martínez-Casasnovas Eds.). 83-85.
- GUTMAN, G.G. 1991. Vegetation indices from AVHRR. An update and future prospects. *Remote Sensing of Environment.* 35: 121-136.
- HARGREAVES, G.L., HARGREAVES, G.H. y RILEY, J.P. 1985. Irrigation water requirements for Senegal river basin. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*. 111: 265-275.
- HELLDEN, U. y EKLUNDH, L. 1988. National drought impact monitoring a NOAA-NDVI and precipitation data study of Ethiopia. Lund Studies in Geography, 15. Lund University Press.
- HERNÁNDEZ, M.L. 1992. *Climatología agrícola del valle medio del río Ebro*. Tesis Doctoral. Departamento de Geografía y Ordenación del Territorio. Universidad de Zaragoza.
- HOLBEN, B. 1986. Characteristics of maximum value composite images from temporal AVHRR data. *International Journal of Remote Sensing*. 6: 1271-1328.
- HOUGHTON, J.T., DING, Y., GIGGS, D., NOGUET, M., VAN DEL LINDEN, P., DAI, X., MASKELL, A. y JOHNSON, C.A. 2001. *Climate Change 2001: The scientific Basis.* Eds. Cambridge University Press. Cambridge.
- HUTCHISON, C.F. 1991. Uses of satellite data for famine early warning in sub-saharian Africa. *International Journal of Remote Sensing.* 12: 1405-1421.
- ICHII, K., KAWABATA, A. y YAMAGUCHI, Y. 2002. Global correlation analysis for NDVI and

climatic variables and NDVI trends: 1982-1990. International Journal of Remote Sensing. 23: 3873-3878.

- ILLERA, P., DELGADO, J.A. y CALLE, A. 1996. A navigation algorithm for satellite images. *International Journal of Remote Sensing*. 17: 577-588.
- ILLERA, P., FERNÁNDEZ, A. y DELGADO J. 1996b. Temporal evolution of the NDVI as an indicator of forest fire danger. *International Journal of Remote Sensing*. 17: 1093-1105.
- ILLERA, P. EL-KAOURI, A. y VEGAS, A. 1997. Influencia de las condiciones atmosféricas sobre el NDVI-AVHRR. En *Teledetección. Usos y aplicaciones*. Universidad de Valladolid: 415-422.
- JUSTICE, C.O. e HIERNAUX, P.H.Y. 1986. Monitoring the grasslands of the Sahel using NOAA-AVHRR data. Niger, 1983. *International Journal of Remote Sensing*. 7: 1475-1497.
- JUSTICE, C.O., HOLBEN, B.N. y GWYNNE, M.D. 1986. Monitoring East African vegetation using AVHRR data. *International Journal of Remote Sensing*. 7: 1453-1474.
- KAUFMAN, Y.J. y HOLBEN, B.N. 1993. Calibration of the AVHRR visible and near-IR bands by atmospheric scattering, ocean glint, and desert reflection. *International Journal of Remote Sensing.* 14: 21-52.
- KERR, Y.H., IMBERNON, J., DEDIEN, G., HAN-TECOEUR, O., LAGONARDE, P. y SEGUIN, B. 1989. NOAA-AVHRR and its uses for rainfall and evapotranspiration monitoring. *International Journal of Remote Sensing*. 10: 847-854.
- KOGAN, F.N. y ZHU, X. (2001): Evolution of long-term errors in NDVI time series: 1985-1999. *Advances in Space Research.* 28: 149-153.
- LAMPURLANÉS, J., ANGÁS, P. y CANTERO-MARTÍNEZ, C. 2001. Root growth, soil water content and yield of barley under different tillage systems on two soils in semiarid conditions. *Field Crop Research.* 69: 27-40.
- LAVOREL, S., CANADELL, J., RAMBAL, S. y TERRADAS, J. 1998. Mediterranean terrestrial ecosystems: research priorities on global change effect. *Global Ecology and Biogeography Letters*. 7: 157-166.
- LE HOUEROU, H.N. 1984. Rain use efficiency: a nifying concept in arid-land ecology. *Journal of Arid Environments.* 7: 1-12.
- LUCHT, W., PRENTICE, I.C., MYNENI, R.B., SITCH, S., FRIEDLINGSTEIN, P., CRAMER, W., BOUSQUET, P., BUERMANN, W. y

SMITH, B. 2002. Climatic control of the highlatitude vegetation greening trend and Pinatubo effect. *Science*. 296: 1687-1689.

- MALO, A.R. y NICHOLSON, S.E. 1990. A study of rainfall and vegetation dynamics in the African sahel using Normalized Differenced Vegetation Index. *Journal of Arid Environments*. 19: 1-24.
- MARTÍ, A. 1993. Cálculo de adversidades climáticas para los cultivos: los cereales de verano en Monegros. *Geographicalia*. 30: 259-270.
- MARTÍNEZ-COB, A. 2002. Infraestimación de la evapotranspiración potencial con el método de Thornthwaite en climas semiáridos. En *la información climática como herramienta de gestión ambiental.* (J.M. Cuadrat, S.M. Vicente y M.A. Saz). Universidad de Zaragoza: 117-122.
- McANENEY, K.J. y ARRÚE, J.L. 1993. A wheatfallow rotation in northeastern Spain: water balance-yield considerations. *Agronomie*. 13: 481-490.
- MILICH, L. y WEISS, E. 2000. GAC-NDVI images: relationship to rainfall and potential evaporation in the grazing lands of the Gourma (northern Sahel) and in the croplands of the Niger-Nigeria border (southern Sahel). *International Journal of Remote Sensing*. 21: 261-280.
- MILLINGTON, A.C., WELLENS, J., SETTLE, J.J. y SAULL, R.J. 1994. Explaining and monitoring land cover dynamics in drylands using multitemporal analysis of NOAA-AVHRR imagery. En (Foody G.H. y Curran, P.J. Eds.) *Environmental remote sensing from regional to global scales.* Jhon Wiley & Sons: 16-43.
- NARASIMHA RAO, R.V., VENKATARATUAM, L., KRISHNA, P.V. y RAMANA, K.V. 1993. Relation between root zone soil moisture and normalized difference vegetation index of vegetated fields. *International Journal of Remote Sensing.* 14: 441-449.
- NOAA. 2003b. NOAA-14 calibration information as of 31 July 1995 Amendments to NOAA Technical Memorandum 107 Appendix-B for NOAA-J/14.http://noaasis.noaa.gov/NOAASIS/ml/cal14 _1.html
- PONS, X. 1997. Estimación de la radiación solar a partir de modelos digitales de elevaciones. Propuesta metodológica. En VII Coloquio de Geografía Cuantitativa, Sistemas de Información Geográfica y Teledetección. (J. Juriasti y I. Moro, Eds.). Vitoria-Gasteiz: 87-97.
- POTTER, C.S. y BROOKS, V. 1998. Global analysis of empirical relations between annual climate and seasonality of NDVI. *International Journal of Remote Sensing*. 19: 2921-2948.

- RAO, C.R.N. y CHEN, J. 1999. Revised postlaunch calibration of the visible and near-infrared channels of the advanced very high resolution radiometer on the NOAA-14 spacecraft. *International Journal of Remote Sensing*. 20: 3485-3491.
- RICHARD, Y. y POCCARD, I. 1998. A statistical study of NDVI sensitivity to seasonal and interannual rainfall variations in southern Africa. *International Journal of Remote Sensing*. 19: 2907-2920.
- SANTOS, P. y NEGRÍN, A.J. 1997. A comparison of the Normalized Difference Vegetation Index and rainfall for the Amazon and Notheastern Brazil. *Journal of Climate*. 36: 958-965.
- SEEGER, M. 2001. Boden und Bodenwasserhaushalt als Indikatoren der Landdegradierung auf extensivierten Nutzflächen in Aragón/Spanien. Freiburg Inst. f. Phys. Geographie, Albert-Ludwigs-Univ. 184 pp.
- SUÁREZ-CARDONA, F., SAINZ, H., SANTOS, T. y BERNÁLDEZ, F.G. 1992. *Las estepas ibéricas.* Ministerio de Obras públicas y Transportes. Madrid. 160 pp.
- TANRÉ, D., DEROO, C., DUHANT, P. et al., 1990. Description of a computer code to simulate the satellite signal in the solar spectrum: the 5S code. *International Journal of Remote Sensing*. 11: 659-668.
- THORNTHWAITE, C.W. 1948. An approach toward a rational classification of climate. *Geographical Review.* 38: 55-94.
- TOWNSHEND, J.R.G. y JUSTICE, C.O. 1986. Analysis of the dynamics of African vegetation using the normalized difference vegetation index. *International Journal of Remote Sensing*. 7: 1435-1445.
- TUCKER, C.J. y CHOUDHURY, B.J. 1987. Satellite remote sensing of drought conditions. *Remote Sensing of Environment*. 23: 243-251.
- TUCKER, C.J., HOLBEN, B.N., ELGIN, J.H. y McMURTREY, J.E. 1981. Remote Sensing of total dry matter accumulation in winter wheat. *Remote Sensing of Environment*. 11: 171-189.
- TUCKER, C.J., VANPRAET, C., BOERWINKEL, E. y GATON, A. 1983. Satellite remote sensing of total dry matter accummulation in winter wheat. *Remote Sensing of Environment.* 11: 171-189.
- VÁZQUEZ, A., GONZÁLEZ-ALONSO, F., CALLE, A., CUEVAS, J.M. y CASANOVA, J.L., 2001. Producción asegurada de cereales y anomalías en el índice de vegetación en España peninsular: 1995-1998. Pages 37-40 *in* Rosell, J.I. and Martínez-Casasnovas J.A. (eds.) *Telede-*

tección, medioambiente y cambio global. Universidad de Lleida. Lleida.

- VICENTE SERRANO, S.M. 2004. Evolución espacio-temporal de las sequías en el sector central del valle del Ebro: causas y consecuencias ambientales. Universidad de Zaragoza. 1258 pp.
- VICENTE SERRANO, S.M. y BEGUERÍA, S. 2003. Estimating extreme dry-spell risk in the middle Ebro valley (Northeastern Spain): A comparative analysis of partial duration series with a General Pareto distribution and Annual maxima series with a Gumbel distribution. *International Journal of Climatology*. 23: 1103-1118.
- VICENTE-SERRANO, S.M., SAZ, M.A. y CUA-DRAT, J.M. 2003. Comparative analysis of interpolation methods in the middle Ebro valley

(Spain): application to annual precipitation and temperature. *Climate Research.* 24 (2): 161-180.

- VICENTE-SERRANO, S.M. y CUADRAT, J.M. 2005. Trends in drought intensity and variability in the middle Ebro valley (NE Spain) during the second half of the twentieth century. Enviado a *Theoretical and Applied Climatology*.
- WANG, J., RICH, P.M. y PRICE, K.P. 2003. Temporal responses of NDVI to precipitation and temperature in the central Great Plains, USA. *International Journal of Remote Sensing*. 24: 2345-2364.
- YANG, W., YANG, L. y MERCHANT, J.W. 1997. An assessment of AVHRR/NDVI-ecoclimatological relations in Nebrasca, USA. *International Journal of Remote Sensing*. 18: 2161-2180.