

Cuadernos de Investigación Geográfica	2003	Nº 29	pp. 51-66	ISSN 0211-6820
---------------------------------------	------	-------	-----------	----------------

© Universidad de La Rioja

DIFERENCIAS ESPACIALES EN LA EVOLUCIÓN DEL NDVI EN LA CUENCA ALTA DEL ARAGÓN: EFECTOS DE LOS CAMBIOS DE USO DEL SUELO

SERGIO M. VICENTE SERRANO(1)
TEODORO LASANTA(2)(*)
ALFREDO ROMO(3)

(1) Departamento de Geografía y Ordenación del Territorio. Universidad de Zaragoza.

C/ Pedro Cerbuna 12. Ciudad Universitaria. 50009-Zaragoza

(2) Instituto Pirenaico de Ecología (CSIC). Campus de Aula Dei. Apdo. 202. 50015-Zaragoza

(3) Laboratorio de Teledetección. Departamento de Física Aplicada I. Facultad de Ciencias.

Universidad de Valladolid. 47071-Valladolid

(*) fm@ipe.csic.es

RESUMEN: *Se estudia la evolución del Índice de Vegetación Normalizado (NDVI) en el periodo 1993–2000 en la cuenca Alta del Aragón (Pirineo occidental de Aragón) mediante imágenes de satélite NOAA-AVHRR. Se comprueba que una parte importante del territorio muestra una tendencia positiva en los valores de NDVI, si bien se establecen algunos contrastes espaciales. Los valores más altos corresponden a los antiguos campos agrícolas, abandonados a lo largo del siglo XX, seguidos por las áreas de matorral y los pinares (cubiertas derivadas de un proceso de sucesión vegetal tras la extensificación productiva), mientras que el espacio cultivado y los pastos supraforestales (usos que mantienen una utilización más intensiva) poseen los valores más bajos. Estos resultados ponen de relieve el destacado papel de los cambios de uso del suelo en la evolución de la biomasa vegetal.*

ABSTRACT: *The vegetation cover evolution in the central Spanish Pyrenees is analysed from 1993 to 2000. The analysis has been achieved using one NDVI (Normalized Vegetation Index) temporal series obtained from NOAA-AVHRR images. A positive trend in NDVI data has been detected. However, the spatial differences in the magnitude and sign of NDVI trends are significant. An important increment of vegetation biomass is detected in most areas, particularly in those affected by field abandonment and extensive land use (shrublands and pine forests). Cultivated fields and pastures above timberline show a smaller increase in vegetation cover. The results indicate the important role of socio-economic transformations and land-use extensification in the vegetal biomass evolution.*

Palabras clave: NDVI, Usos del suelo, Gestión antrópica, teledetección, montaña, Pirineos.

Keywords: NDVI, land uses, human management, remote sensing, mountainous areas, Pyrenees.

1. Introducción

La actividad vegetal y la producción de biomasa tienen gran trascendencia en procesos medioambientales, destacándose su influencia en el ciclo hidrológico a escalas de ladera y cuenca (Changnon y Demissie, 1996; Aber *et al.*, 1995; Kergoat, 1998; Hutges *et al.*, 1998), en el transporte de sedimento (Kok *et al.*, 1995; García-Ruiz *et al.*, 1995), en la estructura y diversidad paisajística (Kammerbauer y Ardon, 1999; Olson *et al.*, 2000) o en el riesgo de incendios (Chuvienco, 1999).

La cantidad y producción de biomasa tienen estrecha relación con factores ambientales (fertilidad del suelo, condiciones climáticas, relieve,...). Numerosos estudios (Riebsame *et al.*, 1994; Lucht *et al.*, 2002; Myneni *et al.*, 1998; Kawabata *et al.*, 2001; Karl *et al.*, 1994 y 1995; Easterling *et al.*, 1997; Scott *et al.*, 2000) ponen de relieve el incremento reciente de la cubierta vegetal en diferentes ecosistemas del mundo, aduciendo como principal causa el aumento de las temperaturas o de las precipitaciones. También se ha señalado la diferente evolución de la vegetación en función de condiciones topográficas (Florinsky & Kuryakova, 1996), del estadio de sucesión vegetal (Vicente Serrano *et al.*, en prensa), de la gestión humana y los cambios de uso del suelo (Hester *et al.*, 1996; Stohlgren *et al.*, 1998). Este último aspecto adquiere especial relevancia en áreas que han experimentado cambios profundos en la explotación de sus recursos en las últimas décadas, como ocurre en la montaña española y en otras montañas europeas (Lasanta y Ruiz Flaño, 1990).

El Pirineo español se incluye entre las áreas con cambios profundos en los usos del suelo, como consecuencia de la despoblación y abandono de las actividades económicas tradicionales (García-Ruiz y Lasanta, 1990). Durante siglos se utilizó gran parte del territorio con diversos usos del suelo y distinto grado de aprovechamiento, mientras que a lo largo del siglo XX se asiste a la intensificación de los espacios más fértiles (los fondos de valle) y a la marginación de las laderas, que apenas se aprovechan, dando lugar a un intenso proceso de revegetación (García-Ruiz, 1990; Lasanta *et al.*, 2000). El Pirineo constituye, pues, un espacio adecuado para estudiar la influencia de los cambios de gestión en la variabilidad espacial de la producción vegetal. El objetivo de este trabajo es, precisamente, aportar información sobre las tendencias espacio-temporales en la producción de biomasa en un territorio de montaña, aprovechado de forma intensiva en el pasado y de manera muy extensiva en las últimas décadas, en función de las diferentes cubiertas vegetales y de los usos del suelo, para lo que se utilizó el Índice de Vegetación Normalizado.

2. Area de estudio

El trabajo se ha realizado en la cuenca alta del río Aragón, en el Pirineo aragonés (fig. 1). La superficie de la cuenca es de 1758 Km², con un amplio rango de altitudes, de 2.886 m s.n.m. en el Pico Collarada a menos de 500 m s.n.m. en el embalse de Yesa, en la salida de la cuenca.

El relieve y la litología se organizan en bandas paralelas que siguen una dirección NW – SE (Soler y Puigdefábregas, 1972). En la parte septentrional está el Pirineo Axial

de litología paleozoica (calizas, esquistos y arcillas). Inmediatamente al sur están las Sierras Interiores (de calizas y areniscas), donde se alcanzan las mayores altitudes de la cuenca, superando en los picos más elevados (Collarada, Aspes, Sierra Bernera,...) los 2.500 m s.n.m. A continuación aparece una amplia banda de la formación flysch, de relieve alomado, laderas de pendientes moderadas (entre el 20 y el 50% de desnivel) y altitudes comprendidas entre 800 y 2.200 m (García-Ruiz y Puigdefábregas, 1982). El sector más meridional corresponde a la Depresión Interior, de litología margosa, suaves pendientes (inferiores al 20%) y altitudes entre 500 y 900 m s.n.m.

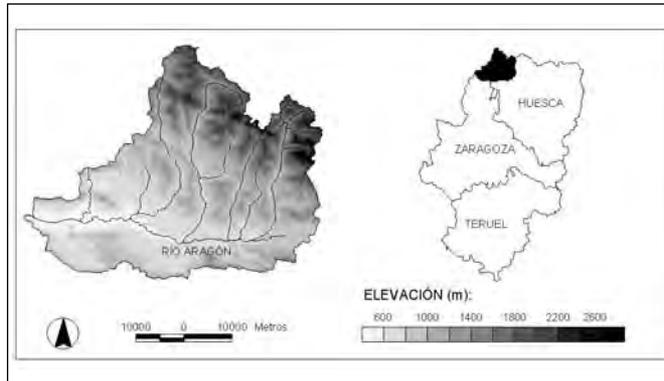


Figura 1: Área de estudio

La cuenca tiene un clima de transición entre las influencias atlánticas (norte y oeste) y mediterráneas (sur y este). En la Depresión Interior las precipitaciones son de 800 mm/año, incrementándose en el resto de la cuenca: por encima de los 1.500 m de altitud superan los 1500 mm. La variabilidad interanual es muy alta. La estación húmeda se extiende de octubre a junio, con un máximo primaveral y otro secundario en otoño. La temperatura media es de 12°C en la Depresión Interior. Durante la estación fría (de noviembre a abril) la isoterma de 0°C se sitúa a 1.549 m s.n.m. (García-Ruiz *et al.*, 1985).

La mayor parte de la cuenca se utilizó en el pasado para aprovechamiento agrícola y ganadero. La Depresión Interior, los fondos de valle de los afluentes del Aragón y las laderas bajas y medias (hasta 1.400 m.s.n.m. de altitud) se cultivaron con cereales. En el nivel subalpino, por encima de los 1.700 m.s.n.m., se desarrollan pastos, que se utilizaban por ovino durante la estación cálida.

La gestión tradicional se basaba en el aprovechamiento integral de los recursos para garantizar la alimentación de la población, en una economía de casi autoabastecimiento y escasos intercambios con el exterior, y de un censo ovino muy elevado. Este hecho implicó importantes transformaciones en el espacio natural, con la roturación de bosques para establecer áreas de cultivo y pastos para el ganado. Los bosques de las laderas bajas fueron deforestados para el cultivo de cereales (Lasanta, 1989), mientras que los localizados a mayor altitud se convirtieron en zonas de pasto para su aprovechamiento estival por el ganado (Montserrat, 1992; García-Ruiz y Valero, 1998; Ferrer, 1988). El bosque natural (robles, pinos y hayas) quedó limitado a una banda entre 1.400 y 1.700 m.s.n.m. y a algunas umbrías más bajas poco aptas para el cultivo (Puigdefábregas, 1981).

El uso del territorio era discriminado en función de la potencialidad productiva y de las limitaciones ambientales de cada tesela, ya que la subsistencia de las explotaciones y del grupo humano en su conjunto dependía del equilibrio entre la explotación y la conservación de los recursos naturales (Puigdefábregas y Fillat, 1986).

A lo largo del siglo XX se producen importantes cambios, como consecuencia de las transformaciones económicas inducidas por el desarrollo de las comunicaciones y por la imposibilidad de competir con las regiones llanas (mejor comunicadas, más próximas a los centros de decisión, con suelos más fértiles y de más fácil mecanización y riego), lo que llevó a la despoblación y extensificación de amplios sectores (García-Ruiz, 1988; García-Ruiz y Lasanta, 1990). El espacio cultivado ha quedado limitado a los campos llanos y de buena accesibilidad (Depresión Interior y fondos de los valles transversales) para su trabajo con tractores, mientras que la totalidad de las laderas se han abandonado. Los campos abandonados cubren 480.5 km^2 (el 27,3% del área de estudio), siendo el paisaje dominante en el sector del flysch (Lasanta, 1988; Lasanta y Errea, 2001). Por otro lado, los censos ganaderos se hundieron tras entrar en crisis el sistema trashumante: la mayor parte de los municipios perdieron más del 80% de su cabaña ganadera, ejerciendo una escasa presión sobre amplias áreas de pastos naturales, especialmente de los localizados en laderas bajas (Vicente, 2001). En la actualidad el ganado se concentra exclusivamente en el espacio cultivado y en los pastos supraforestales. García-Ruiz y Lasanta (1993) comprobaron que el primer uso aporta, según valles, entre el 66% y el 79% de la alimentación del ganado, y el segundo entre el 18 y el 27%, mientras que las laderas medias y bajas (bosques, matorrales y campos abandonados) sólo del 3 al 7%.

3. Metodología

3.1 Construcción de la serie temporal de imágenes de satélite

El LATUV (Laboratorio de Teledetección de la Universidad de Valladolid) dispone de una antena para la recepción de imágenes AVHRR desde el año 1993. Los satélites de la serie NOAA forman una familia de plataformas heliosincrónicas que permiten la captación de imágenes de baja resolución espacial (1 km^2) con una frecuencia temporal diaria, de tal forma que constituyen una valiosa fuente de información para el seguimiento temporal de los ecosistemas (Gutman *et al.*, 1995). Las imágenes, que se reciben diariamente, se corrigen espectralmente para ponderar el efecto atmosférico (Illera *et al.*, 1995), incluyendo un proceso de eliminación de nubes (Delgado, 1991). A partir de las reflectividades de los canales 1 (rojo) y 2 (infrarrojo cercano) se calcula el Índice de Vegetación Normalizado o NDVI [$\text{NDVI} = (\text{Banda } 2 - \text{Banda } 1) / (\text{Banda } 2 + \text{Banda } 1)$]. La relación del NDVI con diferentes parámetros (área foliar, porcentaje de fracción vegetal, biomasa vegetal,...) que caracterizan a la vegetación ha sido puesto de manifiesto por numerosos autores: Carlson y Ripley (1997), Diallo *et al.* (1991) y Wylie *et al.* (2002). Para minimizar perturbaciones atmosféricas o posibles errores en la eliminación de nubes se han generado compuestos mensuales, "Maximun Value Composite" (MVC) (Holben, 1986).

Uno de los principales problemas de las series multitemporales de imágenes de satélite es la dificultad de obtener registros homogéneos a lo largo del tiempo (Goward et al.,

1991; Kogan y Zhu, 2001), como consecuencia de cambios de satélite, la degradación de la órbita del sensor y la inexistencia de unos coeficientes de calibración constantes. En concreto, la serie de NDVI utilizada (imágenes de 1993 a 2000) tuvo un cambio de satélite en 1995 (NOAA 11 a NOAA 14), así como algunos meses con información perdida debido a la alta frecuencia temporal de cubierta nubosa y a un error en el satélite NOAA-11 entre octubre y diciembre de 1994. Para evitar errores en la serie temporal se han utilizado coeficientes de calibración posteriores al lanzamiento (Rao y Chen, 1994 y 1996) que solucionan el problema de degradación de la órbita del sensor. Los meses con datos perdidos en determinados píxeles se rellenaron mediante la utilización de modelos de regresión simple para cada píxel de la imagen en relación a los valores de su serie temporal completa. El resultado del proceso son 1758 series temporales de 96 registros cada una (enero de 1993 a diciembre de 2000, con un registro por mes), donde cada serie refleja la dinámica vegetal en celdas de 1 km².

3.2 Análisis estadísticos

En cada una de las 1758 series temporales se analizó la existencia de posibles tendencias en la evolución del NDVI, aplicando el coeficiente de correlación no paramétrico ρ de Spearman entre las series de NDVI y la serie temporal en meses (enero de 1993 = 1 y diciembre de 2000 = 96). Se utilizó un coeficiente no paramétrico por presentar mayor robustez ante la presencia de extremos que los coeficientes paramétricos. Además, no resulta necesario asumir la normalidad en las series de datos (Lanzante, 1996). Los valores de r indican el sentido de la evolución de la vegetación, coincidiendo los valores positivos con el aumento de la biomasa vegetal y los negativos con una tendencia regresiva. Cuanto más se aproxime el valor del coeficiente a 1 o -1 mayor será el cambio. La significación estadística se estableció en $\alpha < 0.1$. Para una explicación completa del coeficiente puede consultarse Siegel y Castellan (1988).

Conocida la evolución reciente de la biomasa vegetal se analizaron los resultados en función de las cubiertas y los usos actuales del suelo. Se generaron dos coberturas digitales (escala 1: 50.000) a partir de fotointerpretación (vuelos de 1957 y 1990) y trabajo de campo. En el mapa de vegetación se incluyeron las siguientes categorías: cultivos de secano, cultivos de regadío, bosques de frondosas, bosques de coníferas, bosques mixtos, matorral, pastizales supraforestales y roca desnuda. En el de usos del suelo se diferenció entre: pastos de aprovechamiento estival, pastos aprovechados durante el resto del año, bosque maderero, campos abandonados, espacio agrícola cultivado en la actualidad, gleras y cárcavas, y roca desnuda. El mapa de usos del suelo trata de reflejar la utilización actual del territorio, pero teniendo muy en cuenta el uso pasado. Por ello se puso especial cuidado en cartografiar la evolución del espacio agrícola (abandono de campos, sobre todo) y las áreas de pastoreo, ya que constituyen las manifestaciones principales del cambio de gestión, lo que debe tener importantes consecuencias en la dinámica de la cubierta vegetal.

El problema de la diferente escala espacial de la información entre la cartografía realizada mediante imágenes de satélite y fotografía aérea se solucionó convirtiendo los mapas digitales de cubiertas y usos del suelo en información tipo ráster al tamaño de

celda de las imágenes NOAA-AVHRR, asignando a cada celda el código de cubierta vegetal dominante en la celda. Con análisis de varianza (ANOVA) se determinó la influencia de la cubierta vegetal y de la gestión antrópica en la evolución de la biomasa vegetal.

4. Resultados

4.1 Evolución temporal de la biomasa vegetal

La figura 2 muestra la evolución temporal del NDVI en la totalidad del área de estudio entre 1993 y 2000, a partir del promedio de los valores de todos los píxeles de la imagen. El promedio de ρ en el conjunto del área de estudio es de 0.115, por lo que aunque se puede afirmar un incremento general de la actividad vegetal, éste resulta moderado. Se observa también una importante oscilación intranual, debida al ciclo estacional de las plantas, que hace que el incremento vegetal no sea en ningún caso lineal. Durante la estación invernal el ciclo vegetativo se reduce considerablemente, por las bajas temperaturas y por el cubrimiento nival de los ecosistemas localizados a mayor altitud (pastos supraforestales y hayedos), mientras que en el periodo cálido se produce el pico de biomasa vegetal: las altas temperaturas facilitan los procesos de transpiración y transferencia radiativa.

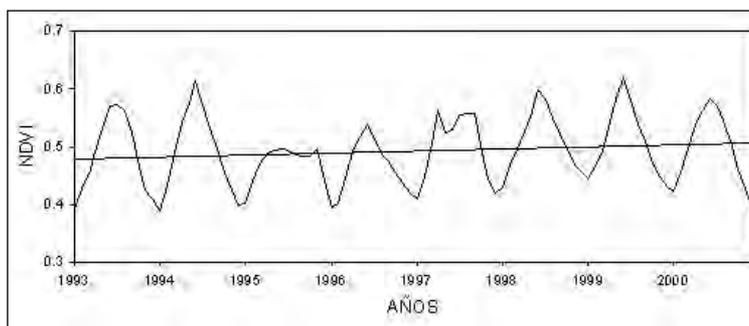


Figura 2: Evolución de los valores mensuales de NDVI en el área de estudio. Cada valor mensual se obtuvo mediante el promedio de todos los píxeles de la imagen en ese mes.

El factor más limitante en el área de estudio es la temperatura, pero también la precipitación juega un papel destacado en las diferencias interanuales, cuestión que se manifestó claramente en 1995, un año muy seco, con un pico estival de NDVI muy inferior al del resto de años de la serie. La precipitación media anual de 1995 fue de 805 mm para el conjunto de observatorios del área de estudio, mientras que fue de 908 mm para el periodo 1980-2000.

4.2 Distribución espacial de las tendencias en la evolución de la biomasa vegetal

La diferenciación espacial de la evolución vegetal se muestra en la tabla 1. El incremento del NDVI es positivo y significativo ($\alpha < 0.1$) en 442 km² (25.1% de la superficie total). 1201 km² (68.3%) han experimentado también una tendencia positiva, aunque no significativa, ya que el incremento de la cubierta vegetal ha sido menor. Únicamente en

115 km² (6.5%) la tendencia es negativa, con retroceso en la cantidad de biomasa vegetal producida.

Tabla 1: Evolución superficial de los valores de NDVI.

Evolución del NDVI	Superficie (Km2)	% Territorio
Incremento significativo (1)	442	25,1
Positiva no significativa	1201	68,3
Negativa no significativa	115	6,5

(1) Comprobado un nivel de confianza superior al 90%

La figura 3 muestra la distribución espacial del coeficiente ρ . La figura izquierda presenta los valores reales (píxel a píxel), mientras que la figura derecha refleja los valores tras la aplicación de un filtro de paso bajo (3 x 3 píxels), lo que suaviza la dispersión gráfica y permite destacar los rasgos espaciales más significativos de la evolución. A pesar de la alta variabilidad espacial en la distribución de ρ se observa una clara gradación en tres franjas, que siguen a grandes rasgos los mismos patrones espaciales de distribución de las cubiertas del suelo (Figura 4). En el sector meridional, con una disposición W-E, predominan valores negativos o escasamente positivos, coincidiendo con el área de aprovechamiento fundamentalmente agrícola. Más al norte aparece una franja con valores de ρ superiores a 0.15, e incluso a 0.25 en algunos sectores (valores estadísticamente muy significativos). Se trata del espacio donde se ha concentrado el incremento de la cubierta vegetal de forma generalizada: bosques de frondosas, coníferas y matorrales. Finalmente, aparece, por encima de estos sectores un área con valores de ρ próximos a 0, coincidiendo con pastizales supraforestales y cantiles sin cubierta vegetal.

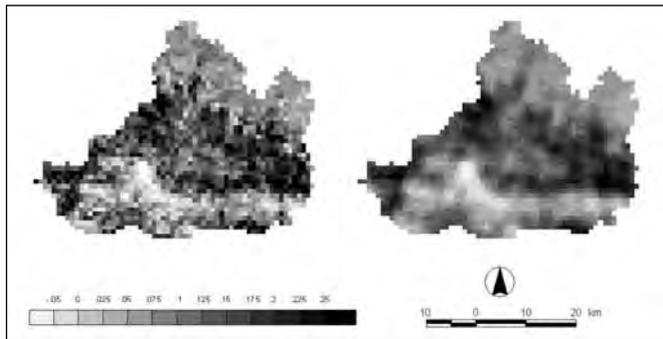


Figura 3: Distribución espacial del coeficiente ρ . Izda: Datos reales. Dcha: Datos obtenidos mediante la aplicación de un filtro de paso bajo 3x3. Para los 96 registros disponibles el valor de Rho para un umbral de significación de $p < 0.1$ es de 0.168

4.3 Diferencias espaciales en la evolución del NDVI en función del tipo de cubierta vegetal

La tabla 2 incluye los resultados del análisis de varianza entre la evolución del NDVI y la cubierta vegetal. La variable métrica corresponde a la distribución espacial del coeficiente ρ y el factor de agrupación son los tipos de coberturas del suelo. El análisis indica que existen diferencias significativas en los valores de ρ en los grupos de cubierta vegetal.

La tabla 3 (ver también la figura 4) incluye los valores promedio de cada uno de los grupos. Los más elevados corresponden a las áreas de matorral y de bosque (coníferas, frondosas y mixtos), con valores medios de ρ entre 0.11 y 0.13. Las áreas de pastos supraforestales y los sectores de roca desnuda presentan una cubierta estable, con valores de ρ positivos pero escasamente significativos. Finalmente, el espacio cultivado, localizado básicamente en el fondo del valle del río Aragón, constituye el área de mayor estabilidad temporal, con valores de ρ próximos a 0.

Tabla 2: Análisis de la varianza entre la evolución del NDVI y la cubierta vegetal.

	Suma de cuadrados	Df	Cuadrado media	F-Ratio	P
Entre grupos	1.238	7	0.176	30.23	0.00
Intra grupos	9.96048	1751	0.005		
Total (Corr.)	11.194	1758			

Tabla 3: Medias de ρ en las diferentes cubiertas del suelo.

Cubiertas del suelo	Promedio (ρ)
1 Matorral	0.138562
2 Bosques de frondosas	0.115759
3 Bosques de coníferas	0.129742
4 Bosques mixtos	0.131072
5 Pastizales supraforestales	0.0940037
6 Gleras/cárcavas	0.0802571
7 Cultivos de secano	0.0737616
8 Cultivos de regadío	0.0303422

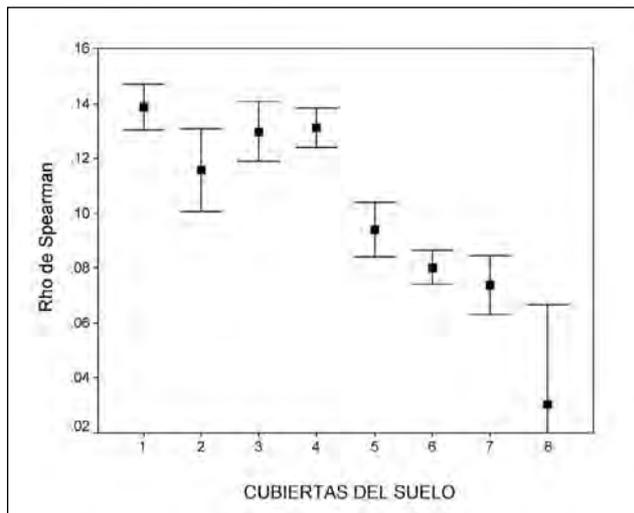


Figura 4: Gráficos de medias y niveles de confianza de r en función de las diferentes cubiertas del suelo. Las categorías corresponden a las de la tabla 3.

La tabla 4 compara las medias entre pares de grupos (constituidos mediante el promedio de todos los píxeles entre las categorías en las que no existen diferencias de medias), clasificando las cubiertas vegetales en función de la evolución del NDVI.

Resulta muy interesante comprobar que las áreas de matorral, los bosques de coníferas y los bosques mixtos forman un grupo, dadas las escasas diferencias que existen entre sus medias. Los pastos supraforestales y las áreas de roca desnuda constituyen otro grupo, mientras que los bosques de frondosas, los cultivos de secano y los de regadío presentan una evolución individualizada, que les lleva a no agruparse con ningún tipo de cubierta.

Tabla 4: Agrupación de cubiertas según la comparación de medias entre pares de grupos.

Cubiertas del suelo	Grupo
1 Matorral	4
2 Bosques de frondosas	3
3 Bosques de coníferas	4
4 Bosques mixtos	4
5 Pastizales supraforestales	5
6 Cantiles y roca desnuda	5
7 Cultivos de secano	1
8 Cultivos de regadío	2

4.4 Diferencias espaciales en la evolución del NDVI en relación con los usos del suelo

La tabla 5 anota los resultados de la ANOVA entre la evolución del NDVI y los usos del suelo actuales (variable categórica). Se observa una diferenciación significativa en los valores de p entre los usos del suelo.

Tabla 5: Análisis de varianza entre la evolución del NDVI y los usos del suelo.

	Suma de cuadrados	Df	Cuadrado media	F-Ratio	P
Entre grupos	1.248	6	0.208	43	0.000
Intra grupos	5.963	1752	0.004		
Total (Corr.)	7.212	1758			

La tabla 6 y la figura 5 indican las diferencias entre los usos del suelo. Se comprueba que el valor de p más alto (0.16) corresponde al uso de campos abandonados. A continuación, aparecen las áreas de posible pastoreo por el ganado durante los meses no estivales ($p = 0.13$, localizadas en laderas de altitudes medias y bajas, y cubiertas por bosques aclarados y matorrales. El espacio cultivado en la actualidad tiene un valor inferior ($p = 0.09$) a los campos abandonados, a las áreas de pastoreo durante la estación fría y a las de aprovechamiento maderero. Las áreas de pastos estivales y los espacios de roca desnuda o con escasa vegetación presentan el mismo valor ($p = 0.08$). Finalmente, los espacios que presentan un menor incremento de NDVI coinciden con las zonas fuertemente erosionadas (áreas de cárcavas), localizadas en los niveles de acumulación cuaternaria del Aragón, donde la degradación del suelo dificulta el avance de la cubierta vegetal.

Tabla 6: Medias de p en los diferentes usos del suelo

Cubiertas del suelo	Promedio (p)
1 Campos abandonados	0.16
2 Pastos (resto del año)	0.13
3 Bosque maderero	0.12
4 Campos actuales	0.09
5 Gleras y cárcavas	0.06
6 Pastos estivales (vacuno y ovino)	0.08
7 Roca sin cobertura vegetal	0.08

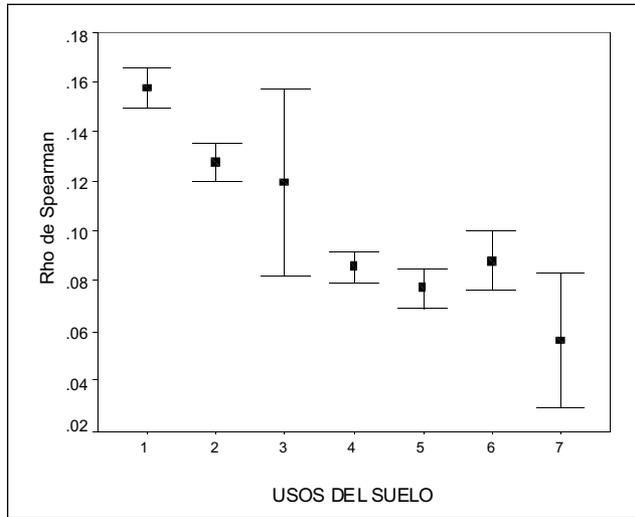


Figura 5: Gráficos de medias y niveles de confianza de r en función de los diferentes usos del suelo. Los códigos hacen referencia a la tabla 6.

La comparación de ρ entre pares de grupos permite identificar 5 grupos homogéneos de evolución vegetal (Tabla 7). Las áreas de pastoreo en la estación fría y los bosques madereros forman un grupo, al igual que los pastos estivales y los cantiles. El resto de los usos se comportan de forma individual.

Tabla 7: Agrupación de usos del suelo según la comparación de medias entre pares de grupos.

Usos del suelo	Grupos
1 Campos abandonados	3
2 Pastos (resto del año)	2
3 Bosque maderero	2
4 Campos actuales	4
5 Gleras y cárcavas	5
6 Pastos estivales (vacuno y ovino)	1
7 Cantiles	1

La figura 6 muestra el diferente comportamiento estacional entre las series temporales de NDVI en cada uno de los grupos de usos del suelo. El grupo 1 presenta una evolución modesta (valor de ρ 0.09, $p = 0.35$) durante el periodo de estudio, pero una fuerte oscilación estacional, como consecuencia de su corto ciclo vegetativo (5 meses al año). El grupo 2 tiene una tendencia positiva ($\rho = 0.12$, p -valor = 0.22) y también una variación estacional amplia, debida a la presencia de especies leñosas con un marcado ciclo anual (especialmente las frondosas). El grupo 3 (campos abandonados sin ningún tipo de aprovechamiento en la actualidad) presenta el valor de ρ más alto (0.16, $p = 0.12$) y la menor oscilación anual, con altos valores mensuales de NDVI durante la mayor parte del año. Los grupos 4 y 5 tienen un comportamiento estacional similar, con una curva que refleja oscilaciones moderadas, por ser usos que se sitúan en altitudes bajas (ciclo vege-

tativo más largo). Sin embargo, se diferencian de los campos abandonados por la lenta evolución de la biomasa vegetal en el periodo de estudio ($\rho = 0.09$ en el espacio cultivado y $\rho = 0.06$ en gleras y cárcavas).

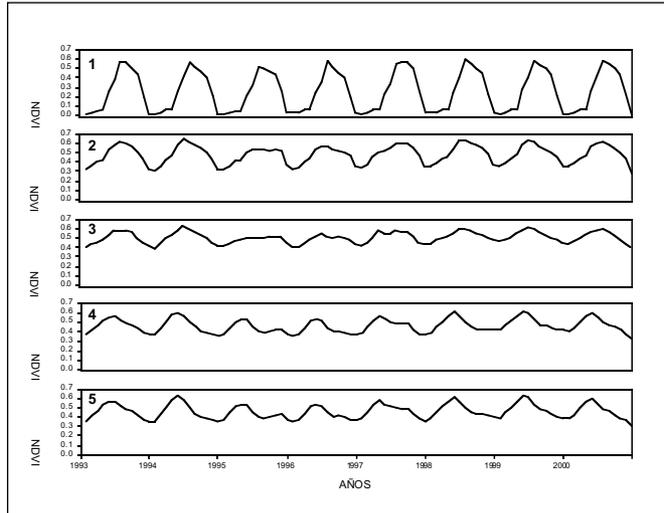


Figura 6: Evolución de los diferentes grupos obtenidos mediante el contraste de medias en el análisis de la varianza, siendo el factor de agrupación las diferentes categorías de usos del suelo.

5. Discusión y conclusiones

La tendencia hacia un incremento de la biomasa vegetal en el Pirineo central español coincide con los resultados obtenidos por otros autores, que trabajan a escalas mayores. Kawabata *et al.* (2001) observan en Europa una tendencia ascendente y significativa de los NDVI entre 1981 y 1990. La elevada correlación que encuentran entre la temperatura y los valores anuales de NDVI ($r^2 = 0.3$) y estacionales ($r^2 = 0.7$) les lleva a concluir que el incremento térmico general es el causante de la evolución positiva de la biomasa vegetal. Mynenni *et al.*, (1997) llegan a las mismas conclusiones para el mismo periodo de tiempo. Lucht *et al.*, (2002) utilizan, también en Europa, una serie temporal más larga (1982 – 1998), obteniendo resultados similares; identifican un repunte del incremento vegetal a partir de 1991, coincidente con el aumento de la temperatura a escala continental. Otros autores llegan a resultados parecidos estudiando territorios más pequeños, pero en su explicación destacan la influencia del hombre. Fuller (1998), con imágenes de Senegal de 1987 a 1993, observó diferencias en las tendencias temporales del NDVI en función de la gestión agrícola o pascícola reciente. Pelkey *et al.* (2000) indican que la creación de espacios protegidos incrementa claramente el grado de evolución de la cubierta y biomasa vegetal respecto a espacios que siguen un uso más intensivo.

Los resultados obtenidos en este trabajo ponen de manifiesto que existe un incremento de la biomasa vegetal, pero que el ritmo de crecimiento es muy diferente entre distintos ambientes. Los campos abandonados presentan el mayor incremento de NDVI, seguidos por las áreas de matorral y los bosques. Los menores incrementos corresponden

a las áreas de muy escasa o nula vegetación, incluyendo las gleras y cárcavas, seguidos por el espacio cultivado y los pastos supraforestales. Estos resultados inciden en el importante papel de la gestión antrópica en la evolución de la biomasa vegetal. Los espacios intensamente utilizados en el pasado y en la actualidad abandonados, o aprovechados de forma muy extensiva con una baja presión ganadera, son los que tienen el mayor incremento de la cubierta vegetal, y donde se han registrado las tendencias positivas de NDVI más significativas. Por el contrario, las áreas de uso más intensivo en la actualidad (espacio agrícola y pastos supraforestales) registran los valores de NDVI más bajos.

Otros trabajos (Lasanta *et al.*, 2000; Vicente *et al.*, 2000) realizados en la misma zona de estudio, pero considerando un periodo de tiempo más largo (la segunda mitad del siglo XX), concluyen que en las laderas bajas y medias es donde tiene lugar el proceso de revegetación más intenso. El abandono del espacio agrícola y la ausencia de pastoreo llevan a una recuperación paulatina del estadio anterior a su uso intensivo. Los campos abandonados se cubren por especies herbáceas (*Brachipodium pinnatum*, *Carex flacca*, *Galium lucidum*, *Sanguisorba minor*,...) inmediatamente después del abandono. A los 3-5 años aparecen los primeros matorrales de *Genista scorpius* y *Rosa sp.*, que llegan a cubrir completamente el campo a los 25–30 años. A continuación aparecen *Crataegus monogyna*, *Prunus spinosa* y *Juniperus communis*. A partir de los 60 años crecen los primeros pies arbóreos de *Pinus sylvestris* (Montserrat, 1990; Molinillo *et al.*, 1997). La tendencia hacia el incremento de la biomasa total en estos paisajes de campos abandonados es, pues, muy evidente.

Las áreas boscosas también están experimentando un incremento generalizado, aunque inferior a las laderas de campos abandonados. Su bajo aprovechamiento actual (De la Riva, 1997) incide en un incremento del cubrimiento vegetal, aunque a un ritmo más lento que otros usos y cubiertas que se encuentran en un estadio de sucesión vegetal más inicial. De ahí, que los sectores de bosque que menos incremento tienen de NDVI coinciden con los conservados durante el sistema tradicional (hayedos y algunos robledales). Otros bosques (de coníferas y mixtos) avanzan de forma más rápida al constituir bosques de sucesión, surgidos tras una primera fase de abandono que tuvo lugar durante las primeras décadas del siglo XX (Lasanta, 1988).

Las zonas de pastos supraforestales presentan un lento incremento de biomasa vegetal, explicable por soportar mayor carga ganadera estacional que otros espacios (Vicente Serrano, 2001). Hay que tener también en cuenta que las condiciones ambientales más extremas limitan el proceso de sucesión y recuperación vegetal. Los sectores cultivados tienden hacia el mantenimiento de su biomasa vegetal, con valores de r en torno a 0. Se trata de espacios estables, sometidos a un fuerte control antrópico, que siguen ciclos anuales de mayor o menor magnitud en función de los aportes de precipitación o las reservas de agua disponibles cada año.

En definitiva, se ha comprobado que la mayor parte del área de estudio experimenta un incremento de la biomasa vegetal, si bien el ritmo y la producción es mayor en las laderas bajas, coincidiendo con las áreas más antropizadas en el pasado y recientemente más marginadas. De esta forma, la variabilidad espacial del NDVI parece explicarse, sobre todo, por los

intensos cambios de gestión durante el siglo XX: abandono masivo de las laderas agrícolas y escasa presión pastoral tras la crisis de la ganadería extensiva. Estos resultados aportan información para la gestión del territorio, tanto por sus implicaciones económicas (riqueza estacional de pastos, producción de madera, atractivo del paisaje de cara a la actividad turística,...) como ambientales (riesgo de incendios, producción de agua y tasas de sedimento,...).

Agradecimientos

Este trabajo ha contado con la ayuda de los proyectos de investigación: *Caracterización espacio-temporal de las sequías en el valle medio del Ebro e identificación de sus impactos* (BSO2002-02743), *La identificación de fuentes de sedimento y áreas generadoras de escorrentía en relación con los cambios de uso del suelo* (REN/2000-1709-C04/01/GLO) y *Efectos erosivos del fuego a lo largo de un gradiente climático. Aportaciones para la gestión de áreas quemadas* (REN/2000-00133), financiados por la CICYT, y *La recuperación del espacio agrícola como estrategia de gestión integrada del territorio en área de montaña: El ejemplo de los Altos Valles del Aragón y del Gállego* (P049/2000), financiado por la Diputación General de Aragón

Bibliografía

- ABER, J.D., OLLINGER, S.V., FEDERER, C.A., REICH, P.B., GOULDEN, M.L., KICKLIGHTER, D.W., MELILLO, J.M. y LATHROP, R.G., (1995): Predicting the effects of climate change on water yield and forest production in the northeastern United States. *Climate Research* 5 (3): 207-222.
- 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.
- CHANGNON, S.A. y DEMISSIE, M., (1996): Detection of changes in streamflow and floods resulting from climate fluctuations and land use-drainage changes. *Climatic change* 32: 411-421.
- CHUVIECO, E., (1999): *Remote sensing of large wildfires in the european mediterranean basin*. Berlín. Springer-Verlag.
- DE LA RIVA, J., (1997): *Los montes de la Jacetania. Caracterización física y explotación forestal*. Publicaciones del Consejo de Protección de la Naturaleza en Aragón. Serie Investigación, 10: 358 pp. Zaragoza.
- DELGADO, J., (1991): *Clasificación y análisis de nubes mediante imágenes Meteosat*. Tesis doctoral. Universidad de Valladolid.
- DIALLO, O., DIOUF, A., HANAN, N.P., NDIAYE, A. y PRÉVOST, Y., (1991): AVHRR monitoring of savana primary production in Senegal, West Africa: 1987-1988. *International Journal of Remote Sensing*. 12 (6): 1259-1279.
- EASTERLING, D.R., HORTON, B., JONES, P.D., PETERSON, T.C., KARL, T.R., PARKER, D.E., SALINGER, M.J., RAZUVAYEV, V., PLUMMER, N., JAMASON, P. y FOLLAND, Ch.K., (1997): Maximum and Minimum Temperature Trends for the Globe. *Science* 277: 364-367.
- FERRER, C. (1988): Los recursos pascícolas del Pirineo aragonés. *Actas de la XXVIII Reunión Científica de la Sociedad Española para el Estudio de los Pastos*: 23-65, Jaca.

- FLORINSKY, I.V. y KURYAKOVA, G.A. (1996): *Influence of topography on some vegetation cover properties*. *Catena*, 27: 123-141.
- FULLER, D.O.: (1998): Trends in NDVI time series and their relation to rangeland and crop production in Senegal, 1987-1993. *International Journal of Remote Sensing*. 19 (10): 2013-2018.
- GARCÍA-RUIZ, J.M. (1988): La evolución reciente de la agricultura de montaña y sus efectos sobre la dinámica del paisaje. *Revista de Estudios Agrosociales*. 146: 7-37.
- GARCÍA-RUIZ, J.M. (1990): *Geoecología de las áreas de montaña*. Geoforma Ediciones: 337 pp., Logroño.
- GARCÍA-RUIZ, J.M. y LASANTA, T.: (1990): Land-use changes in the Spanish Pyrenees. *Mountain Research and Development* 10 (3): 267-279.
- GARCÍA-RUIZ, J.M. y LASANTA, T.: (1993): Land-use conflicts a result of land-use change in the Central Spanish Pyrenees: a review. *Mountain Research and Development* 13 (3): 295-304.
- GARCÍA-RUIZ, J.M. y LASANTA, T., ORTIGOSA, L., RUIS FLAÑO, P., MARTÍ, C. y GONZÁLEZ, C. (1995): Sediment yield under different land-uses in the Spanish Pyrenees. *Mountain Research and Development*, 15 (3): 229-240.
- GARCÍA-RUIZ, J.M. y PUIGDEFÁBREGAS, J. (1982): Formas de erosión en el flysch eoceno surpirenaico. *Cuadernos de Investigación Geográfica*, 8 (1-2): 85-124.
- GARCÍA-RUIZ, J.M. y PUIGDEFÁBREGAS, J. y CREUS, J. (1985): *Los recursos hídricos superficiales del Alto Aragón*. Colección de Estudios Altoaragoneses, 2: 224 pp., Huesca.
- GARCÍA-RUIZ, J.M. y VALERO, B. (1998): Historical geomorphic processes and human activities in the Central Spanish Pyrenees. *Mountain Research and Development*, 18(4): 309-320.
- GARCÍA-RUIZ, J.M., BEGUERÍA, S., LÓPEZ, J.I., LORENTE, A. y SEEGER, M. (2001): *Los recursos hídricos superficiales del Pirineo aragonés y su evolución reciente*. Geoforma Ediciones: 192 pp., Logroño.
- GOWARD, S.N., MARKHEM, B., DYE, D.G., DULANEY, W. y YANG, J., (1991): Normalized difference vegetation index measurements from the advanced very high resolution radiometer. *Remote Sensing Environment*. 35: 257-277.
- GUTMAN, G., TARPLEY, D., IGNATOV, A. y OLSON, S., (1995): The enhanced NOAA global land dataset from the advanced very high resolution radiometer. *Bulletin of the American Meteorological Society*. 76 (7): 1141-1156.
- HESTER, A.J., MILLER, D.R., y TOWERS, W. (1996): Landscape scale vegetation change in the Cairngorms, Scotland, 1946-1988: implications for land management. *Biological Conservation*, 77: 41-51.
- HOLBEN, B.N., (1986): Characteristics of maximum-value composite images from temporal AVHRR data. *International Journal of Remote Sensing*, 7: 1417-1434.
- HUTJES, R.W.A., KABAT, P., RUNNING, S.W., SHUTTLEWORTH, W.J., et al., (1998): Biospheric Aspects of the Hydrological Cycle, *Journal of Hydrology*, 212-213: 1-21.
- ILLERA, P., DELGADO, J. y CALLE, A., (1995): A navigation algorithm for satellite images. *International Journal of Remote Sensing* 15: 577-588.
- KARL, T.R., KHIGHT, R.W y CHRISTY, J.R., (1994): Global and Hemispheric Temperature Trends: *Uncertainties Related to Inadequate Spatial Sampling*. *Journal of Climate*: 7 (7): 1144-1168.

- KARL, T.R., KHIGHT, W y PLUMMER, N., (1995): Trends in high frequency climate variability in the twentieth century. *Nature* 377: 217-220.
- KAMMERBAUER, J. y ARDON, C. (1999): Land use dynamics and landscape change pattern in a typical watershed in the hillside region of Central Honduras. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 75: 1-2
- KAWABATA, A., ICHII, K. y YAMAGUCHI, Y., (2001): Global monitoring of interannual changes in vegetation activities using NDVI and its relationships to temperature and precipitation. *International Journal of Remote Sensing*. 22 (7): 1377-1382.
- KERGOAT, L., (1998): A model for hydrological equilibrium of leaf area index on a global scale. *Journal of Hydrology*, 212-213: 268-286.
- KOGAN, F.N. y ZHU, X., (2001): Evolution of long-term errors in NDVI time series: 1985-1999. *Advances in Space Research*. 28 (1): 149-153
- KOK, K., CLAVAU, M.B.W., HEEREBOUT, W. M., y BRONSVELD, K. (1995): Land degradation and land cover change detection using low-resolution satellite images and the CORINE database: a case study in Spain. *ITC Journal*, 1995 (3): 217 –227.
- LANZANTE, J.R., (1996): Resistant, robust and non-parametric techniques for the analysis of climate data: theory and examples including applications to historical radiosonde station data. *International Journal of Climatology*. 16: 1197-1226.
- LASANTA, T.: (1988): The process of desertion of cultivated areas in the Central Spanish Pyrenees. *Pirineos*, 132: 15-36.
- LASANTA, T.: (1989): *Evolución reciente de la agricultura de montaña*. Geoforma Edición. Logroño. 220 pp.
- LASANTA, T. y ERREA, M.P. (2001): Usos agrarios del suelo. En: *El medio físico y su peligrosidad en un sector del Pirineo Central*. Ministerio de Ciencia y Tecnología e IGME: 43-46, Zaragoza.
- LASANTA, T. y RUIZ, P., (1990): Especialización productiva y desarticulación espacial en la gestión reciente del territorio en las montañas de Europa occidental. En *Geoecología de las áreas de montaña* (Ed. García-Ruiz, J.M.): 267-295. Geoforma Ediciones. Logroño.
- LASANTA, T., VICENTE SERRANO, S.M. y CUADRANT, J.M., (2000): Marginación productiva y recuperación de la cubierta vegetal en el Pirineo: un caso de estudio en el valle de Borau. *Boletín de la AGE*. 29: 5-28.
- 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 high-latitude vegetation greening trend and Pinatubo effect. *Science* 296: 1687-1689.
- MOLINILLO, M., LASANTA, T. y GARCÍA-RUIZ, J.M. (1997): Managing degraded landscape after farmland abandonment in the Central Spanish Pyrenees. *Environmental Management*, 21: 587-598.
- MONTERRAT, J. (1992): *Evolución glacial y postglacial del clima y la vegetación en la vertiente sur del Pirineo: Estudio palinológico*. Instituto Pirenaico de Ecología: 147 pp., Jaca.
- MYNENI, R.B., C.D. KEELING, C.J. TUCKER, G. ASRAR, y R.R. NEMANI. (1997): Increase plant growth in the northern high latitudes from 1981-1991. *Nature*, 386: 698-702.
- MYNENI, R.B., C.J. TUCKER, G. ASRAR y C.D. KEELING, (1998): Interannual variations in satellite-sensed vegetation index data from 1981 to 1991. *Journal of Geophysical Research*, 103: 6145-6160.

- OLSSON E.G.A., AUSTRHEIM, G. y GRENE, S.N. (2000): Landscape change patterns in mountains, land use and environmental diversity, Mid-Norway 1960-1993. *Landscape Ecology*, 15: 155-177-
- PALLARUELO, S., (1988): *Cuadernos de la trashumancia n° 6. Pirineo Aragonés*. ICONA. 75 pp.
- PELKEY, N.W., STONER, C.J. y CARO, T.M., (2000): Vegetation in Tanzania: assessing long term trends and effects of protection using satellite imagery. *Biological Conservation* 94: 297-309.
- PUIGDEFÁBREGAS, J., (1981): *El pinar altoaragonés de Pinus sylvestris. Estructura y producción primaria neta*. Tesis doctoral: 757 pp. Universidad de Navarra.
- PUIGDEFÁBREGAS, J. y FILLAT, F. (1986): Ecological adaptation of traditional land-uses in the Spanish Pyrenees. *Mountain Research and Development*, 6(1): 63-72.
- RAO, C.R.N. y CHEN, J. (1994): Inter-satellite calibration linkages for the visible and near-infrared channels of the Advanced Very High Resolution Radiometer on the NOAA-7, -9 and -11 spacecraft, *International Journal of Remote Sensing*, 16, 1931-1942.
- RAO, C.R.N. y CHEN, J., (1996): Post-launch 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*, 17, 2743-2747.
- RIEBSAME, W.E., MEYER, W.B., y TURNER, B.L. (1994): Modelling land use and cover as part of global environmental change. *Climatic Change*, 28: 1-10.
- SIEGEL, S. y CASTELLAN, N., (1988): *Nonparametric Statistics for the behavioral sciences*. McGraw-Hill. New York. 399 pp.
- SOLER, M. y PUIGDEFÁBREGAS, C. (1972): Esquema litológico del Alto Aragón Occidental. *Pirineos*, 106: 5 – 15.
- STHOLGREN, T.J., CHASE, T.N., PIELKE, R.A., KITTEL, T.G.F., y BARON, J.S. (1998): Evidence that local land use practices influence regional climate, vegetation and stream flow patterns in adjacent natural areas. *Global Change Biology*, 4: 495-504.
- SCOTT, P.A., TETT, S.F.B, JONES, G.S., ALLEN, M.R., MITCHELL, J.F.B y JENKIS, G.J., (2000): External Control of 20th Century Temperature by Natural and Anthropogenic Forcings. *Science* 290: 2133-2137.
- VICENTE SERRANO, S.M. (2001): *El papel reciente de la ganadería extensiva de montaña en la dinámica del paisaje y en el desarrollo sostenible. El ejemplo del Valle de Borau*. Publicaciones del Consejo de Protección de la Naturaleza de Aragón: 181 pp., Zaragoza.
- VICENTE SERRANO, S.M., LASANTA, T. y CUADRANT, J.M., (en prensa): Diferencias espaciales en el proceso de revegetación: influencia de los factores ambientales y de la gestión en el Pirineo central. *Frankfurter Geowissenschaftliche Arbeiten – Serie D: Physische Geographie*.
- VICENTE SERRANO, S.M., LASANTA, T. y CUADRANT, J.M., (2000): Transformaciones en el paisaje del Pirineo como consecuencia del abandono de las actividades económicas tradicionales. *Pirineos*. 155: 111-133.
- WYLIE, B.K., MEYER, D.J., TIESZEN, L.L. y MANNEL, S., (2002): Satellite mapping of surface biophysical parameters at the biome scale over the North American grassland. A case study. *Remote Sensing of Environment* 79: 266-278.