

CAMBIOS EN LA CUBIERTA VEGETAL EN EL PIRINEO ARAGONÉS EN LOS ÚLTIMOS 50 AÑOS

T. LASANTA & S. M. VICENTE-SERRANO

*Instituto Pirenaico de Ecología, CSIC. Campus de Aula Dei. Apdo. correos 202, 50080 Zaragoza
c.e.: fn@ipe.csic.es*

ABSTRACT.— *Changes of vegetal cover in the Aragonese western Pyrenees are shown throughout the last 50 years. The evolution is characterized by a generalised revegetation process with an advance of shrubs and forests. The medium and low slopes show the most intense revegetation as a consequence of the agricultural abandonment and the decrease of the livestock pressure. Nevertheless, few vegetation changes are recorded in cultivated lands and the pastures located above timberline. In the analysed period, the most important changes were recorded in the decades of 1960 and 1970 whereas in the decades of 1980 and 1990 the rate of vegetation growth has decreased noticeably. The socioeconomic factors (agricultural abandonment, livestock extensification and reforestations) affect the spatial and temporal patterns of revegetation. Also the relief has a noticeable influence, mainly elevation and aspect.*

Key words: Land cover changes, land uses changes, secondary succession, NDVI, mountain, Pyrenees, Spain.

RÉSUMÉ.— *Les changements de la couverture végétal entre 1957 et 2007 sont analysés dans les Pyrénées occidentales aragonaises. L'évolution se caractérise par un important processus de revégétation avec une progression des buissons et de la forêt. Les versants moyens et bas sont les zones qui présentent un processus de revégétation plus intense, conséquence de l'abandon agricole ainsi que de la faible pression de l'élevage. Des progressions moins importantes ont lieu dans les espaces cultivés et dans les pâturages alpins. Des changements majeurs se sont produits entre les années soixante-dix et quatre-vingts, et ensuite un ralentissement pendant les deux dernières décennies. Les facteurs socio-économiques (l'abandon agricole, l'extensification de l'élevage et le reboisement) ont un poids plus important que les*

facteurs naturels, parmi lesquels l'exposition est celui qui a une influence majeure. Les résultats indiquent que la progression est un processus modéré (1 ou 2 stades dans le processus de succession), conséquence du peu de temps qui s'est écoulé depuis la réduction de la pression humaine sur le territoire.

Mots clés: Changements de couverture végétale, changements d'utilisation du sol, sucesión secundaria, NDVI, montaña, Pirineos, España.

RESUMEN.- En este trabajo se muestran los cambios de cubierta vegetal en el Pirineo occidental aragonés entre 1957 y 2007. La evolución se caracteriza por un importante proceso de revegetación con avance de los matorrales de sucesión y del bosque. Las laderas medias y bajas son las áreas con un proceso de revegetación más intenso, como consecuencia del abandono agrícola y la baja presión ganadera. Los avances más modestos tienen lugar en el espacio cultivado y pastos alpinos. Entre los años sesenta y ochenta ocurrieron los mayores cambios en la cubierta vegetal, habiéndose ralentizado en las dos últimas décadas. Los factores socioeconómicos (abandono agrícola, extensificación ganadera y reforestaciones) son los más influyentes, mientras que entre las naturales tiene especial importancia la exposición.

Palabras clave: Cambios de cubierta vegetal, cambios de uso del suelo, sucesión secundaria, NDVI, montaña, Pirineo, España.

1. Introducción

A lo largo de los últimos siglos el Pirineo español se ha gestionado con fórmulas muy diferentes, aunque realizando un esfuerzo de síntesis cabe distinguir dos modelos, denominados por la literatura científica sistema tradicional y sistema reciente (ANGLADA *et al.*, 1980; LASANTA, 1990). El primero estuvo vigente hasta mediados del siglo XX y se caracterizaba por una fuerte intervención humana en el territorio; la práctica totalidad de los recursos se utilizaban para consumo de la población (alimentación, vivienda, infraestructuras,...) y de la ganadería, con esquemas de organización muy complejos, marcados por la enorme dependencia de los recursos internos, intercambios limitados con el exterior y una fuerte jerarquización social (ESTEVA, 1971; HEWITT, 1992; LASANTA, 2002). En estas condiciones, el paisaje vegetal registró intensas modificaciones: i) el nivel superior del bosque fue talado para incrementar la superficie de pastos de verano (MONTSERRAT, 1992; GARCÍA-RUIZ & VALERO, 1998), ii) el espacio agrícola se extendió por las laderas medias y bajas, sobre todo en las vertientes solanas, hasta ocupar una superficie muy amplia (casi el 30% de la localizada por debajo de los 1600 m) (DAUMAS, 1976; LASANTA, 1988), iii) el bosque era explotado con la extrac-

ción de madera para el abastecimiento de la construcción y de la marina (BALCELLS, 1983; DE LA RIVA, 1997). De ahí, que la cubierta vegetal sufriera un acusado proceso de contracción espacial, con diferencias de intensidad entre áreas.

Durante el siglo XX, de forma más acusada en la segunda mitad, el Pirineo –al igual que el resto de la montaña española– asiste a profundos cambios en la estructura demográfica, en la organización social y en el uso del suelo, dando lugar a lo que la bibliografía denomina sistema reciente. Conforme la emigración de la población hacia las ciudades iba aumentando y a medida que los intercambios de productos entre la montaña y el llano eran más fluidos, gran parte del espacio agrícola dejó de cumplir su función tradicional (la alimentación de la población) y se abandonó. LASANTA (1988) señala que $\frac{3}{4}$ partes del área cultivada a principios del siglo XX dejaron de cultivarse a partir de los años cuarenta. De forma simultánea, la ganadería extensiva experimentó profundos cambios, con la crisis terminal del sistema trashumante, el descenso del ovino y un ligero incremento del vacuno, que en ningún caso llegó a compensar la pérdida de ovejas (GARCÍA-RUIZ & BALCELLS, 1978; BALCELLS, 1985). De esta forma, la presión humana y la ganadera disminuyeron, concentrándose en las áreas más fértiles y con mejor accesibilidad y marginándose la mayor parte de las laderas, que se aprovechan recientemente de forma muy extensiva o se han abandonado completamente (PUIGDEFÁBREGAS & BALCELLS, 1970; GARCÍA-RUIZ, 1988; GARCÍA-RUIZ & LASANTA, 1990).

El abandono y la subutilización de las laderas han implicado cambios muy intensos en la cubierta vegetal y en el paisaje, pasando de la elevada presencia de campos de cultivo y pastizales al dominio generalizado de bosques y matorrales de sucesión (GALLART & LLORENS, 2003; POYATOS *et al.*, 2003; VICENTE-SERRANO *et al.*, 2004). De ahí, que pueda afirmarse que el proceso de revegetación (avance de matorrales y bosques) es el principal rasgo reciente de la dinámica natural y paisajística en el Pirineo (VICENTE-SERRANO, 2001; MOLINILLO *et al.*, 1997; VICENTE-SERRANO *et al.*, 2004 y 2006). No obstante, el proceso no resulta homogéneo espacialmente, ya que está condicionado por factores ambientales y de gestión, que incluyen el grado de fertilidad previo (MOLINILLO *et al.*, 1997), la presión ganadera reciente soportada por cada área (LASANTA *et al.*, 2005), los factores topográficos a escala local (LASANTA & VICENTE-SERRANO, 2007) y los años pasados tras el abandono (MONTSERRAT, 1990). Además, determinar los cambios temporales en la cubierta vegetal es un tema de cierta complejidad. Se requieren observaciones repetidas, que cubran amplios espacios y periodos de tiempo dilatados, con el fin de poder analizar la evolución y ritmos temporales en los procesos de sucesión y revegetación (PUEYO & BEGUERÍA, 2007).

Conocer los patrones espaciales y temporales de dichos procesos tiene un gran interés ecológico, ya que la cubierta vegetal juega un papel fundamental en algunos procesos ambientales (VAN WIJNGAARDEN, 1991), como el intercambio de gases con la atmósfera (ZENG *et al.*, 1999) y el ciclo hidrológico a diferentes escalas (KERGOAT, 1999). También tiene su influencia en la estructura del paisaje, con sus implicaciones en la biodiversidad y en la estética (PREISS *et al.*, 1997; VOS & MEEKES, 1999; SUÁREZ *et al.*, 2002), y en el riesgo de génesis y propagación de incendios (VICENTE-SERRANO *et al.*, 2000; ROMERO-CALCERRADA & PERRY, 2003; VÁZQUEZ & MORENO, 2001). Además, existe un gran interés socioeconómico, relacionado con el potencial, la distribución espacial y los patrones de calidad de los recursos forestales y pastorales (DE LA RIVA, 1997; LASANTA *et al.*, 2004). En este trabajo se hace una revisión general de los procesos recientes de revegetación natural en el Pirineo Central español, analizándolos a diferentes escalas espaciales y temporales; se señalan también los principales factores que explican los contrastes espaciales en el proceso de revegetación. La mayor parte de los resultados aportados constituyen una síntesis de temas ya analizados y discutidos en trabajos previos (LASANTA *et al.*, 2000 & 2005; LASANTA & VICENTE-SERRANO, 2006; VICENTE-SERRANO, 2001; VICENTE-SERRANO *et al.*, 2003, 2004, 2005 & 2006), en los que se puede ampliar los métodos utilizados y la información e interpretación aportada en este trabajo.

2. Área de estudio

El territorio estudiado se localiza en el sector noroccidental del Pirineo oscense (Figura 1), comprendiendo la cuenca del río Aragón (valles de Ansó, Hecho, Aragüés, Aísa, Borau y Canfranc). La superficie del área de estudio es de 60.241 ha, con un gradiente altitudinal muy elevado, ya que las cotas más bajas se sitúan por debajo de los 800 m, mientras que las cimas superan los 2.500 m (Visaurín, 2670 m, Pico de la Garganta, 2643 m).

Los valles se dirigen de Norte a Sur, cortando la estructura litológica y tectónica, que se dispone de forma alargada en sentido NW-SE. Cuatro grandes unidades morfoestructurales componen el área de estudio: el Pirineo Axial, las Sierras Interiores, la banda de flysch eoceno y las margas del Eoceno. Las dos primeras unidades poseen los relieves más vigorosos y las condiciones climáticas más extremas, por lo que han tenido escasa importancia agrícola, dedicándose más a la explotación forestal y pascícola. Por el contrario, las laderas del flysch, los fondos de valle y el área de margas han sido los espacios más cultivados. Especial interés tiene, de cara a los objetivos de este trabajo, la banda de flysch, que se desarrolla entre 800 y 2200 m de altitud, con

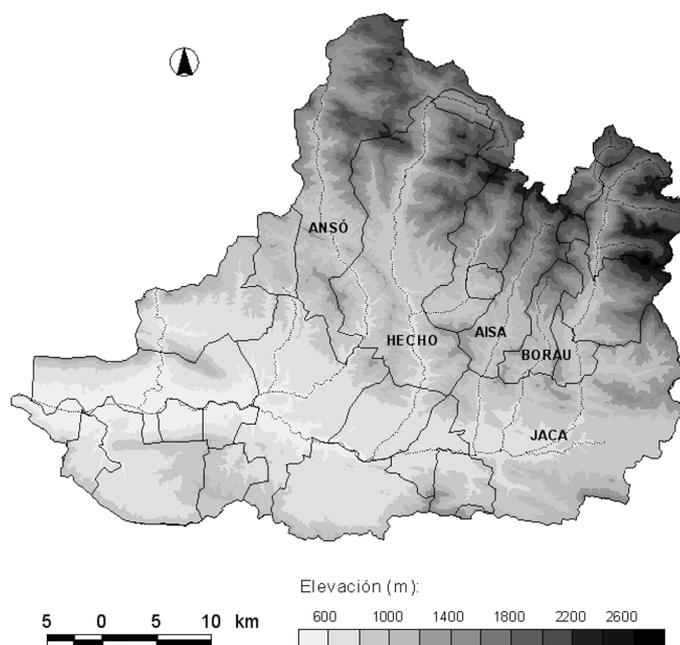


Figura 1: Área de estudio.

Figure 1. Study area.

vertientes regularizadas y amplias divisorias redondeadas. Las laderas se cultivaron con cereales, especialmente las solanas, hasta los años 40 del siglo XX. Desde entonces se produjo un proceso de abandono agrícola que permitió el inicio de los mecanismos de sucesión vegetal. LASANTA (2007) señala que los campos abandonados de este sector del Pirineo ocupan 18.317 ha (aproximadamente el 30% del territorio). Estas laderas, además, se han pastoreado muy poco desde los años sesenta; GARCÍA-RUIZ & LASANTA (1993) señalan que sólo contribuyen a la alimentación del ganado con el 3-5%, según valles, de sus necesidades anuales. Por otro lado, algunos sectores fueron reforestados con *Pinus sylvestris* (CHAUVELIER, 1990).

El clima presenta una variación importante, como lo demuestra la presencia de un clima de rasgos oceánicos en el NW y de características submediterráneas en el S y SE. Por otro lado, el relieve juega un papel destacado en el incremento de las precipitaciones y en el descenso de las temperaturas a medida que se asciende en altitud. Por encima de los 1700 m se registran con cierta frecuencia más de 2000 mm/año y los periodos sin lluvias son escasos

y muy cortos, por lo que apenas existe déficit hídrico. Una proporción importante de la lluvia se recibe en forma de nieve, permaneciendo durante varios meses; la isoterma de 0°C se sitúa a los 1650 m. Entre los 700 y 1100 m, especialmente en el sector S y SE, se dan condiciones de clima submediterráneo con precipitaciones inferiores a los 950 mm y algunos periodos de sequía en verano e invierno, sobre todo. Entre ambas situaciones se establece una acusada gradación climática (CREUS, 1983).

La ocupación del suelo muestra un escalonamiento altitudinal, apareciendo en los fondos de valle los prados de siega y algunas parcelas de cereal; las solanas de las laderas bajas y medias están cubiertas de quejigos (*Quercus gr. cerroides*), que alternan con áreas de matorral. En las umbrías y sectores más elevados, el *Pinus sylvestris* sustituye al quejigo. A mayor altitud, cuando la innivación se prolonga, aparece el pino negro (*Pinus uncinata*). En el sector más noroccidental dominan los bosques húmedos montanos de haya y abeto. Por encima de los 1600 m se desarrollan los pastos subalpinos y alpinos, ocupando éstas áreas muy localizadas en este sector del Pirineo. También abundan las áreas de roca desnuda, canchales o gleras y formas kársticas (VILLAR & BENITO, 2001).

3. Fuentes de información y métodos empleados

En función de los objetivos perseguidos se han utilizado diferentes fuentes de información y metodologías. La tabla 1 incluye las ventajas y limitaciones de los métodos utilizados para obtener la información.

Los muestreos en parcelas se realizaron en el Valle de Aísa, donde se estudiaron tres laderas de campos abandonados. En ellas se seleccionaron 60 parcelas en función de la edad de abandono, la gestión previa y posterior al cese del cultivo y la forma topográfica de cada parcela. En cada campo se tomó

Tabla 1. Fuentes de información utilizadas. Ventajas y limitaciones.
Table 1. Sources of information used. Advantages and limitations.

Parcela		Fotografía aérea		Imágenes de satélite	
Ventajas	Limitaciones	Ventajas	Limitaciones	Ventajas	Limitaciones
Precisión en la información que permite incluso conocer la composición a nivel de especies, el porcentaje de cubierta, etc.	Estudios muy locales. Dificilmente generalizables. Escasa cobertura temporal.	Evolución temporal larga con carácter multitemporal. Cobertura de amplias áreas	Proceso costoso en tiempo. Subjetividad en la delimitación de las teselas. Información categórica.	Cobertura de amplias áreas. Alta repetición temporal. Determinación de parámetros físicos de la cubierta vegetal que informan sobre el tipo y el estado.	Cobertura temporal media. Resolución espacial baja.

información del cubrimiento vegetal en la parte alta, media y baja, siguiendo las técnicas del cuadrado de muestreo y del *point quadrat*. Se consideró también, en los tres sectores de los campos, la fertilidad del suelo, la microtopografía y las formas de erosión (RUIZ-FLAÑO, 1993; MOLINILLO *et al.*, 1997). De esta forma, se conoció el proceso de sucesión vegetal (superficie y densidad de las manchas de vegetación; presencia y composición a nivel de especies) en campos abandonados con distinta gestión y con condiciones topográficas contrastadas (convexidades, concavidades y laderas rectas) (LASANTA, 2005).

Sin embargo, los análisis a escala de parcela no permiten tener una perspectiva territorial amplia (municipio, valle, comarca,...). Para superar esta limitación, junto a otras incluidas en la Tabla 1, se utilizaron fotografías aéreas. En el Valle de Borau, representativo de los cambios de cubierta vegetal a lo largo de la segunda mitad del siglo XX, se elaboró una cartografía secuenciada en cuatro fechas: 1957, 1978, 1990 y 2000 (LASANTA *et al.*, 2000). Así, se pudo conocer la evolución temporal (1957-2000) de la cubierta vegetal de todo el valle (superficie de las manchas, composición de las formaciones dominantes y sustitución de éstas en el tiempo), y el papel ejercido por la topografía, el relieve, la accesibilidad y la gestión tras el abandono agrícola: presión de pastoreo, reforestaciones, desbroces y talas (VICENTE-SERRANO, 2001).

Para completar el análisis de los cambios de cubierta vegetal se recurrió a las imágenes de satélite. La teledetección se ha utilizado ampliamente para el seguimiento de la dinámica vegetal, ya que permite analizar amplias áreas con una gran frecuencia temporal (GUTMAN, 1991). El análisis de la vegetación, mediante teledetección, se basa en la respuesta de la vegetación a la radiación en las regiones espectrales del espectro electromagnético del visible y el infrarrojo cercano. La radiación visible es principalmente absorbida por la vegetación para llevar a cabo sus procesos fotosintéticos, mientras que en la región del infrarrojo cercano la radiación es principalmente reflejada debido a la estructura interna de las hojas (KNIPLING, 1970). Gracias a ello se han desarrollado varios índices de vegetación a partir de la señal procedente de las imágenes de satélite. El más frecuentemente utilizado es el Índice de Vegetación Normalizado (Normalized Difference Vegetation Index, NDVI), que se calcula con la siguiente fórmula: $NDVI = (\text{infrarrojo} - \text{rojo}) / (\text{infrarrojo} + \text{rojo})$ (TUCKER, 1979). Numerosos autores han indicado la estrecha relación existente entre el NDVI y diferentes parámetros ecológicos como el índice de área foliar (BARET & GUYOT, 1991; CARLSON & RIPLEY, 1997), la biomasa vegetal (TUCKER *et al.*, 1983; GUTMAN, 1991; WYLIE *et al.*, 2002) o el porcentaje de fracción vegetal (DUNCAN *et al.*, 1993). De hecho, el NDVI obtenido a partir de imágenes de satélite es una excelente herramienta para

el seguimiento del estado de la vegetación y su dinámica temporal, aunque también plantea algunos problemas (VICENTE-SERRANO, 2004)

Para este trabajo se han utilizado dos tipos de imágenes. Por un lado, se empleó una serie de imágenes NOAA-AVHRR (1982 - 2000), con una resolución espacial de 1 Km, desarrollada por el laboratorio de Teledetección de la Universidad de Valladolid (LATUV) (ver detalles sobre la base de datos y el proceso de análisis en VICENTE-SERRANO *et al.*, 2004). Por otro lado, se emplearon imágenes Landsat-TM y ETM. El sensor TM a bordo de los satélites Landsat desde 1984 registra información multiespectral a una resolución espacial de 30 m. En concreto, se utilizaron dos imágenes Landsat de los veranos de 1984 y 2001, años con condiciones climáticas similares. Las imágenes fueron rectificadas geométricamente, corregidas atmosférica y topográficamente y normalizadas temporalmente mediante píxeles invariantes para garantizar su comparación temporal (ver VICENTE-SERRANO *et al.*, 2006).

4. Resultados y discusión

4.1. Discriminación espacial en el proceso de revegetación

En varios trabajos, que tienen como fuente de información fotografías aéreas de al menos dos fechas, se señala que desde mediados del siglo XX se asiste a un proceso generalizado de incremento de la cubierta vegetal, con el avance de matorrales y bosques (LASANTA *et al.*, 2000; POYATOS *et al.*, 2003; UBALDE *et al.*, 1999). En este proceso, las laderas medias y bajas son las áreas que experimentan un proceso de revegetación más intenso. El abandono del espacio agrícola y la ausencia o baja presión de pastoreo han llevado a una recuperación paulatina de la vegetación natural. También en los pastos subalpinos se asiste a la progresiva invasión por parte de matorrales y del pino negro. En las áreas ocupadas por el bosque tiene lugar sobre todo la densificación de la cubierta, si bien mucha laderas deben la expansión del bosque a los programas de reforestación llevados a cabo desde los años cuarenta (CHAUVELIER, 1990; IBARRA & DE LA RIVA, 1994).

Los mayores cambios tuvieron lugar entre los años sesenta y ochenta. En las dos últimas décadas la cubierta vegetal sigue progresando, aunque de forma menos evidente y a un ritmo muy diferente entre los usos del suelo. VICENTE-SERRANO *et al.*, (2003b) señalan que 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.

La figura 2 muestra la evolución del NDVI integrado anual en la cuenca alta del río Aragón, desde su nacimiento hasta el embalse de Yesa, entre 1982 y 2000 (ver detalles espaciales en VICENTE-SERRANO *et al.*, 2004). Esta serie se ha obtenido de la base de datos PAL-NDVI (disponible en <http://daac.gsfc.nasa.gov>), procedente de imágenes NOAA-AVHRR, con información mensual entre 1981 y 2000. La evolución temporal puede considerarse muy robusta, ya que la calibración de la serie es meticulosa (KAUFMANN *et al.*, 2000), siendo utilizada por distintos autores para estudios sobre la dinámica vegetal a escala global (SHABANOV *et al.*, 2002).

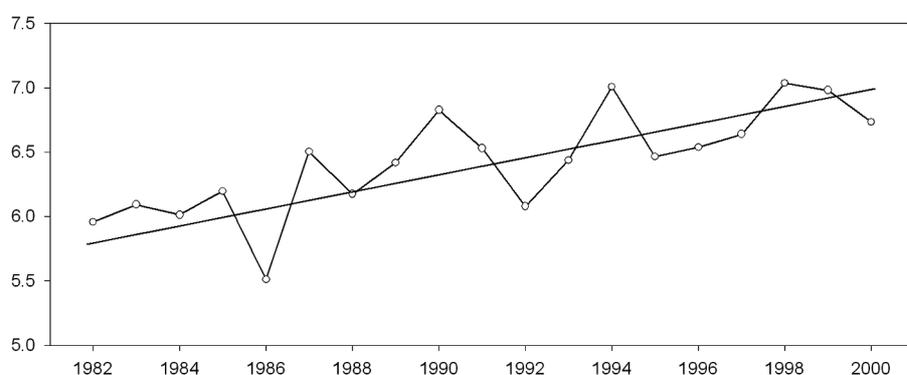


Figura 2. Evolución del NDVI acumulado anual en el conjunto de la cuenca alta del río Aragón entre 1982 y 2000, obtenido mediante imágenes NOAA-AVHRR.

Figure 2. Evolution of the annual NDVI in the Aragón river basin between 1982 and 2000 by means of NOAA-AVHRR images.

En la figura 2 se comprueba un importante incremento del NDVI, estadísticamente significativo (< 0.01), en el periodo analizado. Este hecho confirma el aumento de la biomasa/cubierta vegetal general durante las décadas de 1980 y 1990. Sin embargo, el crecimiento no es continuo, registrándose en algunos años (p.ej., 1986, 1992 y 1995) un descenso del NDVI en relación a la tendencia general. Esta variabilidad interna de la serie se puede asociar a diferencias interanuales en las condiciones climáticas, como se verá más adelante.

También durante las últimas décadas resultan muy importantes las diferencias espaciales en el NDVI. A partir de una serie anual procedente de imágenes NOAA-AVHRR se pudo analizar la dinámica vegetal de forma regionalizada en el área de estudio entre 1993 y 2000. La figura 3 muestra las áreas

en las que la tendencia en el incremento de la cubierta vegetal es estadísticamente significativa. La tendencia es positiva y significativa en 414 km², el 24% del área de estudio (tendencias calculadas mediante el test no paramétrico Rho de Spearman). Por el contrario, no se detectan áreas con tendencias negativas y estadísticamente significativas. Existen claros patrones espaciales en las tendencias del NDVI. Las áreas con tendencias significativas se localizan principalmente en la banda del flysch, coincidiendo con espacios de altitudes entre 1000 y 1600 m, sobre pendientes pronunciadas, en los que el abandono agrícola durante el siglo XX ha sido un proceso muy destacado.

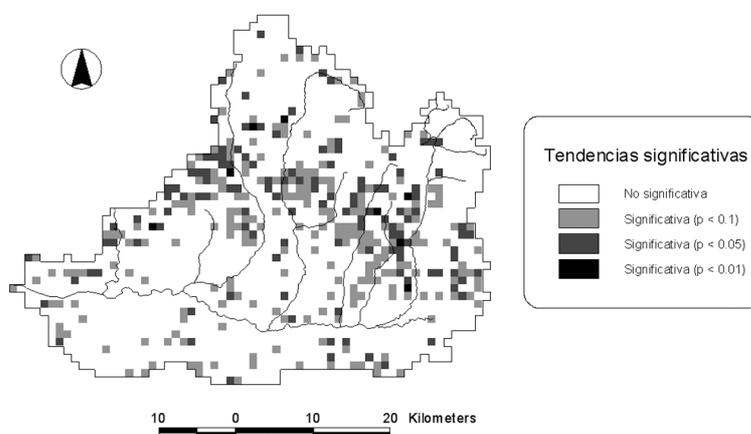


Figura 3: Distribución espacial de las tendencias en el NDVI acumulado anual entre 1993 y 2000 en la cuenca alta del río Aragón.

Figure 3. Spatial distribution of NDVI trends between 1993 and 2000 in the Aragón River basin.

Con índices de vegetación de más resolución espacial, imágenes Landsat-TM y ETM+, se ha comprobado que durante las dos últimas décadas el proceso de revegetación se ha ralentizado como consecuencia de una situación de mayor madurez en las comunidades vegetales, coexistiendo procesos de homogeneización y heterogeneización de la cubierta vegetal (VICENTE-SERRANO *et al.*, 2006).

En la figura 4 se incluye la distribución espacial del NDVI en los años 1984 y 2001. Las figuras superiores muestran aquellas áreas, localizadas por debajo de 1.600 m de altitud, con un valor de NDVI inferior a 0.6 en ambas fechas. Se comprueba que en 1984 las manchas eran más compactas y de mayor tamaño que en 2001. Además, en el interior de las mismas y, sobre todo, en los bordes aparecen espacios con valores de NDVI superiores.

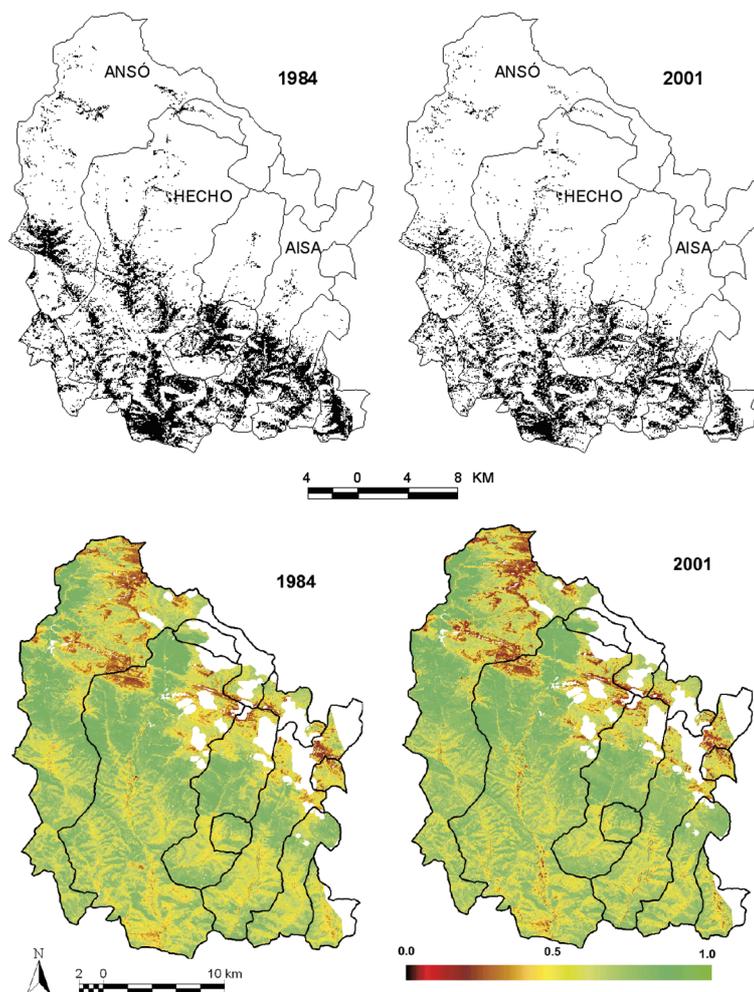


Figura 4. Valores de NDVI en agosto de 1984 y 2001 obtenidos a partir de imágenes Landsat-TM atmosférica y topográficamente corregidas. Las figuras superiores muestran resaltadas las áreas con un NDVI inferior a 0.6.

Figure 4. NDVI values in August of 1984 and 2001 obtained from Landsat-TM images. The upper figures show areas with NDVI lower than 0.6.

Los resultados quedan resumidos cuantitativamente en la tabla 2, en la que se incluye la superficie ocupada con valores de NDVI inferiores a 0,6 en 1984 y 2001, el número de teselas con dicho valor, y la superficie media por tesela. Se comprueba que la superficie ha disminuido notablemente entre

ambas fechas (16% del total), lo que implica que la actividad vegetal se ha incrementado en más áreas. Por el contrario, el número de teselas ha aumentado (34,8%). Los resultados muestran un proceso de fragmentación del paisaje, especialmente en el sector meridional, coincidiendo con áreas no boscosas. Aquí se han ido instalando progresivamente manchas de matorral y arbolado, que ocupan de forma dispersa los campos abandonados.

Tabla 2. Superficie, número de teselas y superficie media por tesela de las áreas con un NDVI inferior a 0,6 en agosto de 1984 y 2001, a partir de imágenes Landsat-TM.

Table 2. Surface, number of patches and average surface per patch in areas with NDVI lower than 0.6 in August of 1984 and 2001 obtained from Landsat-TM images.

	Superficie (ha)	Nº teselas	ha/tesela
1984	10446.1	5311	1.97
2001	8779.2	7161	1.23

La aplicación de coeficientes de variación móviles, a partir de los índices de vegetación y su análisis evolutivo, permite identificar aquellas zonas en las que se registra mayor variación en la cubierta vegetal (ver detalles de la metodología en VICENTE-SERRANO *et al.*, 2006). La tabla 3 muestra la diferencia entre el coeficiente de variación espacial de los valores de NDVI en varias cubiertas entre 2001 y 1984, tanto para el conjunto del área de estudio como para dos rangos altitudinales. Se observa que la principal heterogeneización vegetal (aumento de la variabilidad espacial y de los valores del coeficiente de variación) se registra en las áreas de menor elevación, pero sobre todo en zonas con vegetación esclerófila y en zonas de transición matorral/bosque. Estas cubiertas ocupan las áreas de antiguos campos de cultivo, que fueron abandonados a lo largo del siglo XX y que se encuentran en fases de sucesión muy diferentes (en función de la edad de abandono y de la gestión). Por el contrario, aquellas masas más maduras, como los bosques de coníferas ubicados a mayor altitud, muestran un proceso de homogeneización, fruto de la densificación de la cubierta, un proceso mucho más lento y menos brusco que las fases iniciales de sucesión (VICENTE-SERRANO *et al.*, 2003).

Tabla 3. Diferencia promedio en los valores del Coeficiente de Variación espacial del NDVI entre 2001 y 1984 en diferentes tipos de vegetación.

Table 3. Average difference of the spatial coefficient of variation from NDVI between 2001 and 1984 in different vegetation types.

Tipo de cubierta	Total	> 1200	< 1200
Bosques de frondosas	5.1	4.3	6.3
Bosques de coníferas	3.8	-0.7	7.2
Bosques mixtos	8.2	7.4	9.0
Vegetación esclerófila	16.3	8.0	17.3
Transición matorral/bosque	20.5	7.8	22.2

4.2. La sucesión vegetal en campos abandonados

Los resultados aportados hasta ahora ponen de relieve el importante papel del abandono agrícola en la recuperación de la cubierta vegetal, por lo que parece adecuado describir cómo es el proceso de sucesión en campos abandonados.

Inmediatamente después del abandono, los campos inician un proceso de recolonización vegetal o de sucesión secundaria por el que la vegetación natural trata de recuperar el espacio dejado por los cultivos. Esta ocupación se realiza en forma de etapas consecutivas y progresivamente más complejas que se escalonan en el tiempo con velocidad variable en función de las condiciones ambientales, la fertilidad de cada campo y la gestión previa y posterior al abandono (RUIZ FLAÑO, 1993).

Las plantas anuales, muy abundantes en el banco de semillas del suelo, donde habían permanecido como malas hierbas, son las primeras en invadir el campo, si bien son reemplazadas en un corto periodo de tiempo por plantas bianuales y otras de más larga vida (tres o cuatro años). En torno a los cuatro o cinco años se asiste a un cambio en la composición de las especies, siendo sustituidas las anuales y bianuales por plantas perennes que comienzan a convivir con pequeñas matas de *Genista scorpius* (aliaga) y *Rosa sp.*

Después de los 5-10 años comienza una fase caracterizada por la expansión de *Genista scorpius*, una leguminosa que de forma casi monoespecífica llega a dominar la superficie de los campos. El avance de la aliaga se produce desde el exterior de los campos hacia el interior a partir de la explosión de las vainas, penetrando cada año entre 1 y 2 m (MONTSERRAT, 1990). De forma simultánea los rosales aparecen de forma dispersa en el centro de los campos y en los márgenes. A los 25-30 años después del abandono la aliaga cubre la totalidad del campo y así permanece hasta los 50-60 años, momento en que algunos pies de aliaga mueren y se abren claros en los campos, que son

cubiertos progresivamente por comunidades más exigentes y evolucionadas de *Buxus sempervirens*, *Crataegus monogyna*, *Juniperus communis*,... En campos poco alterados y de más de 60 años aparecen ya algunos pinos (*Pinus sylvestris*), y poco más tarde pies de *Quercus*, comenzando a adquirir el aspecto de la vegetación natural previa a la deforestación y roturación. Debajo del dosel arbustivo permanece siempre una cubierta herbácea compuesta por *Brachypodium pinnatum*, *Carex flacca*, *Bromus erectus*, *Thymus vulgaris*, *Daucus carota*, *Plantago lanceolata*, entre otras especies (MOLINILLO *et al.*, 1997).

El desarrollo del esquema precedente implica necesariamente la existencia de coberturas vegetales de distinta densidad y composición (figura 5). La cubierta de arbustivas es creciente desde el inicio del abandono hasta los 40-50 años, edad en la que comienza un retroceso. Las herbáceas están siempre presentes en un alto porcentaje (valores mínimos del 45-50%). No obstante, su tendencia es descendente hasta los 25 años, aproximadamente, para inmediatamente después reiniciar su expansión y crear un denso estrato de herbáceas. Este esquema general presenta modificaciones en función de la topografía de las laderas, la fertilidad del suelo y el manejo de los campos abandonados. RUIZ FLAÑO (1993) señala que en parcelas abandonadas en barbecho o con rastrojo muy ralo o en laderas solanas rectas o de topografía convexa, la vegetación tiende a la clase *Ononido-Rosmarinetea* y a la alianza *Aphyllantion*, representadas por plantas de tipo mediterráneo y resistentes al estrés hídrico y térmico. Por el contrario, los campos situados en concavidades, con suelos profundos, con mayor capacidad para retener humedad, abandonados como prados de diente y frecuente pastoreo tienden a mantener vegetación de la clase *Festuco-Brometea*, en la que dominan herbáceas de interés para el pastoreo.

4.3. La evolución temporal: cambios de cubierta en el valle de Borau

A modo de ejemplo se señalan a continuación los rasgos más significativos del proceso de revegetación en el valle de Borau, que a lo largo del siglo XX perdió más del 80% de su población (465 habitantes censados en 1900 y 93 en 2000), siguiendo la tendencia de la mayor parte de los valles pirenaicos (CUESTA, 2001).

La figura 6 muestra la distribución espacial de las cubiertas del suelo en los años 1957 y 2000. En el año 1957 dominaban las áreas de matorral, fundamentalmente en las laderas de pendientes pronunciadas de las zonas bajas (a menos de 1200 m de altitud), coincidiendo en su mayor parte con campos abandonados (VICENTE-SERRANO, 2001). El espacio aún cultivado se localizaba en el fondo del río Lubierre y en las laderas bajas de pendientes suaves, apropiadas para el regadío y el laboreo con maquinaria. La mayor parte

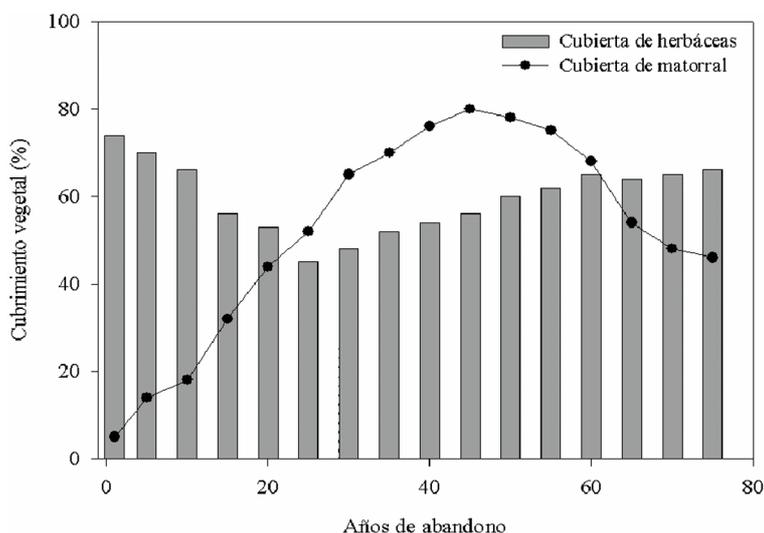


Figura 5. Evolución de la cubierta vegetal en campos abandonados.

Figure 5. Evolution of the vegetation cover in old fields.

del espacio agrícola tradicional ya se había abandonado para 1957, debido a la baja competitividad del cereal en campos de pronunciada pendiente, suelos pobres y pedregosos, fuertes limitaciones para la mecanización y una accesibilidad muy complicada (LASANTA, 1988), estando cubierto por matorrales de sucesión (MONTSERRAT, 1990). En 1957 la vegetación boscosa constituía la segunda cubierta del suelo por su extensión superficial. El 13,2% del valle estaba ocupado por bosques densos y un 11,4% por bosques claros. Por encima del bosque los pastos subalpinos y alpinos cubrían más del 15% de la superficie, compartiendo algunos sectores con matorrales y pino negro.

En el año 2000 dominan los bosques, ocupando en conjunto (la suma del bosque denso, bosque claro y bosque de repoblación) el 54,3% de la superficie del valle. El análisis secuencial de fotografías aéreas a lo largo de los últimos 50 años muestra el progresivo incremento y densificación de la cubierta vegetal, especialmente en los antiguos campos de cultivo que pasan por distintos estadios: matorral claro, matorral denso, bosque claro y bosque denso (LASANTA *et al.*, 2000). Al proceso de revegetación también ha contribuido notablemente la política de reforestación iniciada en los años cuarenta del siglo XX e impulsada en las décadas posteriores (ORTIGOSA *et al.*, 1990; CHAUVELIER, 1990).

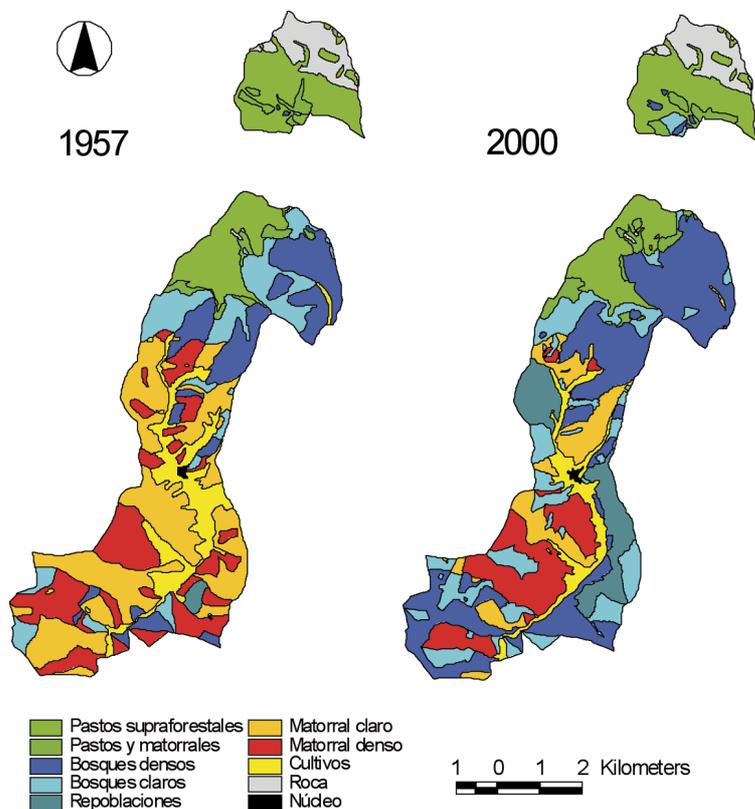


Figura 6. Distribución espacial de las cubiertas del suelo en el valle de Borau (Pirineo central español) en 1957 y 2000 obtenida mediante interpretación de fotogramas aéreos.

Figure 6. Spatial distribution of vegetation cover in the Borau valley in 1957 and 2000 obtained by means of aerial photographs.

La figura 7 resume los cambios en la cubierta vegetal en el valle del Borau entre 1957 y 2000. Los bosques pasaron de cubrir 1.059 ha en 1957 a ocupar 2.164 en el año 2000. En cambio, las áreas de matorral perdieron extensión de manera muy considerable, pasando de 1.738 ha en 1957 a 844 ha en 2000. El resto de cubiertas del suelo tuvieron cambios menos espectaculares, aunque se sigue asistiendo a una contracción del espacio cultivado (392 ha en 1957 frente a 215 en 2000) y a un descenso de la superficie ocupada por pastos supraforestales, que van siendo ocupados por matorrales en los sectores de menor elevación. El avance de los matorrales en este sector tiene especiales

implicaciones para la ganadería extensiva, ya que tiene lugar en el espacio que permite dilatar el periodo de pastoreo (inicio más temprano del periodo vegetativo y cubrimiento de nieve más tardío) (REMÓN, 1997).

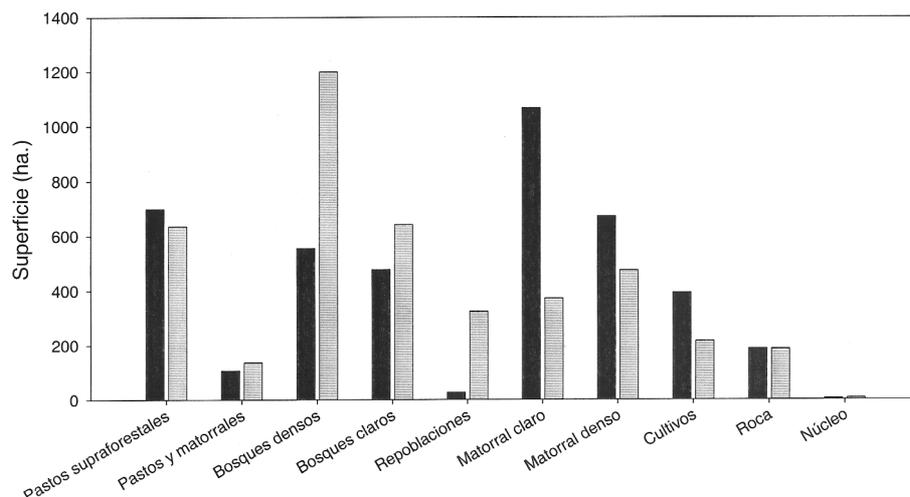


Figura 7. Superficie ocupada por las diferentes cubiertas del suelo en el valle de Borau los años 1957 (negro) y 2000 (gris).

Figure 7. Surface covered by the different cover types in the Borau valley in 1957 (black) and 2000 (gray).

4.4. Los ritmos temporales en los cambios de cubierta vegetal

Como se ha señalado más arriba, los cambios en la cubierta vegetal han sido muy importantes desde mediados del siglo XX. La mayor parte de las veces han tendido hacia el avance (sucesión) y en algunos casos hacia el retroceso. Ahora bien, no todas las áreas han cubierto el mismo número de pasos o fases, en gran parte debido a que el tiempo necesario para cubrir una fase es distinto en función del estadio en que se encuentra la cubierta vegetal. La figura 8 esquematiza los posibles cambios de cubierta vegetal. El paso de un estadio a su inmediato se ha valorado como +1, si se trata de sucesión, y -1, si se produce retroceso, incrementándose los valores a medida que el salto es mayor hasta alcanzar valores de -4 y +4 (ver detalles en LASANTA & VICENTE-SERRANO, 2006).

En el valle de Borau se comprobó que el 55% del territorio mantenía en 2000 la misma cubierta que en 1957. Correspondía básicamente a los pastos supraforestales, el bosque denso y a una parte del espacio cultivado. El 41,3%

del territorio experimentó una evolución positiva con incremento de la cubierta vegetal, correspondiendo el 25,7% a la sucesión de grado 1, el 14,2% a la sucesión de grado 2, el 1,3% a la sucesión de grado 3 y el 0,1% a la sucesión de grado 4. El retroceso en la cubierta vegetal sólo tuvo lugar en el 3,6% del territorio, coincidiendo con áreas muy localizadas de desbroces de matorral para generar pastos y, en menor medida, con pequeñas talas para extraer madera.

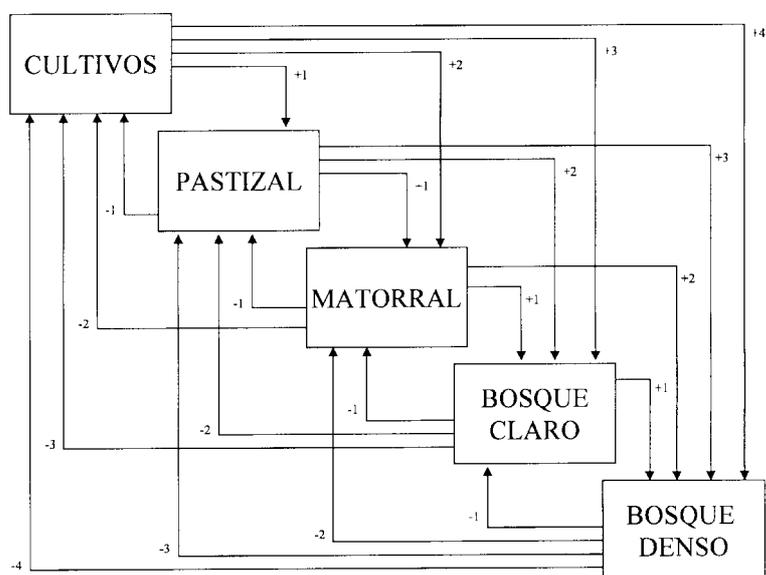


Figura 8. Fases en el proceso de sucesión vegetal observadas en el valle de Borau.
 Figure 8. Phases of vegetation succession observed in the Borau valley.

Dominan, pues, los procesos de sucesión sobre los de retroceso. Además, se comprueba que el ritmo de la sucesión ha sido bastante moderado (1 ó 2 estadios), como consecuencia de la lentitud de dicho proceso y del escaso tiempo transcurrido desde que se relajó la presión antropógena sobre el territorio. Por otro lado, hay que tener en cuenta que no todos los pasos en la sucesión vegetal necesitan el mismo tiempo. MOLINILLO *et al.*, (1997) comprobaron que el paso de un campo de cultivo a una cubierta herbácea o de pastizal es muy rápido (1-3 años). También lo es (20-30 años) de una cubierta herbácea a otra de matorral aclarado (pies aislados de rosales y aliagas) primero, y poco después de matorral muy denso de *Genista scorpius* y *Rosa sp.* Sin embar-

go, el posterior paso a un bosque aclarado cuesta mucho tiempo, siendo este salto el que más limita la sucesión vegetal temporalmente (VICENTE-SERRANO *et al.*, 2003).

4.5. Factores que condicionan las diferencias espaciales en los procesos de revegetación

Una serie de factores están condicionando el proceso de revegetación observado en el Pirineo español. El principal de ellos resulta evidente: los cambios socioeconómicos que han conducido a la marginación productiva y al abandono generalizado del espacio agrícola. No obstante, otros factores han incentivado también el incremento generalizado de la cubierta vegetal, entre ellos la gestión reciente. Por un lado, las repoblaciones forestales han favorecido el aumento del bosque de forma más rápida (CHAUVELIER, 1990; DE LA RIVA, 1997); por otro lado, la gestión ganadera ha implicado que los sectores muy pastoreados mantengan una cubierta herbácea, mientras que los poco visitados por el ganado se hayan visto inmersos en procesos de sucesión vegetal (LASANTA *et al.*, 2000 y 2005).

En el valle de Borau se analizó el papel que desempeñan varios factores topográficos y relacionados con la gestión reciente en las fases de sucesión vegetal entre 1957 y 2000 (Tabla 4). Respecto a la carga ganadera, se observa que las áreas con más presión son las que no han registrado cambios, mientras que la sucesión (fases 1 y 2) se ha producido en áreas con menos presión de ganado. Los espacios que reciben mayor radiación solar (solanas) son también los que experimentan menos cambios. Estos resultados manifiestan que el avance de las etapas seriales es muy lento, o no se produce, con el incremento de la presión ganadera y de la radiación solar incidente. Lógicamente el pastoreo del ganado es un factor de control destacado en el proceso de sucesión, como lo es la exposición. De ahí que las laderas solanas evolucionen más lentamente que las umbrías, porque la mayor radiación suele producir un mayor desecamiento de la humedad del suelo que somete a la vegetación a un estrés hídrico, que limita la presencia de especies o ralentiza su crecimiento. En este sentido, ERREA (2004) y SEEGER *et al.*, (2004), en estudios realizados también en el valle de Borau, señalan que la mayor/menor radiación, junto con el grado de cobertura vegetal, son los factores que más determinan la humedad del suelo. Además, hay que tener en cuenta que las laderas expuestas al sur se cultivaron mucho más que las umbrías (LASANTA, 1988), presentando los suelos todavía hoy un mayor déficit de fertilidad (consumo de nutrientes durante la fase de cultivo y pérdida de solutos por erosión tras el cese agrícola) como herencia de su uso pasado y el abandono.

Tabla 4. Relación entre los grados de cambio de cubierta vegetal y varias variables independientes.

Table 4. Relationship between the phases of vegetation change and different independent variables.

<i>Intensidad de los cambios</i>	<i>Carga ganadera (UGM)</i>	<i>Radiación solar (10 Kj/m²)</i>	<i>Elevación (m)</i>
Sin cambios	0,83	752561	1593
Sucesión 1	0,29	686776	1259
Sucesión 2	0,19	618307	1131
Retroceso 1	0,57	731421	1396
Retroceso 2	0,44	772547	1215

El proceso de sucesión vegetal (Tabla 5), como ya se señaló anteriormente, ha tenido que ver mucho con el uso del suelo, especialmente con los campos abandonados. En ellos, el 44% han dado un paso en la sucesión vegetal, el 34,1% dos pasos, y sólo el 20,8% siguen en el mismo estadio. Los pastos supraforestales, por el contrario, son los que menos han evolucionado.

Tabla 5. Relación entre los grados de cambio de cubierta vegetal y los usos del suelo en 1957. (Datos en %).

Table 5. Relationship between the phases of vegetation cover change and the land cover type in 1957 (Percentages).

<i>Gradación</i>	<i>Pastos supraforestales</i>	<i>Bosques</i>	<i>Campos abandonados</i>	<i>Cultivos</i>
Sin cambios	91,7	67,8	20,8	61
Sucesión 1	4	27,9	44	12,4
Sucesión 2	1,6	0	34,1	22,3
Retroceso 1	1,3	4,1	0,1	0
Retroceso 2	0	0,2	0	0

Considerando el conjunto de la cuenca alta del río Aragón, y mediante la utilización de imágenes NOAA-AVHRR, se ha observado que la magnitud de los cambios en el NDVI está también muy condicionada por el uso del suelo (VICENTE-SERRANO *et al.*, 2004). La tabla 6 muestra el porcentaje de superficie con ascenso significativo de los valores de NDVI en la década de 1990 en varios usos del suelo. Se comprueba que son las áreas de uso más extensivo, como los campos abandonados y los pastizales de laderas medias, las que registran mayor incremento de la actividad/biomasa vegetal. Por esta razón, se puede considerar que las actuales prácticas de gestión del territorio pueden llegar a determinar significativamente las tasas de crecimiento vegetal, al coincidir las áreas de uso más extensivo con las que registran tendencias más positivas.

Tabla 6. Porcentaje de la superficie ocupada por diferentes usos del suelo afectados por tendencias significativas y no significativas en la evolución del NDVI en la cuenca alta del río Aragón (1993-2000).

Table 6. Percentage of surface covered by different land uses affected by significant and non-significant in the evolution of NDVI in the river Aragón valley (1993-2000).

Uso del suelo	Tendencia no significativa	Tendencia significativa	Total
Pastos de verano (supraforestales)	84.26	15.74	100
Pastos utilizados el resto del año	75.32	24.68	100
Bosque maderero	80.15	19.85	100
Campos abandonados	69.20	30.80	100
Áreas cultivadas	83.80	16.20	100

Para explicar el reciente proceso de revegetación hay que tener también en cuenta los procesos de cambio climático. En el Pirineo se producen cambios en las condiciones pluviométricas (VICENTE-SERRANO *et al.*, 2007) y un aumento térmico suave, aunque continuado, durante las últimas décadas (LÓPEZ-MORENO, 2006). Diferentes estudios realizados a escalas continentales y globales muestran que la vegetación de zonas frías experimenta una tendencia hacia el aumento de su actividad y biomasa como respuesta al aumento térmico (SHABANOV *et al.*, 2000; MINENY *et al.*, 1997; SLAYBACK *et al.*, 2003). En la cuenca alta del río Aragón se ha comprobado que los valores de NDVI registrados cada año están muy condicionados por las condiciones térmicas, de tal modo que existe una correlación positiva y significativa entre ambos parámetros ($r = 0.57$). Este hecho parece indicar que el aumento térmico favorece una mayor actividad vegetal y, por lo tanto, unos procesos de sucesión vegetal más rápidos, sobre todo en ambientes climáticos en los que no existe limitación hídrica, como es el caso del Pirineo (Figura 9).

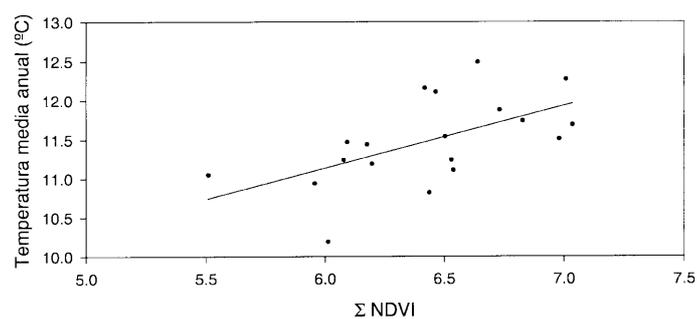


Figura 9. Relación entre el NDVI anual y la temperatura media anual en la cuenca alta del río Aragón.

Figure 9. Relationship between the annual NDVI and the average temperature in the Aragón River basin.

La previsión de los modelos de cambio climático apuntan a un notable incremento térmico a finales del siglo XXI (LÓPEZ-MORENO *et al.*, 2007; NOGUÉS *et al.*, 2007), lo que se traduciría en una densificación mayor de la cubierta vegetal y un incremento de la biomasa y actividad vegetal. No obstante, el posible cambio climático también trae incertidumbres en ese sentido, pues junto al aumento térmico también se predice un descenso pluviométrico (VICENTE-SERRANO *et al.*, 2007), lo que podría dar lugar a un descenso en las disponibilidades hídricas por parte de la vegetación. En este caso el aumento térmico posiblemente tendería a ralentizar los procesos de producción vegetal.

Conclusiones

A lo largo del siglo XX, aunque con especial intensidad en la segunda mitad, en el Pirineo español se asiste a un proceso de profunda marginación de las actividades primarias, con abandono de las laderas agrícolas, disminución muy acusada de la presión ganadera y subexplotación de los bosques. En estas condiciones se ha producido un proceso de revegetación muy importante, con avances significativos de los matorrales de sucesión y de los bosques de pinos y robles, fundamentalmente. Así, en el valle de Borau, el bosque pasó de ocupar 1.059 ha en 1957 a 2.271 ha (el 54,3% de la extensión del Valle) en 2000, mientras que el espacio agrícola pasó de ocupar el 43% en 1957 al 4,7% en 2000.

En el mismo valle, se pudo comprobar que el 45% del territorio cambió de cubierta vegetal, dominando los procesos de sucesión sobre los de retroceso. Estos últimos tuvieron lugar en sectores muy localizados, coincidiendo con pequeñas talas o desbroces para regenerar pastizales. Por el contrario, los procesos de sucesión ocupan amplios espacios, caracterizándose –además– por presentar avances relativamente moderados (1 ó 2 estadios). A ello ha contribuido el poco tiempo transcurrido desde que se relajó la presión humana sobre el territorio, dado que son procesos lentos, especialmente el paso de una cubierta de matorral a otra de bosque (MOLINILLO *et al.*, 1997).

En el proceso de revegetación, la topografía ha tenido cierta importancia, aunque inferior a las cuestiones socioeconómicas, especialmente las políticas de reforestación, la extensificación ganadera y el abandono agrícola. De hecho, los factores topográficos solamente explican por sí solos el 26% de los cambios de cubierta en el valle de Borau; entre ellos, el más influyente es la exposición, mostrando un claro contraste entre las solanas (de evolución lenta) y las umbrías, que presentan ritmos mucho más rápidos en función de su menor estrés hídrico. Por el contrario, la gestión ganadera explica el 40,1%

de la evolución vegetal; las áreas pastoreadas frecuentemente (prados y pastos supraforestales) mantienen una cubierta herbácea, mientras que las laderas bajas (campos abandonados y áreas próximas) experimentan un proceso de revegetación vegetal intenso (LASANTA *et al.*, 2000). En el trabajo también se apunta que, posiblemente, el ligero calentamiento durante las últimas décadas haya contribuido a acelerar los procesos de revegetación, al igual que ha ocurrido en otras áreas (KAWABATA *et al.*, 2001; LUCHT *et al.*, 2002).

El espacio que ha experimentado más cambios de vegetación coincide con el utilizado tradicionalmente por el hombre de forma más intensiva y marginado en la segunda mitad del siglo XX. El abandono de campos de cultivo, con ausencia de pastoreo o con muy baja carga, ha favorecido procesos de sucesión vegetal, caracterizados por la invasión inicial de herbáceas y matorrales, y más tarde por un estrato arbóreo de *Pinus sylvestris* y *Quercus*.

Los cambios más importantes tuvieron lugar entre los años cincuenta y ochenta, siendo aparentemente menos intensos durante las dos últimas décadas. VICENTE-SERRANO (2001) pone de manifiesto que en el valle de Borau entre 1957 y 1981 el matorral había progresado mucho en el 13,9% del territorio, pasando de estadios con bajo cubrimiento (campos de cultivo y campos abandonados con poco matorral) a una cubierta densa de matorral, mientras que en el 20,1% del territorio se había pasado de una cubierta de matorral a otra de bosque. Desde 1981 el proceso continúa, aunque los cambios son menos evidentes si se analizan con fotografía aérea. De hecho, el mismo autor señala que apenas existen cambios entre 1990 y 2000. No obstante, a partir de imágenes de satélite se ha podido comprobar que la vegetación sigue progresando, aunque a un ritmo más lento. Los campos abandonados presentan el mayor incremento de NDVI, seguidos por las áreas de matorral y los bosques, mientras que los menores incrementos tienen lugar en los sectores de muy escasa o nula vegetación, en el espacio cultivado y en los pastos supraforestales (VICENTE-SERRANO *et al.*, 2003).

Un hecho interesante a destacar es que durante las dos últimas décadas los cambios de vegetación contribuyen en unos casos a homogeneizar la cubierta vegetal y en otros a su heterogeneización. La homogeneización tiene lugar principalmente en bosques maduros, en los que se asiste a su densificación, mientras que los procesos de heterogeneización ocurren sobre todo en campos abandonados, que presentan cubiertas muy variadas en función de la edad de abandono, la gestión y sus condiciones naturales.

De las páginas precedentes también se concluye que el uso de distintas herramientas (muestreos en parcelas, fotografías aéreas de varias fechas e imágenes de satélite) contribuye a explicar mejor la complejidad de los procesos de cambio de cubierta vegetal, a distintas escalas espaciales y temporales. Cada una de ellas aporta diferente información y presenta limitaciones,

mientras que el uso conjunto ayuda a superar algunas de las limitaciones. Los muestreos permiten trabajar a escala de especies y valorar la influencia de la fertilidad y la microtopografía. La fotografía aérea amplía la superficie de estudio a escalas medias y permite estudios con una escala temporal más dilatada (más de 50 años). Las imágenes de satélite son muy apropiadas para estudiar cambios de vegetación en amplios espacios, pero hasta el momento el periodo temporal no va más allá de los veinticinco años.

En definitiva, los resultados obtenidos en el Pirineo inciden en el importante papel de la gestión en la evolución de la cubierta 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 muestran mayores incrementos de vegetación. Ello fue muy evidente entre los años cincuenta y ochenta, pero también –aunque a menor escala–, en las dos últimas décadas, ya que registran las tendencias positivas de NDVI más significativas. Por el contrario, las áreas de uso más intensivo en la actualidad (espacio agrícola y pastos supraforestales) han cambiado poco, registrando en los valores de NDVI más bajos.

Agradecimientos

Este trabajo ha contado con la financiación de los siguientes proyectos: CGL2005-04508/BOS, CGL2005-04863/CLI y CGL2006-11619HID, financiados por la CICYT y FEDER, PIP176/2005 y Programa de grupos de investigación consolidados financiados por el Gobierno de Aragón (BOA 48, 20-04-2005).

Referencias

- ANGLADA, S., BALCELLS, E., CREUS, J., GARCÍA-RUIZ, J.M., MARTÍ, C. & PUIGDEFÁBREGAS, J. (1980). *La vida rural en la montaña española. Orientaciones para su promoción*. Instituto de Estudios Pirenaicos, 107: 133 pp., Jaca.
- BALCELLS, E. (1983). Evolución socioeconómica reciente de tres comunidades comarcales pirenaicas y destino actual de las superficies más productivas de su demarcación. *Cuadernos de Investigación Geográfica* 9: 41-82.
- BALCELLS, E. (1985). Reciente transformación de la cabaña ganadera. *III Coloquio Nacional de Geografía Agraria*. Asociación de Geógrafos Españoles: 163-237, Cáceres.

- BARET, F. & GUYOT, G. (1991). Potential and limits of vegetation indices for LAI and APAR assessment. *Remote Sensing of Environment* 35: 161-173.
- CARLSON, T. N. & RIPLEY, D.A. (1997). On the relation between NDVI, fractional vegetation cover, and leaf area index. *Remote Sensing of Environment* 62: 241-252.
- CREUS, J. (1983). *El clima del Alto Aragón Occidental*. Monografías del Instituto de Estudios Pirenaicos, 109: 233 pp., Jaca.
- CUESTA, J. M. (2001). *La despoblación del Sobrarbe ¿Crisis demográfica o regulación?.* CEDDAR: 505 pp., Zaragoza.
- CHAUVELIER, F. (1990). *La repoblación forestal en la provincia de Huesca y sus impactos geográficos*. Instituto de Estudios Altoaragoneses: 164 pp., Huesca.
- DAUMAS, M. (1976). *La vie rurale dans le Haut. Aragon Oriental*. CSIC : 774 pp., Madrid.
- DE LA RIVA, J. (1997). *Los montes de la Jacetania. Caracterización física y explotación forestal*. Publicaciones del Consejo de Protección de la Naturaleza de Aragón. Serie Investigación, 10: 358 pp., Zaragoza.
- DUNCAN, J., STOW, D. FRANKLIN, D. & HOPE, A. (1993). Assessing the relationship between spectral vegetation indices and shrub cover in the Jordana Basin, New Mexico. *Internacional Journal of Remote Sensing* 14: 3395-3416.
- ERREA, M.P. (2004). Factores que controlan la humedad del suelo en una cuenca de campos abandonados del Pirineo Central. En: *Territorio y Medio Ambiente. Métodos cuantitativos y técnicas de información geográfica* (C. Conesa y J.B. Martínez Guevara, Eds). Universidad de Murcia: 165-176, Murcia.
- ESTEVA, CL. (1971). Para una teoría de la aculturación en el Alto Aragón. *Etnica. Revista de Antropología* 2: 9-79.
- GALLART, F. & LLORENS, P. (2003). Catchment management under environmental change: Impact of land cover on water resources. *Water Internatio-nal* 28: 334-340.
- GARCÍA-RUIZ, J.M. (1988). La evolución de la agricultura de montaña y sus efectos sobre la dinámica del paisaje. *Revista de Estudios Agro-Sociales* 146: 7-37.
- GARCÍA-RUIZ, J.M. & BALCELLS, E. (1978). Tendencias actuales en la ganadería del Alto Aragón. *Estudios Geográficos* 153: 539-560.
- GARCÍA-RUIZ, J.M. & LASANTA, T. (1990). Land use changes in the Spanish Pyrenees. *Mountain Research and Development* 10: 201-214.
- GARCÍA-RUIZ, J.M. & LASANTA, T. (1993). Land use conflicts as a result of land use changes in the Central Spanish Pyrenees. *Mountain Research and Development* 13: 295-304.

- GARCÍA-RUIZ, J.M. & VALERO, B. (1998): Historical geomorphic processes and human activities in the Central Spanish Pyrenees. *Mountain Research and Development* 18: 309-320.
- GUTMAN, G. (1991). Vegetation indices from AVHRR: an update and future prospects. *Remote Sensing of Environment* 35: 121-136.
- HEWITT, K. (1992). Mountain Hazards. *Geo-Journal* 27: 47-60.
- IBARRA, P. & DE LA RIVA, J. (1994): Dinámica de la cubierta del suelo como resultado de la despoblación y de la intervención del Estado: el Valle de la Garcipollera (Huesca). En: *Pueblos abandonados ¿un mundo perdido?* (J.L. Acín Fanlo y V. Pinilla, Eds). Rolde de Estudios Altoaragoneses: 117-140 pp., Zaragoza.
- KAUFMANN, R.K., ZHOU, L, SHABANOV, N.V., MINNENY, R.B. & TUCKER, C.J. (2000). Effects of orbital drift and sensor changes on time series of AVHRR vegetation index data. *IEEE Transactions in Geoscience and Remote Sensing*, 38 2584-2597.
- KAWABATA, A., ICHII, K, & YAMAGUCHI, Y. (2001). Global monitoring of interannual changes in vegetation activities using NDVI and its relationships to temperatura and precipitation. *International Journal of Remote Sensing* 22: 1377-1382.
- KERGOAT, L. (1998). A model for hydrological equilibrium of leaf area index on a global scale. *Journal of Hydrology* 212: 268-286.
- KNIPLING, E.B. (1970). Physical and physiological basis for the reflectance of visible and near infrared radiation from vegetation. *Remote Sensing of Environment* 1: 155-159.
- LASANTA, T. (1988). The process of desertion of cultivated areas in the Central Spanish Pyrenees. *Pirineos* 132: 15-36.
- LASANTA, T. (1990). Tendances actuelles de l'organisation spatiale des montagnes espagnoles. *Annales de Géographie* 551: 51-71.
- LASANTA, T. (2002). Los sistemas de gestión en el Pirineo Central español durante el siglo XX: del aprovechamiento global de los recursos a la descoordinación espacial en los usos del suelo. *Ager* 2: 173-195.
- LASANTA, T. (2005): Gestion des champs abandonnés pour le développement de l'élevage extensif dans les Pyrénées Centrales espagnoles. *Sud-Ouest Européen* 19: 38-51.
- LASANTA, T. (2007): El paisaje de la montaña mediterránea: cambios por el abandono de tierras agrícolas. *Cuadernos de la Sostenibilidad*. Banco de Santander. En prensa.
- LASANTA, T., VICENTE-SERRANO, S.M. & CUADRAT, 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 Asociación de Geógrafos Españoles* 29: 5-28.

- LASANTA, T., VICENTE-SERRANO, S.M., SFERI, E. & GONZÁLEZ-HIDALGO, J.C. (2004): Cambios de uso del suelo para mejorar la gestión de pastos en el Pirineo: Una evaluación de escenarios de cambio mediante teledetección y SIG. En: *¿Qué futuro para los espacios rurales?*. Asociación de Geógrafos Españoles: 91-102, León.
- LASANTA, T., VICENTE SERRANO, S.M. & CUADRAT, J.M. (2005). Spatial-temporal variability of the plant landscape in the mediterranean highlands due to the abandonment of traditional land uses: a study of the Spanish Central Pyrenees. *Applied Geography* 25: 47-65.
- LASANTA, T. & VICENTE-SERRANO, S.M. (2006). Factores en la variabilidad espacial de los cambios de cubierta vegetal en el Pirineo. *Cuadernos de Investigación Geográfica*, 32: 57-80.
- LÓPEZ-MORENO, J.I. (2006). *Cambio ambiental y gestión de los embalses en el Pirineo central español*. Consejo de Protección de la Naturaleza. Zaragoza. 208 pp.
- LÓPEZ-MORENO, J.I., GOYETTE, S. & BENISTON M. (2007). Climate change prediction over complex areas: spatial variability of uncertainties and expected changes over the Pyrenees from a set of regional climate models. *International Journal of Climatology*. En revision.
- LUCHT, W., PRENTICE, I.C., MYNENI, R.B., SITCH, S., FRIEDLINGSTEIN, P., CRAMER, W., BOUSQUET, P., BUERMANN, W. & SMITH, B. (2002): Climatic control of the high-latitude vegetation greening trend and Pinatubo effect. *Science* 296: 1687-1689.
- MYNENI, R. B., KEELING, C. D., TUCKER, C. J., ASRAR, G. & NEMANI, R.R. (1997). Increase plant growth in the northern high latitudes from 1981-1991. *Nature* 386: 698-702.
- MOLINILLO, M., LASANTA, T. & GARCÍA-RUIZ, J.M., (1997). Managing mountainous degraded landscapes after farmland abandonment in the Central Spanish Pyrenees. *Environmental Management* 21: 587-598.
- MONTSERRAT, G. (1990). Estudio de la colonización vegetal de los campos abandonados del valle de Aísa (Jaca, Huesca). Informe del Proyecto LUC-DEME: *Erosión y colonización vegetal en campos abandonados*; 77 pp., Jaca.
- MONTSERRAT, J. (1992). *Evolución glacial y postglacial del clima y la vegetación en la vertiente sur del Pirineo: estudio palinológico*. Momografías del Instituto de Estudios Pirenaicos, 6: 149 pp., Jaca.
- NOGUÉS-BRAVO, D., ARAÚJO, M.B., MARTINEZ-RICA, J.P. & ERREA, M.P. (2007). Exposure of global mountain systems to climate change. *Global Environmental Change* 17: 420-428.
- ORTIGOSA, L., GARCÍA-RUIZ, J.M. & GIL, E. (1990). Land reclamation by reforestation in the Central Pyrenees. *Mountain Research and Development* 10: 281-288.

- POYATOS, R., LATRON, J. & LLORENS, P. (2003). Land use and land cover change after farmland abandonment. The case of a Mediterranean Mountain area (Catalan Pre-Pyrenees). *Mountain Research and Development* 23: 362-368.
- PUEYO, Y. & BEGUERÍA, S. (2007). Modelling the rate of secondary succession after farmland abandonment in a Mediterranean mountain area. *Landscape and Urban Planning*, en prensa.
- PREISS, E., MARTIN, J.L. & DEBUSCHE, M. (1997). Rural depopulation and recent landscape changes in a Mediterranean region: consequences to the breeding avifauna. *Landscape Ecology* 12: 51-61.
- PUIGDEFABREGAS, J. & BALCELLS, E. (1970). Relaciones entre la organización social y la explotación del territorio en el Valle del Roncal (Navarra Oriental). *Pirineos* 98: 53-89.
- REMON, J.L. (1997). *Estructura y producción de pastos en el Alto Pirineo Occidental*. Tesis Doctoral. Universidad de Navarra.
- ROMERO-CALCERRADA, R. & PERRY, G.L.W. (2003). The role of land abandonment in landscape dynamics in the SPA "Encinares del río Alberche y Cofío", Central Spain, 1984-1999. *Landscape and Urban Planning* 66: 217-232.
- RUIZ FLAÑO, P. (1993). *Procesos de erosión en campos abandonados del Pirineo*. Geoforma Ediciones: 191 pp., Logroño.
- SEEGER, M., ERREA, M.P., BEGUERÍA, S., ARNÁEZ, J., MARTÍ, C. & GARCÍA-RUIZ, J.M. (2004). Catchment soil moisture and rainfall characteristics as determinant factors for discharge/suspended sediment hysteretic loops in a small headwater catchment in the Spanish Pyrenees. *Journal of Hydrology* 288: 299-311.
- SHABANOV, N.V., ZHOU, L., KNYAZIKHIN, Y., MYNENI, R.B. & TUCKER, C.J. (2002). Analysis of interannual changes in northern vegetation activity observed in AVHRR data from 1981 to 1994. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing* 40: 115-130.
- SHABANOV, N. V., ZHOU, L., KNYAZIKHIN, Y., MYNENI, R.B. & TUCKER, C.J. (2002). Analysis of interannual changes in northern vegetation activity observed in AVHRR data from 1981 to 1994. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing* 40: 115-130.
- SLAYBACK, D.A., PINZON, J.E., LOS, S.O. & TUCKER, C.J. (2003). Northern hemisphere photosynthetic trends 1982-99. *Global Change Biology* 9: 1-15.
- SUÁREZ, S., OSBORNE, P.E. & BAUDRY, J. (2002). Responses of birds of different biogeographic origins and habitat requirements to land abandonment in Northern Spain. *Biological Conservation* 105: 333-344.
- TUCKER, C.J. (1979). Red and photographic infrared linear combinations for monitoring vegetation. *Remote Sensing of Environment* 8: 127-150.

- TUCKER, C.J., VAMPRAET, C., BOERWINKEL, E. & GASTON, A. (1983). Satellite remote sensing of total dry matter accumulation in winter wheat. *Remote Sensing of Environment* 13: 461-474.
- UBALDE, J.M., RIUS, J. & POCH, R.M., (1999). Monitorización de los cambios de uso del suelo en la cabecera de cuenca de la Ribera Salada mediante fotografía aérea y S.I.G. (El Solsonés, Lleida, España). *Pirineos* 153-154: 101-122.
- VAN WIJNGAARDEN, W. (1991). The green cover of the Herat: a dynamic resource in a changing environment. *ITC Journal* 1991-3: 113-121.
- VÁZQUEZ, A. & MORENO, J.M. (2001). Spatial distribution of forest fires in Sierra de Gredos (Central Spain). *Forest Ecology Management* 147: 55-65.
- 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. (2004). Evolución espacio-temporal de las sequías en el sector central del valle del Ebro: causas y consecuencias ambientales. Tesis doctoral. Departamento de Geografía. Universidad de Zaragoza.
- VICENTE-SERRANO, S.M., LASANTA, T. & CUADRAT, J.M. (2000). Influencia de la ganadería en la evolución del riesgo de incendio en función de la vegetación en un área de montaña: el ejemplo del valle de Borau (Pirineo Aragonés). *Geographica* 38: 33-58.
- VICENTE-SERRANO, S.M., LASANTA, T. & CUADRAT, J.M. (2003): Diferencias espaciales en el proceso de revegetación: Influencia de los factores ambientales y de la gestión en el Pirineo Central. En: *El cambio de uso del suelo y la degradación del territorio en España* (I. Marzolff, J. Ries, J. de la Riva y M. Seeger, Eds). Universidad de Frankfurt am Main y Universidad de Zaragoza: 31-46, Zaragoza.
- VICENTE-SERRANO, S.M., LASANTA, T. & ROMO, A. (2003b): Diferencias espaciales en la evolución del NDVI en la cuenca alta del Aragón: efectos de los cambios en el uso del suelo. *Cuadernos de Investigación Geográfica* 29: 51-66.
- VICENTE-SERRANO, S.M., LASANTA, T. & ROMO, A. (2004). Influencia de la topografía en la estacionalidad de la actividad vegetal. Análisis en el Pirineo Occidental Aragonés a partir de imágenes NOAA-AVHRR. *Boletín de la Asociación de Geógrafos Españoles* 38: 175-197.
- VICENTE-SERRANO, S.M., LASANTA, T. & ROMO, A. (2004). Analysis of spatial and temporal evolution of vegetation cover in the Spanish Central Pyrenees: Role of Human Management. *Environmental Management* 34: 802-818.

- VICENTE-SERRANO, S.M., BEGUERÍA, S. & LASANTA, T. (2006): Diversidad espacial de la actividad vegetal en campos abandonados del Pirineo Central español: análisis de los procesos de sucesión mediante imágenes Landsat (1984-2001). *Pirineos* 161: 59-84.
- VICENTE-SERRANO, S.M., LÓPEZ-MORENO, J.I. & BEGUERÍA, S. (2007). Las precipitaciones en el Pirineo español: diversidad espacial en las tendencias y escenarios futuros. *Pirineos* (en prensa).
- VILLAR, L. & BENITO, J.L. (2001). Vegetación. En: *El medio físico y su peligrosidad en un sector del Pirineo Central* (S. Rios Ed.). Publicaciones del Instituto Geológico y Minero de España. Serie Medio Ambiente, 1: 47-54, Madrid.
- WYLIE, B.K., MEYER, D.J., TIESZEN, L.L. & MANNEL, S. (2002). Satellite mapping of surface biophysical parameters at the biome scale over the north american grasslands. A case study. *Remote Sensing of Environment* 79: 266-278.
- VOS, W. & MEEKES, H. (1999). Trends in European cultural landscape development: perspectivas for a sustainable future. *Landscape and Urban Planning* 46: 3-14.
- ZENG, J., NEELIN, D., LAN, K.M. & TUCKER, C.J. (1999). Enhancement of interdecadal climate variability in the Sahel by vegetation interaction. *Science*, 286: 1537-1740.