

**ESTADO COMPARATIVO DE LAS MASAS  
DE *PINUS UNCINATA* RAM. POTENCIALMENTE  
PROTECTORAS FRENTE A ALUDES DE UNA ZONA  
DE ANDORRA Y DE CATALUÑA**

*Comparative state of the status of Pinus uncinata Ram.  
Potentially protective against snow of a zone Andorra  
and Catalonia (NE of Spain)*

R. BLANCO<sup>1</sup>, J. PEMÁN<sup>1</sup>, F. RODRÍGUEZ<sup>2</sup> & Á. AUNÓS<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Dpto. de Producción Vegetal y Ciencia Forestal. ETSEA. Universidad de Lleida.  
C/Rovira Roure, 191 - 25198 Lleida, España. aaunos@pvcf.udl.es  
<sup>2</sup> Fundación Cesefor. Pol. Ind. Las Casas, Calle/C, Parcela 4 - 42004 Soria, España

*RESUMEN.*– Se aborda el estudio comparativo entre las masas de *Pinus uncinata* Ram., localizadas en la parroquia La Massana de Andorra y en el Pirineo catalán, desde la perspectiva de su potencial papel protector frente a aludes. La base de datos dasométricos se obtuvo, en el primer caso, de un inventario ad hoc, y en el segundo, de la información proporcionada por el Tercer Inventario Forestal Nacional. Los resultados sugieren que las masas de ambos entornos geográficos ofrecen aspectos comunes en cuanto a que muestran tendencia hacia la irregularidad, con una regeneración no ligada a las otras variables de masa y con una espesura poco condicionada por el gradiente altitudinal y que escasamente incide en la mortalidad. Las diferencias advertidas se centran en que en las masas de Cataluña se aprecia menores niveles de espesura, aunque aparecen estructuras capitalizadas en existencias volumétricas ausentes en Andorra, y que de modo general, ofrecen peores características en cuanto a su papel protector frente al desencadenamiento de avalanchas.

**Palabras clave:** Pirineos, análisis multivariante, distribución diamétrica, espesura, mortalidad.

*ABSTRACT.*– A comparative study was carried out among stands of *Pinus uncinata* Ram. located, respectively, in La Massana (Andorra) and in the Catalanian Pyrenees, and give these sites an important role against snow avalanches. To check

*if there exist some differential attributes between Andorran and Catalanian sites, a dendrometric database was generated from sampling (Andorra) and from the information provided by the Third Forest National Inventory (Catalonian Pyrenees). As for their tendency towards uneven-aged stand structure, both geographical regions are quite similar. In fact, stand regeneration is not associated to other stocking variables, and stand stocking is not closely linked to the altitudinal gradient (which little affects mortality). However, Catalanian stands have shown less stocking and, in general, they offer worse characteristics for their protective role against avalanches compared with the Andorran stands.*

**Keywords:** Pyrenees, multivariate analysis, diameter distribution, stocking, mortality.

## 1. Introducción

Los bosques ejercen un papel protector de primer orden en lo referente a evitar el desencadenamiento de avalanchas de nieve, siendo la espesura creciente de la masa, tanto a nivel del recubrimiento de las copas del arbolado sobre el suelo como sobre todo por la aportación de los troncos (en número y dimensión), el aspecto que más contribuye. El grado de cumplimiento de esa función viene condicionado, no obstante, además de por la espesura, también por otros componentes estructurales del rodal que van evolucionando a lo largo del tiempo y bajo perturbaciones de todo tipo (Vacchiano *et al.*, 2008), especialmente aquellas ligadas al uso del suelo (Motta y Lingua, 2005; Chauchard *et al.*, 2007). Factores fisiográficos como una pendiente transversal superior a 50° favorecen el inicio del alud (Northwest Weather y Avalanche Center, 2003). El cambio climático incide también sobre ese rol protector, y no solamente a través de la modificación que puede inducir en la estructura del rodal, sino porque el eventual incremento de temperaturas ocasionará transformaciones en el manto nival, en el metamorfismo de la nieve y por ende, en el régimen de avalanchas (Furdada, 2006).

Desde esa perspectiva, la gestión selvícola debe orientarse a mantener un nivel adecuado de espesura y potenciar los mecanismos de persistencia y sostenibilidad del rodal (resiliencia, estabilidad y adaptabilidad) y para lo cual es necesario conocer su estado previo (Kräuchi *et al.*, 2000; Bachofen y Zingg, 2001). Las masas de estructura irregular, que además frecuentemente son mixtas, ofrecen elementos positivos respecto a los atributos anteriores y en consecuencia se consideran óptimas para la función protectora descrita (Ott *et al.*, 1997; Motta y Haudemand, 2000). Su estructura se formaliza a través de la distribución diamétrica de los pies y el equilibrio óptimo se expresa en la conocida curva de J-invertida.

La caracterización de las estructuras boscosas en cuanto a su función protectora frente a riesgos naturales se ha venido desarrollando principalmente en los Alpes bajo la forma de tipologías, unas fundamentadas en las fases silvogenéticas (Chauvin *et al.*, 1994; Renaud *et al.*, 1994; Leclerc *et al.*, 1998; Gauquelin y Courbaud, 2006), y otras a través de claves binarias para facilitar la valoración de los diferentes tipos (Bebi *et al.*, 2001).

Al objeto de poder diagnosticar la funcionalidad de las masas arboladas de Andorra como fijadoras del manto de nieve, Solé *et al.* (2009) elaboraron una tipología de enfoque silvogenético, donde se identifican trece tipos estructurales distintos en relación a su papel protector frente a los aludes. El ámbito de aplicación de la tipología se restringe a zonas con presencia de vegetación arbolada de suficiente entidad como para ser generadora de rugosidad (Schönenberger *et al.*, 2005), y localizadas sobre terrenos con pendiente transversal entre 25° y 50° y por encima de 1.800 m de altitud, que corresponde a la isoterma de los 0°C en invierno para el territorio andorrano (Furdada, 1996).

En la vertiente meridional de los Pirineos, las avalanchas de nieve normalmente se inician en zonas que corresponden a los pisos bioclimáticos de vegetación subalpino y alpino, siendo *Pinus uncinata* Ram. la especie arbórea dominante del primero de aquellos. El pino negro ocupa en España cerca de 60.000 ha (55,9% monoespecíficas), con las mejores calidades productivas localizadas entre los 1.400-1.600 m de altitud en umbrías y 1.800-2.200 m en solanas, y donde solamente el 23,3% de las masas monoespecíficas se encuentran en espesuras medias y altas (Calama *et al.*, 2004). El 75% de esa extensión corresponde a Cataluña (45.000 ha), advirtiéndose en ciertas comarcas una franca expansión (en superficie y espesura) desde el año 1956 (Améztegui *et al.*, 2010).

Los intentos de sistematización selvícola de las masas de pino negro del Pirineo español han sido abordados, aunque sin vincularlas a la faceta protectora, por González (2008) y Martín-Alcón *et al.* (2012).

La tipología desarrollada por Solé *et al.* (2009) se aplicó a las masas de *P. uncinata* potencialmente protectoras frente a aludes de la parroquia La Massana de Andorra, diagnosticándose un notable grado de protección. Por el contrario, se desconoce el papel que en ese mismo sentido desempeñan las masas homólogas del Pirineo catalán. En el presente trabajo se pretende llevar a cabo una primera exploración comparativa entre los bosques de ambas zonas a fin de: (i) detectar si existen diferencias estructurales y de ello se deriva una funcionalidad distinta frente a los aludes, (ii) establecer si las posibles diferencias identificadas responden más a particularidades ambientales propias de cada ámbito geográfico que a factores antrópicos (gestión selvícola, etc.), y (iii) clasificar las masas catalanas con la misma tipología que se elaboró para las de Andorra.

## 2. Material y Métodos

El objeto del estudio es analizar y comparar el estado de los bosques de pino negro de dos localizaciones geográficas con superficies sensiblemente diferentes (45.000 ha de Cataluña frente a 3.815 ha en la parroquia La Massana de Andorra). Esa circunstancia aconsejó que las fuentes de datos se adaptaran a escalas espaciales distintas para cada zona. La información correspondiente al primer caso se extrajo del Tercer Inventario Forestal Nacional (identificado en lo sucesivo como IFN3) (Ministerio de Medio Ambiente, 2007), mientras que la fuente de datos para la zona de Andorra, donde no se dispone de inventarios a gran escala, procedió de un inventario *ad hoc*.

En IFN3 las parcelas, que son circulares de radio variable (5, 10, 15 y 25 metros), se localizan, siguiendo un muestreo sistemático, en los nudos de una malla cuadrada de 1 km de lado. Con la aplicación MIRABOSC ON-LINE se identificaron las 215 parcelas de pino negro que satisficieron las mismas restricciones de arbolado potencialmente protector contra aludes establecidas en Solé *et al.* (2009), y que representaron el 48% del total de la superficie (21.500 ha).

La metodología adoptada en Andorra siguió las pautas que, de modo sucinto, se exponen a continuación:

- 1º) Delimitación geográfica de las zonas con presencia de arbolado potencialmente protector contra aludes y restringidas por:
  - Nivel altitudinal superior a los 1.800 m.
  - Intervalo de pendiente transversal del terreno entre 25° y 50°.

Los condicionantes anteriores redujeron la superficie objeto de estudio a 1.152 ha (el 30% de la inicial).

- 2º) Preidentificación y compartimentación inicial de unidades visualmente homogéneas mediante observación de la ortofotografía digital de la zona (SIGMA, 2003) a escala 1:5.000, que permite establecer una diferenciación previa de rodales en base a patrones de texturas y colores de la imagen.
- 3º) Diseño de un muestreo dirigido, a fin de recoger, tanto la notable heterogeneidad fisiográfica y de vegetación de la zona de estudio (relieve abrupto, perturbaciones naturales (aludes) y antrópicas (presencia de ganado doméstico), etc.), como la variabilidad estructural del arbolado. Se adoptó además el criterio de que cada rodal estuviera representado como mínimo por una parcela y que por cada 10 ha de más se dispusiera otra adicional. Siguiendo ese protocolo se obtuvo, para la superficie de 1.152 ha, un total de 60 parcelas ocupadas por pino negro en forma pura, replanteadas en lugares aparentemente representativos del rodal y aislados del efecto borde, de geometría rectangular con el

eje menor según la línea de máxima pendiente, y dimensión de 50x40 m considerada satisfactoria para permitir un buen diagnóstico de la eficacia frente a aludes (Leclerc *et al.*, 1998).

- 4º) De cada parcela se anotaron los diámetros de todos los árboles inventariables (diámetro normal  $\geq 7,5$  cm) presentes (tanto vivos como muertos en pie), la altura de dos individuos cuyo diámetro coincidiera con el diámetro cuadrático medio y la altura de los tres de mayor diámetro. En ocho puntos del transecto replanteado sobre una diagonal de la parcela, se registró la altitud, la pendiente transversal del terreno y la fracción de cabida cubierta (con densiómetro). Además, sobre una superficie de 2x2 m<sup>2</sup> alrededor de cada uno de esos puntos, se contabilizó el número de pies no inventariables (altura > 0,2 m y diámetro < 7,5 cm), que en este estudio es la categoría de “regenerado consolidado” y que en la práctica vendría a agrupar las clases naturales de repoblado y monte bravo, homologables en el IFN3 a los pies menores y a los de diámetro inferior a 2,5 cm.

Tabla 1. Valores medios y desviaciones típicas de las variables fisiográficas/selvícolas y de los estadísticos de las distribuciones diamétricas de las parcelas de estudio.

Table 1. Mean values and standard deviations of physiographic/ silvicultural variables and statistics associated to the diameter distribution of the plots.

Variable (unidades)	Descripción	media±desv.tip	
		Cataluña	Andorra
Alt (m.s.n.m)	Altitud	2003 ±136	2063 ±102
Pend (°)	Pendiente del terreno	32,9 ± 5,3	32,7 ± 3,4
N (pies/ha)	Densidad	583 ± 503	962 ± 548
AB (m <sup>2</sup> /ha)	Área basimétrica	21,6 ± 12,9	36,5 ± 19,6
AB <sub>m</sub> (m <sup>2</sup> /ha)	Área basimétrica de los árboles muertos en pie	1,4 ± 2,5	2,8 ± 3,4
D <sub>gfm</sub> (cm)	Diámetro cuadrático medio de los árboles muertos en pie	14,9 ± 16,8	15 ± 10,6
Fcc (%)	Fracción de cabida cubierta (valor promedio de los ocho puntos del transecto)	41 ± 26	59 ± 20
H <sub>o</sub> -H <sub>m</sub> (m)	Estratificación (diferencia entre la altura dominante y la altura media)	2,5 ± 1,9	2,2 ± 1,9
Reg (pies/ha)	Valor promedio del “regenerado consolidado” de los ocho puntos del transecto	1029 ± 1284	848 ± 672
std (cm)	Desviación típica	8,3 ± 3,1	8,7 ± 2,8
coef.asim	Coficiente de asimetría	1 ± 0,6	0,9 ± 0,6
cv	Coficiente de variación	37,6 ± 12,9	42,8 ± 9,5
coef.curt	Coficiente de curtosis	0,9 ± 2,2	0,9 ± 1,9
Rango (cm)	Rango diamétrico	33,4 ± 13,7	36,2 ± 12,9
Q <sub>3</sub> -Q <sub>1</sub> (cm)	Rango intercuartil	11,4 ± 6,1	12 ± 4,4
P <sub>95</sub> -P <sub>5</sub> (cm)	Rango percentílico	20,6 ± 10,1	26,3 ± 9,3
M <sub>o</sub> (cm)	Moda	18 ± 8,8	15 ± 5,8

Con los datos recabados de los dos inventarios se elaboraron las variables que se exponen en la tabla 1. Debe advertirse sobre la prudencia a adoptar en la interpretación comparativa de unos resultados derivados de parcelas rectangulares de superficie fija en un caso (Andorra), y de parcelas circulares de radio variable en IFN3, y por tanto con cada árbol sujeto a una probabilidad distinta de ser medido en función de su diámetro.

Cada rodal se adscribió posteriormente a alguno de los tipos propuestos en Solé *et al.* (2009). Esa tipología, esquematizada en la tabla 2, se organiza tomando como categoremata los siguientes parámetros:

1. Disposición de los árboles en el seno del rodal, diferenciándose dos familias según los pies aparecen homogéneamente agrupados, o bien por el contrario se reparten de modo disperso y dejando numerosos espacios intersticiales no ocupados.
2. Espesura en términos de área basimétrica (sólo en los rodales donde los pinos se hallaban dispuestos de forma más o menos homogénea en el espacio), adoptando el umbral de 15 m<sup>2</sup>/ha por debajo del cual se interpreta que la resistencia que ofrece la masa frente al deslizamiento y reptación del manto nival es insatisfactoria (Chauvin *et al.*, 1994).
3. Presencia relevante de árboles muertos en pie que otorga un plus de anclaje (Schönenberger *et al.*, 2005).
4. Distribución de los árboles según clases diamétricas (carácter irregular de la masa).

Las estructuras A y B corresponden, siempre que se mantengan los factores estacionales y/o antrópicos que las condicionan, a estadios finales de la sucesión y su papel protector, aunque no sea alto, es destacable. No obstante, las mejores estructuras protectoras corresponden a los tipos G y J, porque combinan su carácter irregular con una aceptable espesura contabilizando los árboles muertos en pie. Son también adecuados los tipos H e I (área basimétrica superior a 30 m<sup>2</sup>/ha) y el K por presentar formas irregularizadas. Los tipos D y E, y en menor medida L y M, resultan, por el contrario, poco eficaces para tales fines a causa de su área basimétrica reducida y por mostrar además, en algún caso, tendencia hacia la regularidad (la distribución diamétrica de los pies se desvía notablemente de la J-invertida y tiende a concentrarse en un estrecho rango diametral). Conviene finalmente subrayar que, aunque la idea general es que la espesura contribuye al efecto de estabilización del manto nival, la tipología recoge dos excepciones a ese principio, una de carácter negativo donde la elevada espesura compromete la estabilidad por falta de regeneración (masas capitalizadas o en proceso de capitalización como el tipo F), y la otra de carácter positivo significada por una función protectora notable a pesar de su escasa espesura (estructuras en colectivos identificados bajo el tipo C).

Tabla 2. Tipología para la identificación de masas protectoras contra aludes según Solé *et al.* (2009).Table 2. Typology for identification protective masses against avalanches by (Solé *et al.*, 2009).

1. Rodales con los pies distribuidos de modo disperso	
→ Comunidad climática	Tipo A
→ Árboles disgregados	Tipo B
→ Árboles agrupados en colectivos	Tipo C
2. Rodales con los pies distribuidos homogéneamente	
→ AB < 15 m <sup>2</sup> /ha	
• AB+ABfm ≥ 15m <sup>2</sup> /ha	Tipo D
• AB+ABfm < 15m <sup>2</sup> /ha	Tipo E
→ AB ≥ 15 m <sup>2</sup> /ha	
• %FMG ≥ 50	Tipo F
• %FMG < 50	
◊ AB ≥ 30 m <sup>2</sup> /ha	
* %FP ≥ 50 y %FM ≥ 15 y %FG + %FMG ≥ 5	Tipo G
* %FP < 50 o %FM < 15 o %FG + %FMG < 5	
■ %FP ≥ 15 y %FM ≥ 10 y %FG + %FMG ≥ 5	Tipo H
■ %FP ≥ 15 o %FM ≥ 10 o %FG + %FMG ≥ 5	Tipo I
◊ AB < 30 m <sup>2</sup> /ha	
■ AB + ABfm ≥ 30m <sup>2</sup> /ha	Tipo J
■ AB + ABfm < 30m <sup>2</sup> /ha	
• %FP ≥ 50 y %FM ≥ 15 y %FG + %FMG ≥ 5	Tipo K
• %FP < 50 o %FM < 15 o %FG + %FMG < 5	
• %FP ≥ 15 y %FM ≥ 10 y %FG + %FMG ≥ 5	Tipo L
• %FP < 15 o %FM < 10 o %FG + %FMG < 5	Tipo M

AB: área basimétrica de los árboles vivos; AB<sub>im</sub>: área basimétrica de los árboles muertos en pie; %FMG: porcentaje de pinos cuyo diámetro es superior a 32,5 cm; %FG: porcentaje de pinos de diámetro comprendido entre 32,5 y 27,5 cm; %FM: porcentaje de pinos de diámetro comprendido entre 27,5 y 17,5 cm; %FP: porcentaje de pinos de diámetro comprendido entre 17,5 y 7,5 cm.

AB: basal area of living trees; AB<sub>im</sub>: basal area of standing dead trees; %FMG: percentage of pines which are larger than 32.5 cm; %FG: percentage of pine diameter between 32.5 and 27.5 cm; %FM: pine percentage diameter between 27.5 and 17.5 cm; %FP: percentage of pine diameter between 17.5 and 7.5 cm.

Con las nueve variables seleccionadas y los ocho estadísticos representantes de la distribución diamétrica (Tabla 1), se llevó a cabo un análisis de componentes principales según el ámbito geográfico. La técnica debe permitir reducir la dimensionalidad del estudio, así como también agrupar las variables de ambos conjuntos en componentes interpretables que conformen, cada una de ellas, un subconjunto de variables muy correlacionadas entre sí y con su respectiva componente.

Para contrastar los dos ámbitos geográficos, se comprobó si la denominación de cada componente recogía grupos de variables análogas y se estableció en una primera aproximación, con cada una de las variables de los subconjuntos obtenidos, un análisis de la varianza (ANOVA). La correlación

existente entre las variables de cada subconjunto justificó el uso del análisis multivariante de la varianza (MANOVA), empleando como estadístico de contraste la Lambda de Wilks. En el caso de detectar diferencias significativas entre inventarios, la técnica multivariante permitiría extraer una o más variables canónicas (combinaciones lineales de variables dependientes que maximizan el valor del estadístico F de un ANOVA), señalando qué variable/s de cada uno de los subconjuntos son las responsables de esa divergencia.

Todos los análisis han sido ejecutados utilizando procedimientos estadísticos de SAS/STAT (2000).

### 3. Resultados

#### 3.1. Análisis de las distribuciones diamétricas

La Tabla 3 refleja los resultados de la prospección realizada para determinar la verdadera dimensión de la variabilidad de las distribuciones diamétricas según el ámbito geográfico.

En las masas del Pirineo catalán se advierte que la globalidad de los estadísticos de la distribución diamétrica de las parcelas puede agruparse en tres componentes principales que, en su conjunto, recogen un 87,20% de la variabilidad. La primera componente (*IIdiam*) está fuertemente correlacionada

Tabla 3. Coeficientes de correlación entre estadísticos de la distribución diametral de ambos inventarios y las respectivas componentes principales extraídas.

Table 3. Correlation coefficients between statistics of diameter distribution in the two inventories and the corresponding extracted principal components.

Estadísticos de la distribución	Cataluña			Andorra		
	IIdiam	IIIdiam	IIIIIdiam	IIdiam	IIIdiam	IIIIIdiam
std	<b>0,92</b>	-0,24	0,23	<b>0,97</b>	-0,23	-0,02
coef. asim	0,10	<b>0,93</b>	0,07	0,33	<b>0,92</b>	0,10
cv	<b>0,79</b>	0,31	-0,36	<b>0,93</b>	0,16	-0,24
coef. curt	0,07	<b>0,87</b>	0,40	0,31	<b>0,85</b>	0,39
rango	<b>0,82</b>	0,19	0,43	<b>0,93</b>	0,03	0,28
$Q_3-Q_1$	<b>0,65</b>	-0,58	-0,08	<b>0,77</b>	-0,49	-0,19
$P_{95}-P_5$	<b>0,85</b>	-0,03	-0,17	<b>0,91</b>	-0,24	0,09
Mo	-0,14	-0,45	<b>0,85</b>	-0,14	-0,60	<b>0,78</b>
% varianza explicada	41,55	29,42	16,23	53,67	28,82	11,72



con medidas de dispersión. La segunda (*IIdiam*) guarda una estrecha relación con la forma de la curva diamétrica (asimetría y curtosis). Y la tercera componente (*IIIdiam*) representa el valor modal de la distribución.

Con referencia a las de Andorra, se observa que los estadísticos de la distribución que mantienen una correlación más alta con cada componente coinciden con los de Cataluña. La variabilidad total explicada por las tres primeras componentes es del 94,21%.

Para comparar los dos ámbitos geográficos se realizó una prueba F de Fisher-Snedecor ( $gl_{num}=1$ ,  $gl_{den}=273$ ) para cada uno de los estadísticos de las distribuciones diamétricas, detectándose diferencias significativas en el coeficiente de variación ( $F=8,4$ ;  $p=0,004$ ), rango percentílico ( $F=15,6$ ;  $p<0,0001$ ) y moda ( $F=6,1$ ;  $p=0,014$ ). Estos resultados pueden inducir a confusión, dado que en ambos casos cada componente principal agrupa un subconjunto de estadísticos obviamente correlacionados entre sí. Por ello se justifica el empleo del análisis multivariante de la varianza (MANOVA) para las dos primeras componentes, mientras que la aplicación para *IIIdiam* (con una sola variable fuertemente correlacionada) se efectuó mediante un ANOVA convencional.

Tabla 4. Análisis multivariante de la varianza (MANOVA) para estudiar el efecto del ámbito geográfico sobre el subconjunto de estadísticos de las distribuciones diamétricas.

Table 4. Multivariate analysis of variance (MANOVA) associated to the effect of geographical area on the subset of the statistical diameter distributions.

Grupo de variables dependientes	Wilk's Lambda	F <sub>aprox</sub>	gl <sub>num</sub>	gl <sub>den</sub>	Pr>F	Variable canónica <sup>(1)</sup>
std, cv, rango, P <sub>95</sub> -P <sub>5</sub> , Q <sub>3</sub> -Q <sub>1</sub>	0,876	7,64	5	269	<0,0001	-0,69std+0,03cv+0,04rango+ +0,16(P <sub>95</sub> -P <sub>5</sub> )+0,05(Q <sub>3</sub> -Q <sub>1</sub> )
coef.asim, coef.curt	0,996	0,53	2	272	0,591	

(1) La combinación lineal de variables dependientes que maximiza el valor del estadístico F de un ANOVA con respecto a la variable canónica sólo se incorpora en el supuesto de que la prueba sea significativa.

(1)The linear combination of dependent variables that maximize the F-value for the canonical variable is only shown when the test is significant.

El valor de  $p$  asociado al estadístico aproximado F refleja diferencias significativas entre ámbitos geográficos en lo que respecta al grupo de estadísticos que, perteneciendo a la primera componente, mejor representan la dispersión de las distribuciones diametrales. El estadístico que más contribuye a detectar esas diferencias resulta ser el rango percentílico (P<sub>95</sub>-P<sub>5</sub>), que es el más correlacionado con la variable canónica ( $r=0,66$ ;  $p<0,0001$ ). En

cuanto a la segunda componente, representada por los coeficientes de asimetría y curtosis, no se detectan diferencias entre ambas zonas de estudio.

Con respecto a la tercera componente, representada por el valor modal de la distribución, la prueba F del ANOVA, mencionada anteriormente, ha resultado ser significativa.

### 3.2. Análisis de las variables fisiográficas y dasométricas

La variabilidad fisiográfica y estructural de las masas de Cataluña y Andorra viene representada por tres componentes principales que, recogiendo el 66,40% y el 66,79% de explicación respectivamente, agrupan las mismas variables, todas ellas de naturaleza dasométrica. La primera componente (*Idaso*) integra términos de espesura (N, AB, Fcc). La segunda (*Ildaso*) aglutina aspectos de decrepitud de la masa a través de los árboles muertos en pie ( $AB_{fm}$  y  $D_{gfm}$ ). Y la tercera componente (*IIldaso*) viene definida sólo por el regenerado.

El análisis de componentes principales aplicado para las variables fisiográficas y dasométricas de las 275 parcelas (215 de Cataluña y 60 de Andorra) arroja los resultados expuestos en la tabla 5.

Bajo el mismo planteamiento que en el caso anterior (distribuciones diamétricas), se realizó una prueba F de Fisher-Snedecor ( $gl_{num}=1$ ,  $gl_{den}=273$ ) para cada una de las variables dasométricas que mejor representan a las componentes extraídas. Se detectaron diferencias significativas en el área

Tabla 5. Coeficientes de correlación entre las variables fisiográficas y dasométricas de ambos inventarios y las respectivas componentes principales extraídas, *Idaso*, *Ildaso* y *IIldaso*.

Table 5. Correlation coefficients between the dasometric and physiographic variables in the two inventories and the corresponding extracted principal components, *Idaso*, *Ildaso* and *IIldaso*.

Variables	Cataluña			Andorra		
	<i>Idaso</i>	<i>Ildaso</i>	<i>IIldaso</i>	<i>Idaso</i>	<i>Ildaso</i>	<i>IIldaso</i>
Alt	-0,53	0,26	-0,36	-0,70	-0,25	0,01
Pend	-0,30	-0,23	0,33	-0,24	0,02	<b>0,74</b>
N	<b>0,86</b>	-0,14	-0,14	<b>0,78</b>	-0,32	-0,04
AB	<b>0,89</b>	0,13	-0,21	<b>0,91</b>	-0,06	-0,22
$AB_{fm}$	0,14	<b>0,84</b>	0,14	0,03	<b>0,87</b>	0,10
$D_{gfm}$	0,07	<b>0,79</b>	0,36	-0,05	<b>0,88</b>	0,03
Fcc	<b>0,95</b>	0,01	-0,21	<b>0,88</b>	0,08	0,30
$H_o-H_m$	0,64	-0,05	0,27	0,24	0,20	-0,22
Reg	0,27	-0,28	<b>0,72</b>	0,25	0,14	<b>-0,79</b>
% varianza explicada	36,86	17,53	12,01	31,89	19,69	15,21

Tabla 6. Análisis multivariante de la varianza (MANOVA) para estudiar el efecto del ámbito geográfico sobre el subconjunto de variables dasométricas.

Table 6. Multivariate analysis of variance (MANOVA) associated to the effect of geographical area on the subset of dasometric variables.

Grupo de variables dependientes	Wilk's Lambda	F <sub>aprox</sub>	gl <sub>num</sub>	gl <sub>den</sub>	Pr>F	Variable canónica <sup>(1)</sup>
AB, Fcc, N,	0,823	19,37	3	271	<0,0001	0,10AB-0,04Fcc+0,01N
AB <sub>im</sub> , D <sub>gfm</sub>	0,946	7,82	2	272	0,0005	0,43AB <sub>im</sub> -0,04D <sub>gfm</sub>

(1) Combinación lineal de variables dependientes que maximiza el valor del estadístico F de un ANOVA con respecto a la variable canónica.

(1) The linear combination of dependent variables that maximize the F-value for the canonical variable.

basimétrica ( $F=48,3$ ;  $p<0,0001$ ), fracción de cabida cubierta ( $F=24,0$ ;  $p<0,0001$ ), densidad ( $F=25,5$ ;  $p<0,0001$ ) y área basimétrica de los árboles muertos en pie ( $F=11,9$ ;  $p=0,0007$ ). En el resto (diámetro cuadrático medio de los árboles muertos en pie y regenerado) no se apreciaron diferencias entre los dos ámbitos geográficos.

En los dos grupos de variables dependientes que representan a las dos primeras componentes dasométricas, se detectan diferencias significativas entre las dos localizaciones, no sólo en espesura (*Idaso*), sino también en decrepitud (*Ildaso*). En este sentido, el área basimétrica de los pinos vivos y la de los muertos en pie, correlacionadas con su correspondiente variable canónica con coeficientes de 0,92 y 0,87 respectivamente, constituyen las variables que mejor discriminan ambos ámbitos geográficos.

Con respecto a la tercera componente, representada por el regenerado, la prueba F del ANOVA concluye que el efecto de la localidad no es significativo ( $F=1,10$ ;  $p=0,294$ ).

### 3.3. Adscripción de las parcelas de inventario a los tipos definidos en Solé et al. (2009)

En la tabla 7 se muestra la clasificación de las 275 parcelas estudiadas según la tipología preparada para Andorra. Esa información se complementa en la figura 1 con las formas que adoptan las correspondientes distribuciones diamétricas.

El mosaico de gráficos presentado en la figura 1 se presta, aunque de manera aproximada y cualitativa, a ser interpretado geoméricamente. La forma sigmoidal de alguno de los trazados expresa una conformación de estructura regular. Otros diagramas presentan formas cóncavas, con mayor o menor curvatura, y se asocian, respectivamente, a curvas de J-invertida

Tabla 7. Valores medios, acompañados de las desviaciones típicas, de las variables que mejor definen las tres primeras componentes, según la tipología (Solé *et al.*, 2009) y el ámbito geográfico.

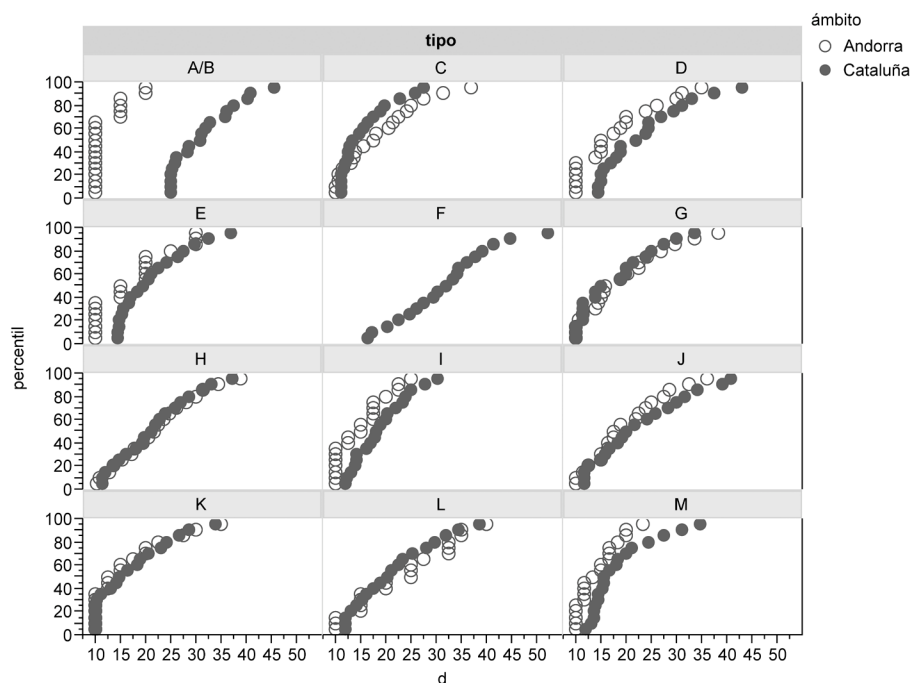
Table 7. Mean statistical values and standard deviations that better defining the three first components, by geographical area and typology (Solé *et al.*, 2009).

Tipos	Ámbito	n	AB	Fcc	N	AB <sub>fm</sub>	D <sub>gfm</sub>	Reg
A,B	Cataluña	21	4,1(2,6)	6,1(3,4)	56(33)	0,5(1,0)	10,4(19,4)	729(1054)
	Andorra	1	4	16,3	320	0	0	1130
C	Cataluña	19	6,7(3,8)	14,5(7,3)	280(126)	0,6(1,1)	8,8(14,0)	930(1126)
	Andorra	10	13,5(7,1)	30,8(10,4)	387(176)	2,4(4,4)	15,6(16,5)	557(290)
D	Cataluña	8	11,8(4,0)	21,2(8,7)	301(203)	4,5(4,0)	31,8(10,5)	1348(2194)
	Andorra	2	12,6(0,8)	53(16,9)	395(7)	7,8(5,2)	24,7(1,3)	1274(1095)
E	Cataluña	27	10,8(2,3)	21,6(7,6)	339(241)	0,3(0,5)	8,2(16,3)	1108(1261)
	Andorra	1	4,9	30,2	17	2,1	21,2	500
F	Cataluña	26	29,7(10,2)	44,2(15,9)	342(142)	2,2(3,2)	25,2(17,2)	883(1240)
	Andorra	0	-	-	-	-	-	-
G	Cataluña	4	43,0(3,9)	87,7(12,8)	1391(287)	4,2(5,4)	18,9(13,1)	1400(1100)
	Andorra	8	46,2(14,5)	67,4(12,6)	1263(483)	0,5(0,8)	8,6(8,6)	740(374)
H	Cataluña	27	37,3(5,8)	69,3(14,7)	897(263)	1,9(2,5)	16,2(15,2)	1012(1274)
	Andorra	25	51,8(12,7)	73,6(11,4)	1159(456)	3,1(3,0)	14,1(6,1)	891(675)
I	Cataluña	13	40,7(8,7)	88,7(28,2)	1623(921)	1,0(1,1)	13,1(11,3)	1296(1051)
	Andorra	2	40,4(12,1)	63,6(8,6)	1890(834)	3,7(4,5)	15,3(6,5)	723(446)
J	Cataluña	6	27,8(1,3)	50,2(3,1)	566(130)	5,7(4,4)	31,4(5,6)	806(1245)
	Andorra	4	27,6(2,7)	59,2(4,4)	725(134)	5,4(5,1)	23,2(10,3)	600(370)
K	Cataluña	17	22,9(3,4)	48,4(9,0)	811(216)	1,2(1,6)	16,2(17,4)	1403(1481)
	Andorra	2	21,6(1,5)	60,0(0,6)	880(424)	1,9(2,7)	17,5(24,8)	2560(2022)
L	Cataluña	29	21,1(3,8)	39,8(9,9)	519(182)	1,1(2,0)	13,6(15,9)	611(954)
	Andorra	2	24,4(1,0)	42,1(3,3)	480(85)	3,4(1,1)	29,4(5,3)	454(65)
M	Cataluña	18	22,4(4,4)	46,9(15,2)	847(529)	0,7(1,4)	8,5(15,6)	1584(1694)
	Andorra	3	23,7(3,2)	41,7(9,9)	1360(383)	1,5(2,2)	11,3(11,3)	1023(116)

(irregularidad óptima) y a otras de menor grado de irregularidad. La disposición vertical de puntos cuyo diámetro, generalmente, es bajo, indica otro aspecto distinto que es el predominio de las clases de edad juveniles. Por otro lado, la proyección vertical del diagrama de puntos sobre el eje de abscisas define el rango percentílico, estadístico que ha protagonizado la discriminación entre las distribuciones diamétricas de las dos localizaciones geográficas.

Figura 1. Función de distribución diamétrica según la tipología de Solé *et al.* (2009) y el ámbito geográfico.

Figure 1. Diameter distribution function by geographical area and typology (Solé *et al.*, 2009).



#### 4. Discusión

##### 4.1. Estructura de la masa

Destaca en primera instancia cómo, en ambos ámbitos geográficos, las componentes obtenidas se han generado en un mismo orden y bajo idéntica interpretación, lo que facilita el estudio comparativo mediante la técnica multivariante empleada.

El análisis de componentes principales de los estadísticos descriptivos, juntamente con el MANOVA de los subconjuntos de variables de aquellos que están altamente correlacionados con el respectivo componente de cada entorno geográfico, detectan diferencias significativas entre las distribuciones diamétricas, con mayor dispersión (superior rango percentílico) en Andorra.

En segundo plano, y con una representatividad menor, la moda adquiere valores más pequeños en las parcelas andorranas. Por el contrario, no se aprecian diferencias significativas en términos de forma (asimetría y curtosis similares), y puesto que además ambos coeficientes son positivos, puede inferirse que la mayoría de las masas estudiadas presentan rasgos de cierta irregularidad, aunque en muchos casos bajo distribuciones diamétricas desequilibradas (Hawley y Smith, 1982) y alejadas de la J-invertida.

La primera componente principal del análisis de las variables fisiográficas y dasométricas (*IIdaso*), constituida por la densidad, área basimétrica y fracción de cabida cubierta, se asocia a variables de espesura y no está muy ligada a la altitud. Contra lo que cabría esperar, es decir, que las estructuras surgieran más disgregadas y con menor espesura conforme se aproximan al límite del bosque (*timberline*), en nuestro caso no se manifiesta esa relación (aunque en Andorra la correlación sea más alta que en Cataluña). De ello puede deducirse que, además del gradiente altitudinal, otros factores microestacionales (pendiente y temperatura media invernal (Martín-Alcón *et al.*, 2012)), y/o antrópicos (actividad pecuaria o intensidad de aprovechamientos de madera), inciden severamente, no sólo en la estructura del ecotono bosque-pasto (Camarero y Gutiérrez, 2002), sino también sobre la espesura de todas las masas de pino negro localizadas por encima de 1.800 m. Se observa, asimismo, que en los Pirineos catalanes el límite altitudinal del arbolado se distribuye de modo más uniforme y constante.

La segunda componente (*IIIdaso*) muestra una estrecha relación con variables indicadoras de decrepitud y consecuente desagregación de la masa (área basimétrica y diámetro cuadrático medio de los árboles muertos en pie).

La tercera componente (*IIIIdaso*), que es la que presenta menor peso en el análisis, se asocia únicamente con la regeneración, indicando que ésta muestra un comportamiento propio no ligado al resto de variables de masa estudiadas. Esta interpretación es consecuente con la ubicación altitudinal de los bosques de pino negro y la relevante influencia que los agentes abióticos establecen sobre el reclutamiento de nuevos brinzales (Mullenbach, 2001; Camarero *et al.*, 2005). También factores fisiográficos, como la pendiente del terreno, pueden suponer un condicionante adverso para la renovación de la masa (Bosch *et al.*, 1992), tal como en nuestro caso se evidencia en Andorra.

Del análisis multivariante de la varianza (MANOVA) se desprende que la componente primera, vinculada a la espesura, discrimina a los dos ámbitos geográficos, siendo el área basimétrica la variable más importante. La explicación más plausible para este dispar estado de espesura podría obedecer, aunque no se haya analizado en este trabajo, a una supuesta menor presión en el pasado de los aprovechamientos de madera sobre los bosques de Andorra.

Las componentes segundas, concernientes a los árboles muertos en pie, resultan ser significativamente distintas. La mayor espesura de los rodales de Andorra parece que induce una superior mortalidad, evidenciándose de modo más notorio en el área basimétrica de los árboles muertos. Como el diámetro cuadrático medio de los individuos que mueren es análogo bajo estados de espesura diferentes, cobra fuerza la hipótesis de que la mortalidad no sólo es consecuencia del exceso de competencia, sino también de factores exógenos a la propia dinámica de la masa (Bosch y Gutiérrez, 1999). De otra parte, la superior mortalidad detectada en Andorra puede sugerir el inicio de un cierto proceso de desestructuración de la masa, lo cual a su vez explicaría la mayor dispersión que presentan sus distribuciones diamétricas y, en particular, el mayor rango percentílico.

En cuanto a las componentes terceras, la fuerte variabilidad de regenerado existente entre parcelas (mayor en Cataluña) ha podido ser la causa de que no se detecten diferencias entre localizaciones. Ello pone de manifiesto que los dispares estados de espesura y decrepitud advertidos no se traducen en niveles distintos de regeneración, por lo menos en los términos en que se ha definido esta variable (pies de altura > 0,2 m y diámetro < 7,5 cm).

#### 4.2. Representación de los tipos protectores en Cataluña y Andorra

En las masas de Cataluña se aprecia, por comparación a las de Andorra, una mayor representación proporcional de los tipos B (formas disgregadas que conforman el límite superior del bosque), E (rodales normalmente jóvenes de espesura defectiva, sin aportación relevante de los árboles muertos en pie e insignificante papel protector) y L (estructuras de espesura media y con un grado de irregularidad deficiente y distinto al de la J-invertida). Asimismo el tipo F, con su función protectora comprometida a medio o largo plazo a causa de tratarse de estructuras capitalizadas en existencias volumétricas y con tendencia a la regularización por falta de regeneración (Aunós y Blanco, 2007), sólo aparece en Cataluña. A la inversa, en Andorra se detecta una mayor presencia de los tipos G (conforma las distribuciones diamétricas más asimilables a la irregularidad de J-invertida y por tal razón resulta óptima para la protección frente a avalanchas) y H (sus distribuciones diamétricas se distinguen de las anteriores por presentar cierto déficit de las clases jóvenes y en consecuencia riesgo de perder el carácter irregular).

La mayor presencia del tipo B en Cataluña evidenciaría que el proceso de expansión de la especie debido al descenso de las actividades antrópicas (Améztegui *et al.*, 2010) es más acusado. También puede inferirse que el mayor número de rodales adscritos a alguno de los tipos funcionales peores

(E y L) y el menor número de algunos de los mejores (G y H), podría obedecer a las secuelas de las cortas abusivas de los siglos XIX y XX (González, 2008), no registradas con la misma intensidad en Andorra. La presencia notable en Cataluña de estructuras capitalizadas en existencias volumétricas (tipo F), ausentes sin embargo en la zona estudiada de Andorra, apuntan por el contrario a una preocupante falta de tratamientos selvícolas en esos rodales durante los últimos decenios.

## 5. Conclusiones

De modo común para las masas estudiadas de *Pinus uncinata*, localizadas por encima de 1.800 m de altitud y sobre terrenos con pendiente entre 25° y 50°, se concluye que:

1. La mayoría de los rodales de ambos entornos geográficos muestran, de acuerdo a sus distribuciones diamétricas, rasgos de cierta irregularidad, aunque en muchos casos sea bajo formas desequilibradas y alejadas de la J-invertida.
2. El gradiente altitudinal no se revela como el factor más determinante que condicione la espesura de la masa.
3. La regeneración muestra un comportamiento no ligado al resto de variables de masa.

Paralelamente, se evidencian ciertas diferencias entre las masas de Cataluña y las localizadas en la parroquia La Massana de Andorra en lo concerniente a que en las primeras:

1. La espesura de la masa y la presencia de los árboles muertos en pie tienden a ser inferiores.
2. Se presentan estructuras capitalizadas en existencias volumétricas, ausentes en el otro ámbito geográfico.
3. Ofrecen, de modo general, peores características en cuanto a su papel protector frente al desencadenamiento de avalanchas.

## Agradecimientos

Nuestro reconocimiento al Centre d'Estudis de la Neu i la Muntanya d'Andorra, personalizado en Marta Doménech, por su iniciativa e inestimable ayuda en el desarrollo del trabajo, así como a Fernando Sobrevía, Nuria Duró y Xavier Solé quienes también participaron en el mismo.



## Referencias

- Améztegui, A., Brotons, L. & Coll, L., 2010. Land-use changes as major drivers of mountain pine (*Pinus uncinata* Ram.) expansion in the Pyrenees. *Global Ecology and Biogeography*, 19: 632-641.
- Aunós, A. & Blanco, R., 2006. Caracterización de rodales irregulares de *Abies alba* Mill. capitalizados en existencias del Valle de Arán y de las cortas por entresaca practicadas. *Investigaciones Agrarias: Sistemas Recursos Forestales*, 15: 96-106.
- Bachofen, H. & Zingg, A., 2001. Effectiveness of structure improvement thinning on stand structure in subalpine Norway spruce (*Picea abies* L. Karst.) stands. *Forest Ecology Management*, 145: 137-149.
- Bebi, P., Kienast, F., Schönenberger, W., 2001. Assessing structures in mountain forests as a basis for investigating the forests dynamics and protective function. *Forest Ecology Management*, 145: 3-14.
- Bosch, O., Giné, L., Ramadori, E. D., Bernat, A., Gutiérrez, E., 1992. Disturbance, age and size structure in stands of *Pinus uncinata* Ram. *Pirineos*, 140: 5-14.
- Bosch, O. & Gutiérrez, E., 1999. La sucesión en los bosques de *Pinus uncinata* del Pirineo. De los anillos de crecimiento a la historia del bosque. *Ecología*, 13: 133-172.
- Calama, R., Del Río, M., Coquillas, V., Cañellas, I. & Montero, G., 2004. Modelos de calidad de estación y de perfil de fuste para masas de *Pinus uncinata* Ram. en el Pirineo español. *Investigaciones Agrarias: Sistemas Recursos Forestales*, Fuera de serie, 176-190.
- Camarero, J.J. & Gutiérrez, E., 2002. Structure and spatial variability of *Pinus uncinata* Ram. growth forms at two contrasting treeline ecotones in the Spanish Pyrenees. *Investigaciones Agrarias: Sistemas Recursos Forestales*, 11 (1): 155-169.
- Camarero, J.J., Gutiérrez, E., Fortín, M.J. & Ribbens, E., 2005. Spatial patterns of tree recruitment in a relict population of *Pinus uncinata*: densification through stratified-diffusion. *Journal of Biogeography*, 32: 1979-1992.
- Chauchard, S., Carcaillet, CH. & Guibal, F., 2007. Patterns of land-use abandonment control tree-recruitment and forest dynamics in mediterranean mountains. *Ecosystems*, 10: 936-948.
- Chauvin, C., Renaud, J.P., Rupé, C. & Leclerc, D., 1994. Stabilité et gestion des forêts de protection. *ONF-Bulletin technique*, 27: 37-52.
- Furdada, G., 1996. *Estudi de les allaus al Pirineu Occidental de Catalunya: predicció espacial i aplicacions de la cartografia*. Geoforma Ed., Serie Monografías Científicas, Logroño, 315 pp.

- Furdada, G., 2006. Aludes de nieve. Riesgo actual y riesgo futuro. *Rev. Cuaternario & Geomorfología*, 20(3-4): 73-88.
- Gauquelin, X., Courbaud, B. (coord.), 2006. *Guide des Sylvicultures de Montagne, Cemagref, CRPF Rhône-Alpes*, ONF, Grenoble, 289 pp.
- González, J.M., 2008. Selvicultura de *Pinus uncinata* Mill. En: Serrada, R., Montero, G., Reque, J.A.: *Compendio de Selvicultura Aplicada en España*. INIA, Madrid, 535-546 pp.
- Hawley, R.C. & Smith, D.M., 1982. *Silvicultura práctica*. Ediciones Omega, Barcelona, 544 pp.
- Kräuchi, N., Brang, P. & Schönenberger, W., 2000. Forests of mountainous regions: gaps in knowledge and research needs. *Forest Ecology Management*, 132: 73-82.
- Leclerc, D., Chauvin, C., Mermin, E. & Renaud, J.P., 1998. Choix sylvicole en forêt de montagne: cas des résineux dans les Alpes de Nord. *Revue Forestière Française*, L, n° spécial, 82-95.
- Martín-Alcón, S., Coll, L. & Aunós A., 2012. A broad-scale analysis of the main factors determining the current structure and understory composition of Catalanian sub-alpine (*Pinus uncinata* Ram.) forests. *Forestry*, 85(2): 225-236.
- Ministerio de Medio Ambiente, 2005. *Tercer Inventario Forestal Nacional 1997-2007*. Ministerio de Medio Ambiente, Madrid.
- Motta, R., Haudemand, J.C., 2000. Protective forests and silvicultural stability. An example of planning in the Aosta Valley. *Mountain Research and Development*, 20 (2): 180-187.
- Motta, R. & Lingua, E., 2005. Human impact on size, age, and spatial structure in a mixed European larch and Swiss stone pine forest in the Western Italian Alps. *Canadian Journal Forest Research*, 35(8): 1809-1820.
- Mullenbach, P., 2001. *Reboisements d'altitude*. Cemagref Éditions, 335 pp.
- Northwest Weather & Avalanche Center, 2003. *Basic principles for avoiding and surviving avalanches*. USDA, Forest Service Pacific Northwest Region, 2 pp.
- Ott, E., Frehner, M., Frey, H.U. & Lüscher, P., 1997. *Gebirgsnadelwälder*. Haupt, Berna, 287 pp.
- Renaud, J.P., Rupé, C. & Leclerc, D., 1994. Stabilité et fonction de protection des forêts de montagne dans les Alpes du Nord. L'exemple de la forêt domaniale de Rioupéroux (Isère). 2° partie. Analyse des structures et diagnostic sylvicole dans une forêt à fonction de protection. Modes de gestion et stabilité. *Revue Forestier Française*, XLVI (6): 655-669.
- SAS/STAT, 2000. *User's Guide, Versión 8*. SAS Institute, Cary, NC.
- SIGMA, 2003. Sistema de información geográfica medioambiental de Andorra. <http://www.sigma.ad>.
- Schönenberger, W, Noack, A. & Thee, P., 2005. Effect of timber removal from

- windthrow slopes on the risk of snow avalanches and rockfall. *Forest Ecology Management*, 213: 197-208.
- Solé, X., Duró, N., Sobrevía, F., Doménech, M. & Aunós, A., 2009. Funcionalidad de los bosques de La Massana (Andorra) frente a las avalanchas de nieve. En: S.E.C.F-Junta de Castilla y León (eds.), *Actas del 5º Congreso Forestal Español-Montes y Sociedad: Saber qué hacer*. 5CFE01-121: 1-13. Sociedad Española de Ciencias Forestales. Pontevedra. Disponible en línea en: <http://www.congresoforestal.es/index.php?men=81>).
- Vacchiano, G., Motta, R., Long, J.N. & Shaw, J.D., 2008. A density management diagram for Scots pine (*Pinus sylvestris* L.): A tool for assessing the forest's protective effect. *Forest Ecology Management*, 255: 2542-2554.