

Proyectos de investigación en parques nacionales: 2010-2013

UN NUEVO MÉTODO DE SEGUIMIENTO DE LOS BOSQUES UTILIZANDO IMÁGENES ESTEREOSCÓPICAS HEMISFÉRICAS

FERNANDO MONTES¹, MARIOLA SÁNCHEZ-GONZÁLEZ²,
GABRIEL SANGÜESA-BARREDA³, CRISTINA RODRÍGUEZ-GARCÍA⁴,
NURIA SIMÓN⁵ Y JESÚS JULIO CAMARERO⁶

RESUMEN

Para diseñar estrategias de conservación es imprescindible conocer la estructura del bosque y llevar a cabo un seguimiento de su evolución en el tiempo. En el marco del proyecto 161/2010 se ha desarrollado un sistema de monitoreo de los bosques a partir de imágenes estereoscópicas hemisféricas basado en el modelo de utilidad MU2005-01738 patentado por el INIA. En este trabajo se presentan los nuevos métodos desarrollados tanto para la segmentación y correspondencia de las imágenes como para el cálculo de variables dendrométricas y de masa, y su aplicación en tres casos de estudio: i) el análisis de la precisión de las estimaciones del diámetro normal, área basimétrica y número de pies efectuadas a partir de las imágenes estereoscópicas hemisféricas en parcelas del 4º Inventario Forestal Nacional de *Pinus sylvestris* L. y *Quercus pyrenaica* Willd., ii) el estudio de los factores implicados en el decaimiento de *Abies alba* Mill. en el Parque Nacional de Ordesa y Monte Perdido, complementando la información obtenida a partir de las imágenes estereoscópicas hemisféricas con estudios dendrocronológicos y iii) el seguimiento del efecto de los tratamientos selvícolas en la estructura de la masa en pinares de repoblación de *Pinus halepensis* Mill. y *Pinus nigra* subsp. *Salzmannii* (Dunal) Franco en el Parque Nacional de Sierra Nevada.

Palabras clave: inventario forestal, visión artificial, estimación del área basimétrica, decaimiento de *Abies alba*, estructura forestal.

¹ Fernando Montes. INIA-CIFOR. Ctra. de la Coruña km 7,5, 28040 Madrid, España. Tlf.: +34 913 474 181. e-mail: fmontes@inia.es

² Mariola Sánchez-González. INIA-CIFOR. Ctra. de la Coruña km 7,5, 28040 Madrid, España. Tlf.: +34 913 474 181. e-mail: msanchez@inia.es

³ Gabriel Sangüesa-Barreda. Instituto Pirenaico de Ecología (CSIC). Avda. Montañana 1005, Apdo. 202, 50192 Zaragoza, España. Tlf.: +34 976 369 393. e-mail: gsanguesa@ipe.csic.es

⁴ Cristina Rodríguez-García. INIA-CIFOR. Ctra. de la Coruña km 7,5, 28040 Madrid, España. e-mail: crodriguezgarca@gmail.com

⁵ Nuria Simón. INIA-CIFOR. Ctra. de la Coruña km 7,5, 28040 Madrid, España. e-mail: nuriasimon@hotmail.com

⁶ Jesús Julio Camarero. Instituto Pirenaico de Ecología (CSIC). Avda. Montañana 1005, Apdo. 202, 50192 Zaragoza, España. Tlf.: +34 976 369 393. e-mail: jjcamarero@ipe.csic.es

SUMMARY

To design suitable conservation strategies it is necessary to characterize forest structure and to monitor its evolution through time. In the framework of the project 161/2010 a forest survey system has been developed based on the stereoscopic hemispherical images that are acquired through the measurement device MU2005-01738 patented by the INIA. In this paper the new methods developed for the image matching process and the dendrometric and stand variables estimation are presented as well as three applications: i) The analysis of the precision of the diameter, basal area and tree number estimation from the stereoscopic hemispherical images in a set of National Forest Inventory plots in *Pinus sylvestris* L. and *Quercus pyrenaica* Willd. Stands, ii) the study of the factors involved in the *Abies alba* Mill. decline in «Ordesa and Monte Perdido» National Park, in which the information derived from the stereoscopic hemispherical images and dendrochronological data are integrated, and iii) the monitoring of the thinning effects on the stand structure in pine forestations of *Pinus halepensis* Mill. and *Pinus nigra* subsp. *Salzmannii* (Dunal) Franco in «Sierra Nevada» National Park.

Key words: forest inventory, computer vision, basal area estimation, *Abies alba* decline, forest structure.

INTRODUCCIÓN

Para diseñar estrategias de conservación es imprescindible conocer el estado actual de la masa forestal describiendo su estructura y llevar a cabo un seguimiento de su evolución en el tiempo. En los últimos años se ha generalizado el uso de la teledetección para el monitoreo de los sistemas forestales. Estas técnicas permiten obtener datos de grandes áreas de forma periódica que constituyen una información muy valiosa para estudiar la dinámica forestal (WULDER *et al.*, 2004). Los sensores multiespectrales de media y alta resolución proporcionan imágenes de amplia cobertura espacial y permiten estimar parámetros de la estructura de la masa (GÓMEZ *et al.*, 2011 y 2012). Las aplicaciones del LiDAR en el inventario forestal han experimentado también un notable desarrollo (SÚAREZ *et al.*, 2005; NÆSSET y GOBAKKEN, 2008). Las técnicas de teledetección requieren de una segunda etapa de muestreo que suele consistir en validaciones precisas de las variables de interés sobre el terreno (FALKOWSKI *et al.*, 2010), que se relacionan mediante modelos de regresión con variables obtenidas mediante teledetección, que presentan una cobertura espacial continua (VAUHKONEN *et al.*, 2011). Recientemente se han empezado a desarrollar aplicaciones en el ámbito forestal del *Terrestrial Laser Scanning*

(TLS) (WATT y DONOGUE, 2005; VASTARANTA *et al.*, 2009; LINDBERG *et al.*, 2012; RINGDAHL *et al.*, 2013); a partir de los datos que proporciona el TLS se puede obtener información sobre los diámetros, densidad y área basimétrica (HENNING y RADTKE 2006; DAS-SOT *et al.*, 2011). A la vez se han ido desarrollando técnicas de medición de los árboles basadas en la fotogrametría (CLARK *et al.*, 2000; VARJO *et al.*, 2006; KORPELA *et al.*, 2007; FORSMAN *et al.*, 2012; DICK *et al.*, 2010).

El dispositivo de medición MU2005-01738, patentado por el INIA-CIFOR en 2005, es un sistema que permite la captación de imágenes estereoscópicas hemisféricas. Las fotografías hemisféricas han sido utilizadas en el ámbito forestal para determinar la radiación bajo la cubierta forestal (FRAZER *et al.*, 2001) y para la estimación del índice de área foliar (JONCKHEERE *et al.*, 2004). No obstante, las aplicaciones utilizando una única fotografía hemisférica se encuentran limitadas por las asunciones para modelizar la distribución de las hojas (NILSON y KUUSK 2004; WEISS *et al.*, 2004; MONTES *et al.*, 2007). A partir de los pares de imágenes estereoscópicas hemisféricas obtenidos con el MU2005-01738, se puede determinar la posición en 3 dimensiones de los elementos identificados en las imágenes, permitiendo la medición de

distancias, diámetros y alturas. Estos datos se pueden utilizar para calcular la distribución diamétrica, ecuaciones de perfil, área basimétrica, volumen o caracterizar la estructura de la masa (MONTES *et al.*, 2009), información que se puede emplear de forma complementaria con técnicas de teledetección en un diseño de muestreo en dos etapas. Por otra parte, las imágenes constituyen un registro de la parcela que puede servir para estudios futuros de la dinámica de la masa.

En el proyecto titulado «Desarrollo de métodos de seguimiento de la diversidad estructural de los bosques utilizando imágenes hemisféricas: una nueva herramienta de monitoreo para la gestión forestal» (n° de referencia 161/2010) se ha desarrollado una metodología para el seguimiento del estado y dinámica de la diversidad estructural de la masa forestal, utilizando la información derivada de los pares estereoscópicos de imágenes hemisféricas que proporciona el dispositivo patentado de medición MU2005-01738. En este trabajo se presentan los resultados obtenidos en tres aplicaciones de dicha metodología desarrolladas en el ámbito del proyecto: i) el análisis de la precisión en la estimación de diámetros y área basimétrica en parcelas del 4° Inventario Forestal Nacional, ii) el estudio de la estructura en relación a procesos de decaimiento del abeto (*Abies alba* Mill.) en el Parque Nacional de Ordesa y Monte Perdido y iii) el análisis del efecto de los tratamientos de clara en la estructura de la masa en pinares de repoblación en el Parque Nacional de Sierra Nevada.

MATERIAL Y MÉTODOS

Desarrollo del prototipo del dispositivo de medición MU2005-01738

El prototipo desarrollado del dispositivo de medición MU2005-01738 consta de dos lentes «ojo de pez» Fujinon FE185C057HA-1 y dos cámaras Hitachi Kokusai Electric Inc. KP-FD500GV con sensor CCD de 5 Megapíxeles conectadas mediante interfaz Gigabit Ethernet a un ordenador (Figura 1). Se ha desarrollado una aplicación en el estándar



Figura 1. Prototipo del MU2005-01738.

Figure 1. MU2005-01738 prototype.

GENICAM™ que captura una secuencia de 4 imágenes con cada cámara, con tiempos de exposición de 1/9 s, 1/60 s, 1/200 s y 1/1000 s.

Metodología de segmentación y correspondencia de las imágenes estereoscópicas hemisféricas

Se ha desarrollado un método automático que integra los procesos de segmentación, que tiene como resultado la clasificación de los píxeles como cielo, hojas o fuste (Figura 2) y de correspondencia de los árboles en las imágenes (Figura 3) a partir de los métodos de segmentación y correspondencia desarrollados por HERRERA *et al.* (2009) y HERRERA *et al.* (2011).

También se ha desarrollado un método semiautomático, basado en un proceso conocido como *region growing* que identifica los árboles a partir de una sección seleccionada por el usuario en las proyecciones del mismo árbol en ambas imágenes. El proceso de correspondencia da como resultado la posición en coordenadas polares respecto al dispositivo de las secciones del fuste de los árboles identificados (distancia, azimuth y ángulo con el zenit) y el diámetro de dichas secciones. Las técnicas desarrolladas se han implementado en una aplicación con interfaz gráfica de usuario en Matlab® denominada ForeStereo.

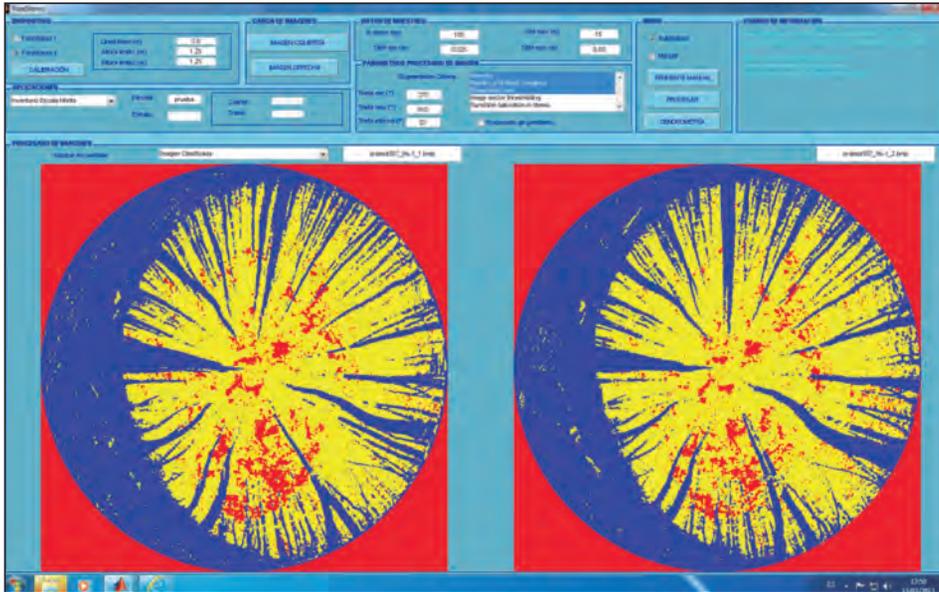


Figura 2. Interfaz gráfica de usuario de la aplicación desarrollada para el análisis de las fotos. Segmentación automática en un par de imágenes tomadas en un hayedo en el valle de Ordesa.

Figure 2. Graphic user interface of the software package developed for image analysis. Automated segmentation of a stereoscopic pair of images of a beech stand in the Ordesa valley.

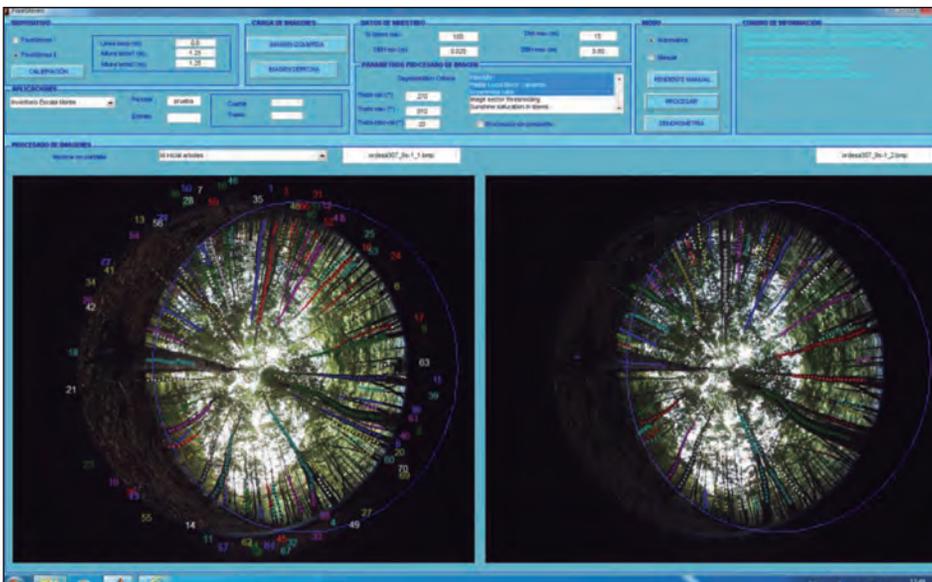


Figura 3. Identificación automática de pares de árboles homólogos para las mismas imágenes que la Figura 2. Cada punto indica una sección del árbol en la que se ha medido el diámetro.

Figure 3. Automated matching of homologous trees for the same images of Figure 2. Each point indicates a measured cross section of the stem.

Obtención de variables de masa e indicadores estructurales a partir de la información derivada de las imágenes

Determinación del diámetro normal

Una vez llevada a cabo la segmentación y correspondencia de las imágenes, la medición de la distancia y los diámetros en las imágenes estereoscópicas hemisféricas se llevó a cabo mediante las ecuaciones epipolares desarrolladas por RODRÍGUEZ-GARCÍA *et al.* (2011).

Se ha desarrollado un método para calcular el diámetro normal a partir del diámetro y la altura desde la base del árbol de las secciones medidas que consiste en ajustar ecuaciones lineales de perfil para cada árbol i y especie s por estrato de muestreo:

$$d_h = a_i + b_s \cdot h$$

siendo d_h el diámetro del fuste a una altura h desde la base del árbol y a_i y b_s los parámetros a ajustar.

Para determinar la altura de las secciones de fuste medidas desde la base del árbol se ajusta un plano a la superficie del terreno. El ajuste del plano al terreno se puede hacer de forma manual o automática a partir de la información contenida en la imagen, para lo que se ha desarrollado la siguiente ecuación de la curva de horizonte que describe el terreno en la imagen (en coordenadas polares: distancia al centro r en función del ángulo azimutal α) a partir del radio de la imagen (r_{image}), el ángulo de máxima pendiente (σ_{max}) y el ángulo azimutal de la dirección de máxima pendiente ($\alpha_{\sigma_{max}}$):

$$r = \left(\frac{\pi}{2} - \text{sign}(\cos(\alpha - \alpha_{\sigma_{max}})) \left(\cos^{-1} \left(\sqrt{\frac{1}{\sin^2(\alpha - \alpha_{\sigma_{max}}) + \frac{\cos^2(\alpha - \alpha_{\sigma_{max}})}{\cos^2(\sigma_{max})}}} \right) \right) \right) \frac{r_{image}}{\frac{\pi}{2}}$$

Una vez ajustada la ecuación de perfil se calcula el diámetro normal para cada árbol como:

$$DBH = a_i + b_s \cdot 1,30$$

Estimación de variables dasométricas

Para el cálculo de las variables de masa es preciso determinar la probabilidad de selección de cada uno de los árboles que forman parte de la

muestra, que depende del diámetro del árbol, la pendiente del terreno y la distancia máxima de muestreo. Se ha desarrollado un método que permite determinar, a partir del diámetro normal del árbol, la pendiente del terreno, la distancia máxima (d_{max}) y el número de píxeles de la banda de selección (p_{band}), el radio de selección de dicho árbol en función del ángulo azimutal. La integral de dicha función es el área de muestreo para cada árbol:

$$S = \int_0^{2\pi} \frac{1}{2} \left(\min \left(d_{max}, \frac{DBH}{\frac{\sin(\pi \cdot p_{band}/r_{image} \cdot (1 - \tan^{-1}(\tan(\sigma_{max}) \cos(\alpha - \alpha_{\sigma_{max}})))}{\cos(\tan^{-1}(\tan(\sigma_{max}) \cos(\alpha - \alpha_{\sigma_{max}})))}} \right) \right)^2 d\alpha$$

A partir de las probabilidades de selección de cada árbol, se calculan el área basimétrica, el diámetro medio y la densidad en número de pies por hectárea.

MONTES, F. Y COLS.

«Un nuevo método de seguimiento de los bosques»

Índices de estructura

Para caracterizar la estructura horizontal se ha calculado el índice de Clark y Evans (CLARK y EVANS, 1954), que indica el grado de agregación de los árboles.

La diversidad de tamaños de los árboles se ha caracterizado mediante el índice de diferenciación diamétrica de Gadow (GADOW, 1993), que indica la variabilidad de tamaños dentro de la parcela, y el índice de diversidad de Shannon aplicado a las clases diamétricas, que es un buen indicador del grado de irregularidad de la masa (BARBEITO *et al.*, 2009).

La mezcla de especies se caracterizó mediante el índice de cambio (LEDO *et al.*, 2009), que permite caracterizar los procesos de cambio en las especies que forman el estrato dominante a partir de la caracterización de la distribución diamétrica de las diferentes especies.

RESULTADOS

Caso de estudio 1: Estimación de la precisión en la estimación del diámetro normal y el área basimétrica a partir de parcelas del 4º Inventario Forestal Nacional

Con el objetivo de calibrar la precisión de la estimación se tomaron 5 puntos de muestreo en parcelas del 4º Inventario Forestal Nacional situadas en el Sistema Central y compuestas por *Pinus sylvestris* L. y *Quercus pyrenaica* Willd. en las que se midieron todos los árboles en un radio de 15 m en las parcelas de *P. sylvestris* y 10 m en las parcelas de *Q. pyrenaica*.

Los diámetros estimados a partir de las imágenes estereoscópicas hemisféricas presentaron un coeficiente de correlación de Pearson de 0,79 con los diámetros medidos en campo (Figura 4). El sesgo de la estimación del diámetro del árbol in-

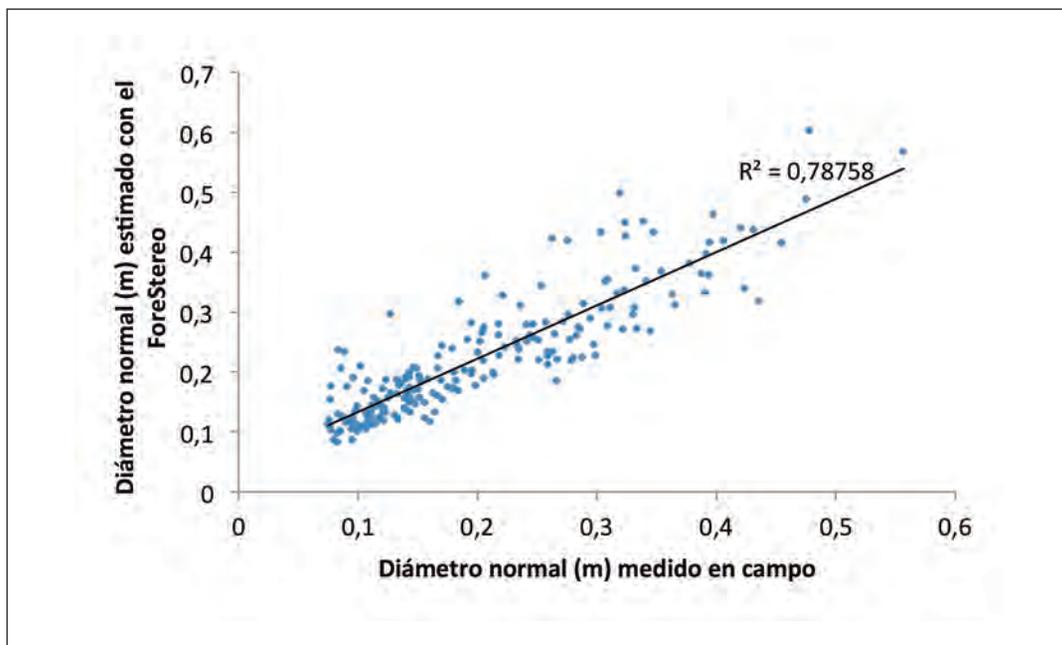


Figura 4. Relación entre el diámetro medido en campo y el diámetro estimado a partir de las imágenes estereoscópicas hemisféricas en parcelas del 4º Inventario Forestal Nacional de *P. sylvestris* y *Q. pyrenaica*.

Figure 4. Relationship between the diameter at breast height measured with calliper and the diameter derived from the stereoscopic hemispherical images in The National Forest Inventory plots of *P. sylvestris* and *Q. pyrenaica*.

Proyectos de investigación en parques nacionales: 2010-2013

dividual fue de 0,02 m (10%) y la raíz cuadrada del error cuadrático medio («Root Mean Squared Error», en adelante abreviado como RMSE) (COCHRAN, 1977) de 0,04 m (20%).

En la Figura 5 se muestra la relación entre el área basimétrica estimada a partir de los datos de muestreo en campo y el área basimétrica estimada a partir del estudio del par de imágenes estereoscópicas hemisféricas tomado desde el centro de la parcela; el coeficiente de correlación de Pearson entre ambas variables fue de 0,80. El sesgo de la estimación del área basimétrica de la parcela fue de 2,29 m² (8,3%) y el RMSE de 6,9 m² (23,5%)

Caso de estudio 2: Decaimiento del abeto en el Parque Nacional Ordesa y Monte Perdido

Para analizar la dinámica del decaimiento de alguna población de abeto (*Abies alba* Mill.) en el Parque Nacional de Ordesa y Monte Perdido se

llevó a cabo un muestreo en una red de parcelas situadas en una malla de 200 m x 200 m en las que se ha tomado un par de imágenes estereoscópicas hemisféricas y 2 muestras dendrocronológicas («cores» o testigos cilíndricos de madera) de dos abetos de la parcela pertenecientes al estrato dominante. A partir de las imágenes se ha calculado el diámetro medio, el área basimétrica y la densidad (número de pies por hectárea) por clase diamétrica y total de las diferentes especies que aparecen en la parcela y para el conjunto de todas ellas. Además se calcularon el índice de Clark y Evans, el índice de diferenciación diamétrica de Gadow, así como el índice de reemplazo.

La datación de los «cores» se ha llevado a cabo atendiendo a sus anillos característicos (YAMAGUCHI, 1991). La datación de las series de crecimiento medidas ha sido evaluada mediante un procedimiento estadístico estandarizado que permite un segundo control de calidad de la datación visual y de la posterior medición de los anillos de

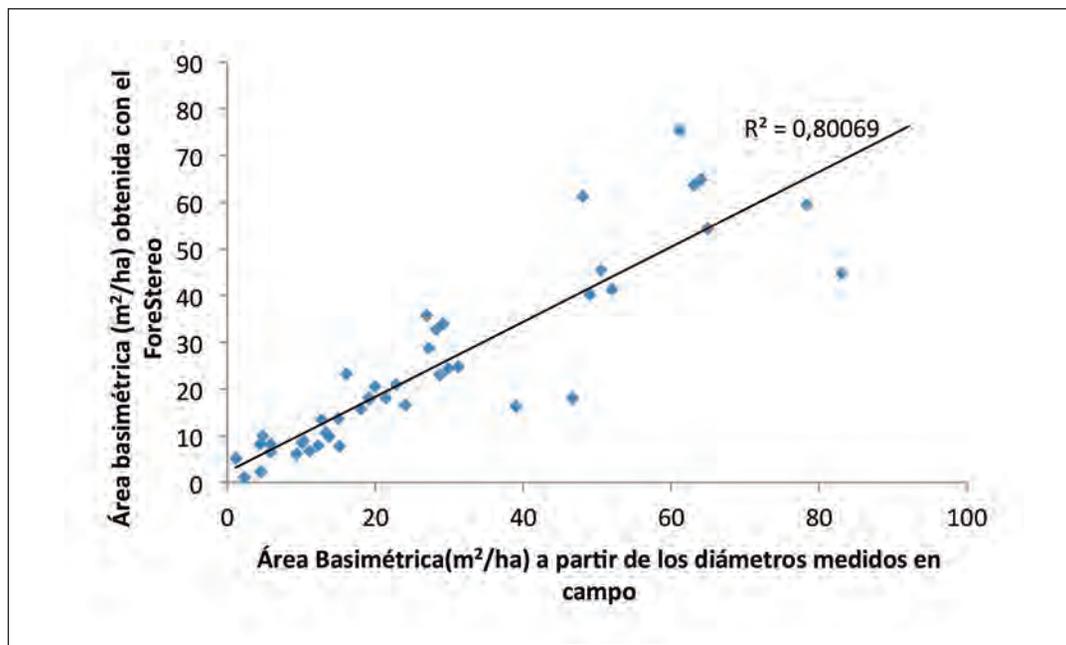


Figura 5. Relación entre el área basimétrica estimada a partir de los datos de muestreo en campo y el área basimétrica estimada a partir de las imágenes estereoscópicas hemisféricas en las parcelas del 4º Inventario Forestal Nacional.

Figure 5. Relationship between the basal area estimated from the field measurements and the basal area derived from the stereoscopic hemispherical images taken in The National Forest Inventory plots.

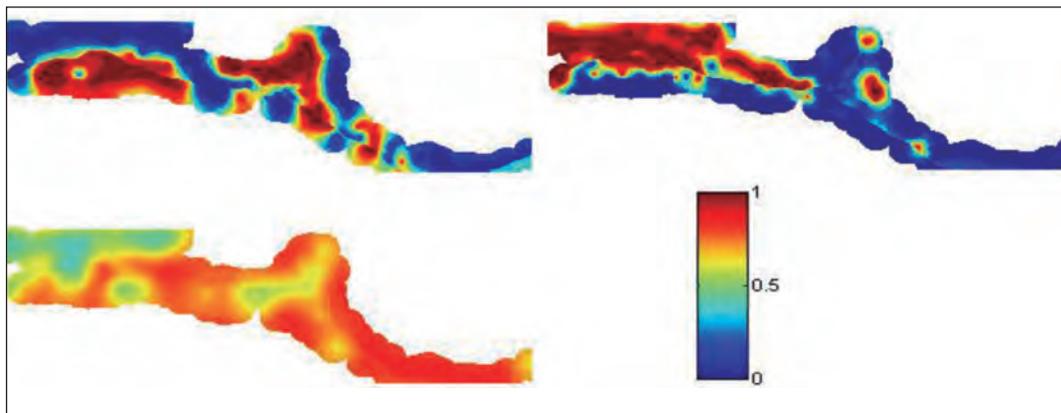


Figura 6. Mapa de distribución (probabilidad de presencia, escala de color) de *A. alba* (fila superior derecha), *P. sylvestris* (fila superior izquierda) y *F. sylvatica* en el valle de Ordesa.

Figure 6. Map of presence/absence probability (color scale) of *A. alba* (above/right), *P. sylvestris* (above/left) and *F. sylvatica* in the Ordesa valley.

crecimiento en un medidor semiautomático (Lintab-TSAP, F. Rinn, Heidelberg) usando el programa COFECHA (HOLMES, 1983).

Para modelizar la distribución espacial de las variables estructurales se ha utilizado Cokrigado Universal (STEIN y CORSTEN, 1991). El modelo lineal de correogionalización y los coeficientes de la función de tendencia se estimaron mediante el método de Suma de Cuadrados Ponderados (WSS, GOULARD y VOLTZ, 1992).

A partir de la presencia o ausencia de *Abies alba*, *P. sylvestris* y *Fagus sylvatica* L. en los puntos de muestreo mediante imágenes estereoscópicas hemisféricas se han obtenido mediante Krigeado Universal mapas de probabilidad para estas tres especies en el valle de Ordesa (Figura 6). Como se puede observar, *P. sylvestris* se distribuye en las laderas orientadas al Sur, mientras que *A. alba* domina en la umbría de Turieto, orientada al Norte, y en la ladera de Cotatuero orientada al Oeste. La distribución de *F. sylvatica* está menos vinculada a la orografía.

El análisis dendrocronológico (Figura 7) muestra que la mortalidad de *A. alba* observada en la actualidad está asociada a diferentes factores en la

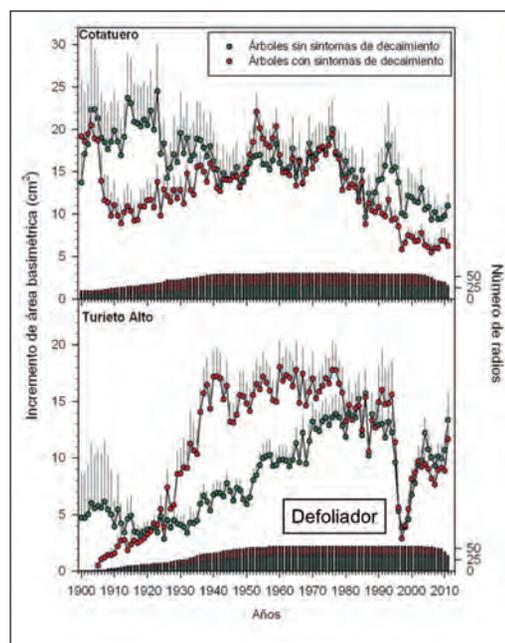


Figura 7. Series medias de incremento de área basimétrica de las muestras de *A. alba* extraídas en el valle de Ordesa (en verde se representa el crecimiento de los árboles sanos y en rojo los que presentan signos de decaimiento).

Figure 7. Mean basal area increment series of *A. alba* in the Ordesa valley (green: trees without decline symptoms; red: trees with decline symptoms).

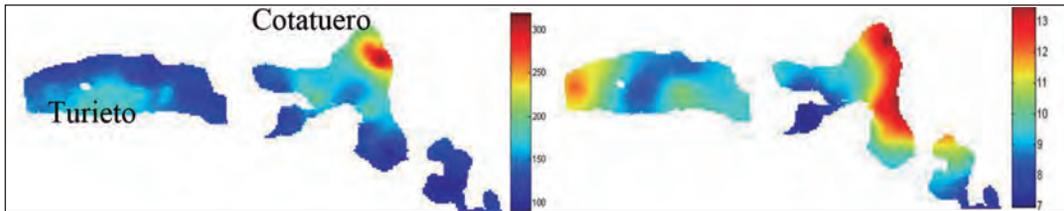


Figura 8. Mapas de distribución de edad de los pies dominantes de (izquierda) y de distribución de crecimientos de los últimos 10 años (derecha) de *A. alba* en el valle de Ordesa.

Figure 8. Map of age of the dominant trees (left) and of tree ring growth for the last 10 years (right) of *A. alba* in the Ordesa valley.

zona de Turieto y la zona de Cotatuero, en la que se ha detectado un mayor efecto de la sequía en relación a déficit hídrico estival acentuado por temperaturas elevadas en las pasadas décadas de los años 80 y 90.

En la Figura 8 se puede ver que la edad del estrato dominante de *A. alba* aumenta con la altitud, probablemente porque estas masas han sido menos explotadas en el pasado. El crecimiento de los últimos 10 años del *A. alba* está relacionado con la estructura de la masa, siendo favorecido por una mayor diferenciación vertical, así como por un patrón espacial regular, no mostrando relación con la altitud o con la orientación.

En cuanto a la dinámica de especies, se ha comprobado a partir del análisis de la distribución diamétrica de las diferentes especies mediante el índice de cambio, que en el valle de Ordesa predominan los procesos de colonización por *A. alba* de masas dominadas en la actualidad por *P. sylvestris* o *F. sylvatica*. En el caso de la dinámica del ecotono formado por *A. Alba* y *P. sylvestris*, este proceso vendría caracterizado por valores

elevados de área basimétrica de *P. sylvestris* y tiene lugar principalmente en los fondos de valle, mientras que la colonización de zonas de hayedo se produce en zonas donde los crecimientos de *A. alba* son menores y la distribución de los árboles es más heterogénea (Figura 9).

Caso de estudio 3: Seguimiento de los efectos de los tratamientos de clara en repoblaciones

Para analizar los efectos en la estructura de la masa de las claras en pinares de repoblación se han tomado imágenes estereoscópicas hemisféricas utilizando el MU2005-01738 en las parcelas del ensayo de claras en masas de *Pinus halepensis* Mill. y *Pinus nigra* subsp. *Salzmannii* (Dunal) Franco en Dilar, Parque Nacional de Sierra Nevada. Dicho sitio de ensayo se estableció en el marco del Observatorio de Cambio Global de Sierra Nevada y consta de dos bloques en cada uno de los cuales hay tres parcelas por tratamiento (control, clara moderada-30% y clara fuerte-50%). En cada parcela hay 10 sub-parcelas en las que se lleva a cabo anualmente el inventa-

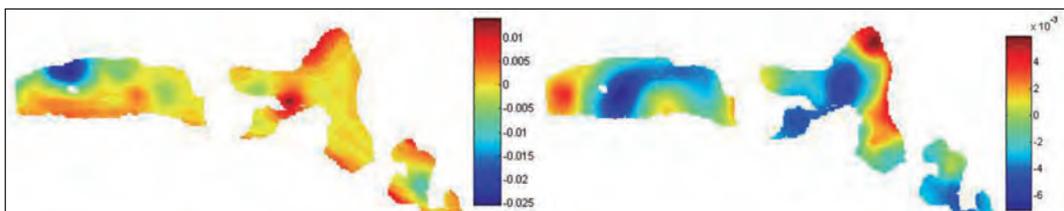


Figura 9. Mapa de índice de cambio de *A. alba* por *P. sylvestris* (izquierda) y por *F. sylvatica* (derecha) en el valle de Ordesa.

Figure 9. Map of replacement index of *A. alba* to *P. sylvestris* (left) and *A. alba* to *F. sylvatica* (right) in Ordesa Valley.

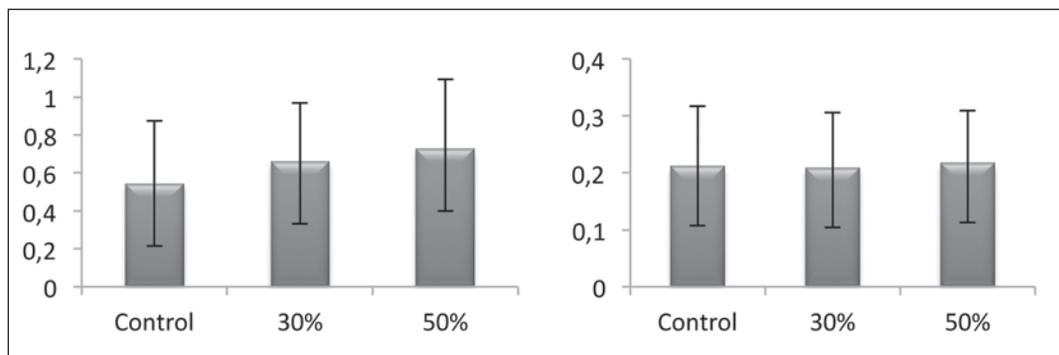


Figura 10. Índices de Clark y Evans (izquierda) y diferenciación de Gadow (derecha) en el ensayo de claras de Dilar, Parque Nacional de Sierra Nevada (tratamientos: control, clara del 30% y clara del 50%).

Figure 10. Clark and Evans Index (left) and Gadow differentiation Index for the diameter (right) in the thinning experimental plots in Dilar, «Sierra Nevada» National Park (thinning levels: control, 30% thinning and 50% thinning).

rio de vegetación y en las que se tomaron las imágenes estereoscópicas hemisféricas. Las imágenes se analizaron con el software desarrollado, calculando para cada imagen la fracción de caída cubierta, el índice de Clark y Evans, el índice de Shannon por clases diamétricas y el índice de diferenciación diamétrica de Gadow.

A pesar de la gran heterogeneidad existente en estas masas antes de realizarse la clara, se ha podido identificar a partir de las imágenes analizadas una tendencia a presentar un patrón espacial más regular en las parcelas aclaradas, consecuencia del carácter sistemático de las claras (Figura 10). No se han encontrado diferencias entre tratamientos en cuanto a la diferenciación diamétrica y la diversidad de clases diamétricas, lo que indica que la respuesta al tratamiento en el desarrollo de los árboles es pequeña dado el corto periodo de tiempo transcurrido desde que se realizaron las claras hasta que se tomaron las imágenes (2 años). No se ha observado efecto de los tratamientos sobre la regeneración de encina, probablemente también por el corto periodo de tiempo transcurrido.

DISCUSIÓN

En el presente trabajo se describe el sistema de monitoreo de los bosques a partir de imágenes estereoscópicas hemisféricas, desarrollado en el

proyecto 161/2010, y se ilustra su empleo usando tres casos de estudio. Las aplicaciones desarrolladas en el ámbito del proyecto muestran que esta técnica puede constituir una alternativa para reducir el coste del inventario forestal, proporcionando información sobre la distribución diamétrica, la densidad y la estructura de la masa. El método desarrollado permite segmentar imágenes tomadas en un amplio rango de tipos de bosques y condiciones de iluminación de la imagen, identificando los árboles y estableciendo la correspondencia entre las dos imágenes de forma automática, lo que supone un avance significativo respecto a los métodos desarrollados hasta ahora por HERRERA *et al.* (2011) y RODRÍGUEZ-GARCÍA *et al.* (2011). El uso de imágenes estereoscópicas permite obtener información de distancias y calcular las dimensiones de los árboles identificados en las imágenes, caracterizando la estructura forestal de forma mucho más precisa que métodos basados en una única imagen (PUESCHEL *et al.*, 2012a).

El RMSE obtenido en la estimación del diámetro normal en las parcelas del Inventario Forestal Nacional de *P. sylvestris* y *Q. pyrenaica* utilizadas para calibrar el método desarrollado es mayor que el obtenido (0,015 m) por RODRÍGUEZ-GARCÍA *et al.* (2011) utilizando un método no automatizado. Esta diferencia es probablemente consecuencia de que el método que aquí se presenta estima el diámetro normal a partir de la ecuación de perfil

ajustada para la especie y los diámetros medidos en lugar de la medición del diámetro a la altura de 1,30 m directamente. Cuando se compara con el método estereofotogramétrico de FORSMAN *et al.*, (2012) la diferencia es menor (RMSE de 0,029 m hasta 7 m de distancia). La estimación del diámetro normal a partir de los datos obtenidos con el *Terrestrial Laser Scanning* depende mucho de la densidad de puntos y del algoritmo utilizado para calcular el diámetro (PUESCHEL *et al.*, 2012b; RINGDAHL *et al.*, 2013), la densidad de la masa y la intercepción por ramas o matorral (WATT y DONOGHUE, 2005) y de la especie (LINDBERG *et al.*, 2012), variando los valores de RMSE varían desde 0,038 m para árboles situados hasta distancias de 40 m (LINDBERG *et al.*, 2012) hasta 0,008 m para árboles a menos de 10 m de distancia (VASTARANTA *et al.*, 2009). El nuevo método desarrollado para estimar las variables de masa establece la probabilidad de selección de cada árbol medido, y es la base para estimar el área basimétrica, el diámetro medio cuadrático, el número de pies o el volumen (WILLIAMS y ERIKSSON, 2002). Para las parcelas analizadas la estimación fue ligeramente inferior a los valores calculados a partir de los diámetros medidos en campo, probablemente debido a que algunos árboles no son identificados a causa de las oclusiones, limitación que también presenta el TLS (KELBE *et al.*, 2012).

La aplicación desarrollada para estudiar la dinámica del decaimiento de alguna población de *A. alba* en el Parque Nacional de «Ordesa y Monte Perdido» muestra la utilidad del muestreo con imágenes estereoscópicas hemisféricas para analizar como varía la estructura de la masa a nivel de paisaje, información que se puede complementar con la edad y crecimiento de los árboles obtenidos mediante dendrocronología. Las poblaciones de *A. alba* en el valle de Ordesa presentan estructura y dinámica diferentes en las dos zonas de estudio (Cotatuero y Turieto) ya que la masa dominante presenta mayores edades y crecimientos en Cotatuero. Los árboles que presentan síntomas de decaimiento en esta zona muestran un declive en su crecimiento a partir de 1986, año que fue precedido por una fuerte sequía estival. En la zona de Turieto el patrón de crecimiento de los árboles con síntomas de decaimiento

se separa a partir de 1996, coincidiendo con unos años en los que se produjeron fuertes ataques del defoliador *Epinotia subsequana* Hw. en la zona (SANGUESA-BARREDA *et al.*, 2013). La edad del estrato dominante está por encima de los 150 años en una parte importante del abetal. El índice de cambio muestra que predominan los fenómenos de colonización por el abeto tanto de masas de *P. sylvestris* como de *F. sylvatica*, lo que sugiere que estas especies desempeñan diferentes papeles conformando un equilibrio dinámico, pero no se han observado procesos de sucesión ecológica asociados a una pérdida de vigor o a un envejecimiento de las masas de *A. alba* que indique un retroceso de la población de esta especie cuya regeneración es activa, en contraposición al decaimiento de esta especie descrito en otros abetares del Pirineo Aragonés (CAMARERO *et al.*, 2002).

En cuanto al seguimiento del efecto de los tratamientos selvícolas en la estructura de la masa en pinares de repoblación en el Parque Nacional de «Sierra Nevada», únicamente se ha podido constatar el efecto inmediato de las claras en el espaciado y patrón espacial de los pies dado el corto periodo de tiempo transcurrido desde que se llevó a cabo el tratamiento. El seguimiento a lo largo de un periodo de tiempo mayor dará lugar a resultados muy relevantes en el futuro sobre el efecto de las diferentes intensidades de clara en la estructura vertical, efecto que varía de unas especies a otras (MONTES *et al.*, 2004, 2005), y permitirá relacionar la estructura de la masa remanente con el establecimiento de otras especies de matorral y arbóreas (MAESTRE y CORTINA 2004; GÓMEZ-APARICIO *et al.*, 2008), información de gran utilidad para el diseño de estrategias selvícolas en el futuro.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo se ha desarrollado en el marco del proyecto 161/2010 «Desarrollo de métodos de seguimiento de la diversidad estructural de los bosques utilizando imágenes hemisféricas: una nueva herramienta de monitoreo para la gestión forestal» de Investigación en Parques Nacionales, y su desarrollo ha sido posible gracias a la in-

estimable financiación y ayuda prestadas por el Organismo Autónomo de Parques Nacionales, tanto en el planteamiento de objetivos y diseño de muestreo como en el trabajo de campo. Tam-

bién quisiéramos agradecer a IBEROPTICS su colaboración en el desarrollo del prototipo, y al personal que trabaja en el Inventario Forestal Nacional por el apoyo prestado.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- BARBEITO, I., CAÑELLAS, I. y MONTES, F. 2009. Evaluating the behaviour of vertical structure indices in Scots pine forests. *Ann. For. Sci.* 66: 710. DOI: 10.1051/forest/20099056.
- CAMARERO MARTÍNEZ, J.J., MARTÍN BERNAL, E., GIL PELEGRÍN, E. y PADRÓ SIMARRO, A. 2002. Aproximación dendroecológica al decaimiento del abeto (*Abies alba* Mill.) en el pirineo aragonés. *Montes* 70: 26-33.
- CLARK, P.J. y EVANS, F.C. 1954. Distance to nearest neighbor as a measure of spatial relationship in populations. *Ecology* 35: 445-453.
- CLARK, N.A., WYNNE, R.H., SCHMOLDT, D.L. y WINN, M.F. 2000. An assessment of the utility of a non-metric digital camera for measuring standing trees. *Comput. Electron. Agric.* 28: 151-169.
- COCHRAN, W.G. 1977. *Sampling Techniques*, third ed. Wiley, New York.
- DASSOT, M., CONSTANT, T. y FOURNIER, M. 2011. The use of terrestrial LIDAR technology in forest science: application fields, benefits and challenges. *Ann. For. Sci.* 68: 959-974. DOI: 10.1007/s13595-011-0102-2.
- DICK, A.R., KERSHAW, J.A. y MACLEAN, D.A. 2010. Spatial Tree Mapping Using Photography. *North. J. Appl. For.* 27: 68-74.
- FALKOWSKI, M.J., HUDAK, A.T., CROOKSTON, N.L., GESSLER, P.E., UEBLER, E.H. y SMITH, A.M.S. 2010. Landscape-scale parameterization of a tree-level forest growth model: a k-nearest neighbor imputation approach incorporating LiDAR data. *Can. J. For. Res.* 40: 184-199. DOI: 10.1139/X09-183.
- FORSMAN, M., BÖRLIN, N. y HOLMGREN, J. 2012. Estimation of tree stem attributes using terrestrial photogrammetry. In: *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, Melbourne, Australia, Aug 25-Sep 1, 2012. XXII ISPRS Congress. ISPRS - International Society for Photogrammetry and Remote Sensing, XXXIX (Part B5), pp 261-265.
- FRAZER, G.W., FOURNIER, R.A., TROFYMOW, J.A. y HALL, R.J. 2001. A comparison of digital and film fisheye photography for analysis of forest canopy structure and gap light transmission. *Agric. For. Meteorol.* 109: 249-263.
- GADOW, K.VON. 1993. Zur Bestandesbeschreibung in der Forsteinrichtung. *Forst und Holz* 21: 601-606.
- GÓMEZ, C., WULDER, M.A., MONTES, F. y DELGADO, J.A. 2011. Forest structural diversity characterization in Mediterranean pines of central Spain with QuickBird-2 imagery and canonical correlation analysis. *Canadian Journal of Remote Sensing* 37: 628-642. DOI: 10.5589/m12-005.
- GÓMEZ, C., WULDER, M.A., WHITE, J.C., MONTES, F. y DELGADO, J.A. 2012. Characterizing 25 years change in the area, distribution, and carbon stock of Mediterranean pines in Central Spain. *International Journal Remote Sensing*. 33: 5546-5573. doi:10.1080/01431161.2012.663115.
- GÓMEZ-APARICIO, L., ZAMORA, R., CASTRO, J. y HÓDAR J. A. 2008. Facilitation of tree saplings by nurse plants: microhabitat amelioration or protection against herbivores? *Journal of Vegetation Science* 19: 161-172.
- GOULARD, M. y VOLTZ, M. 1992. Linear Corregionalization Model: Tools for estimation and choice of Cross-variogram Matrix. *Mathematical Geology* 24: 269-286.
- HENNING, J.G. y RADTKE, P.J. 2006. Ground-based Laser imaging for assessing three-dimensional forest canopy structure. *Photogrammetric Engineering y Remote Sensing* 72: 1349-1358.

Proyectos de investigación en parques nacionales: 2010-2013

- HERRERA, P.J., PAJARES, G., GUIJARRO, M.A., RUZ, J., CRUZ, J.M. y MONTES, F. 2009. A featured-based strategy for stereovision matching in sensors with fish-eye lenses for forest environments. *Sensors* 9: 9468-9492. DOI: 10.3390/s91209468.
- HERRERA, P.J., PAJARES, G., GUIJARRO, M., RUZ, J.J. y CRUZ, J.M. 2011. A stereovision matching strategy for images captured with fish-eye lenses in forest environments. *Sensors* 11: 1756-1783. DOI: 10.3390/s110201756.
- HOLMES, R. 1983. Computer-assisted quality control in tree-ring dating and measurement. *Tree-Ring Bulletin* 43: 69-75.
- JONCKHEERE, I., FLECK, S., NACKAERTS, K., MUYS, B., COPPIN, P., WEISS, M. y BARET, F. 2004. Review of methods for in situ leaf area index determination. Part I. Theories, sensors and hemispherical photography. *Agric. For. Meteorol.* 121: 19-35. DOI:10.1016/j.agrformet.2003.08.027.
- KELBE, D., ROMANCZYK, P., VAN AARDT, J., CAWSE-NICHOLSON, K. y KRAUSE, K. 2012. Automatic extraction of tree stem models from single terrestrial lidar scans in structurally heterogeneous forest environments. In 12th International Conference on LiDAR Applications for Assessing Forest Ecosystems, *SilviLaser 2012*, 16-19 September 2012, Vancouver, BC, pp 54-61.
- KORPELA, I., TUOMOLA, T. y VÄLIMÄKI, E. 2007. Mapping Forest Plots: An Efficient Method combining photogrammetry and field triangulation. *Silva Fennica* 41: 457-469. Available from: <http://www.metla.fi/silvafennica/full/sf41/sf413457.pdf> [accessed 18 December 2013] ISSN 0037-5330.
- LEDO, A., MONTES, F. y CONDÉS, S. 2009. Species dynamics in a Montane Cloud Forest: identifying factors involved in changes in tree diversity and functional characteristics. *For. Ecol. Manage.* 258: S75-S84.
- LINDBERG, E., HOLMGREN, J., OLOFSSON, K. y OLSSON, H. 2012. Estimation of stem attributes using a combination of terrestrial and airborne laser scanning. *Eur. J. Forest. Res.* DOI: 10.1007/s10342-012-0642-5.
- MAESTRE, F.T. y CORTINA, J. 2004. Are plantations useful as a restoration tool in semiarid Mediterranean areas? *For. Ecol. Manage.* 198: 303-317. DOI: 10.1016/j.foreco.2004.05.040.
- MONTES, F., CAÑELLAS, I., DEL RÍO, M., CALAMA, R y MONTERO, G., 2004. The effects of thinning on the structural diversity of coppice forests. *Ann. For. Sci.* 61: 771-779. DOI: 10.1051/forest:2004074.
- MONTES, F., SÁNCHEZ, M., DEL RÍO, M. y CAÑELLAS, I. 2005. Using historic management records to characterize the effects of management on the structural diversity of forest. *For. Ecol. Manage.* 207: 279-293. DOI: 10.1016/j.foreco.2004.10.031.
- MONTES, F, PITA, P., RUBIO, A. y CAÑELLAS, I. 2007. Leaf area index estimation in mountain even-aged *Pinus silvestris* L. stands from hemispherical photographs. *Agric. For. Meteorol.* 145: 215-228. DOI: 10.1016/j.agrformet.2007.04.017.
- MONTES, F., LEDO, A., RUBIO, A., PITA, P. y CAÑELLAS, I. 2009. Use of stereoscopic hemispherical images for forest inventories. In Marusák, R., Kratochvilová, Z., Trnkková, E., Hajnala, M (Eds). 90th anniversary of the Forestry Faculty in Prague. *Forest, Wildlife and Wood Sciences for Society development Prague April 2009*, Czech University of Life Sciences, Prague, Czech Republic (CD-ROM Proceedings) ISBN: 978-80-213-2019-2.
- NÆSSET, E. y GOBAKKEN, T. 2008. Estimation of above- and below-ground biomass across regions of the boreal forest zone using airborne laser. *Remote Sens. Environ.* 112: 3079-3090. DOI: 10.1016/j.rse.2008.03.004.
- NILSON, T. y KUUSK, A. 2004. Improved algorithm for estimating canopy indices from gap fraction data in forest canopies. *Agric. For. Meteorol.* 124: 157-169. DOI:10.1016/j.agrformet.2004.01.008.
- PUESCHEL, P., BUDDENBAUM, H. y HILL, J. 2012a. An efficient approach to standardizing the processing of hemispherical images for the estimation of forest structural attributes. *Agric. For. Meteorol.* 160: 1-13. DOI: 10.1016/j.agrformet.2012.02.007.
- PUESCHEL, P., NEWNHAM, G.J., ROCK, G., UDELHOVEN, T., WERNER, W. y HILL, J. 2012b. The influence of scan mode and circle fit algorithms on the extraction of stem diameter and volume

- from TLS data. In 12th International Conference on LiDAR Applications for Assessing Forest Ecosystems, *SilviLaser 2012*, 16-19 September 2012, Vancouver, BC, pp 148-156.
- RINGDAHL, O., HOHNLOSER, P., HELLSTRÖM, T., HOLMGREN, J. y LINDROOS, O. 2013. Enhanced algorithms for estimating tree trunk diameter using 2D laser scanner. *Remote Sens.* 2013, 5, 4839-4856. doi:10.3390/rs5104839.
- RODRÍGUEZ-GARCÍA, C., MONTES, F., SÁNCHEZ-GONZÁLEZ, M., CAÑELLAS, I. y PITA, P. 2011. Localización y cubicación de árboles en pie utilizando pares estereoscópicos de imágenes hemisféricas. III Reunión del Grupo de Modelización de la SECF. Modelización forestal: desde la teoría a la difusión y transferencia de resultados. 4 al 6 de mayo 2011, Lugo.
- SANGUESA-BARREDA, G., CAMARERO, J.J. y MONTES, F. 2013. Importancia relativa de la competencia y el estrés climático como causantes del decaimiento del abeto en los Pirineos. XI Congreso Nacional de la AEET. Invitación a la ecología: estrechando lazos con la sociedad. 6 al 10 de mayo de 2013, Pamplona.
- STEIN, A. y CORSTEN, L.C.A. 1991. Universal Kriging and Cokriging as a Regression Procedure. *Biometrics* 47: 575-587.
- SUAREZ, J.C., ONTIVEROS, C., SMITH, S. y SNAPE, S. 2005. Use of airborne Lidar and aerial Photography in the estimation of individual tree heights in forestry. *Computers y Geosciences* 31: 253-262.
- VARJO, J., HENTTONEN, H., LAPPI, J., HEIKKONEN, J. y JUUJÄRVI, J. 2006. Digital horizontal tree measurements for forest inventory. Working Papers of the Finnish Forest Research Institute, 40. ISBN-13: 978-951-40-2026-1.
- VASTARANTA, M., MELKAS, T., HOLOPAINEN, M., KAARTINEN, H., HYYPPÄ, J. y HYYPPÄ, H. 2009. Laser-based field measurements in tree-level forest data acquisition. *Photogrammetric Journal of Finland*. 21: 51-61.
- VAUHKONEN, J., MEHTÄTALO, L. y PACKALÉN, P. 2011. Combining tree height samples by airborne laser scanning and stand management records to estimate plot volume in *Eucalyptus* plantations. *Can. J. For. Res.* 41: 1649-1658.
- WATT, P.J. y DONOGHUE, D.N.M. 2005. Measuring forest structure with terrestrial laser scanning, *International Journal of Remote Sensing*, 26:7, 1437-1446, DOI: 10.1080/01431160512331337961.
- WEISS, M., BARET, F., SMITH, G.J., JONCKHEERE, I. y COPPIN, P. 2004. Review of methods for in situ leaf area index determination. Part II. Estimation of LAI, errors and sampling. *Agric. For. Meteorol.* 121: 37-53.
- YAMAGUCHI, D.K. 1991. A simple method for cross-dating increment cores from living trees. *Can. J. For. Res.* 21: 414-416.