

EL USO DEL ESCÁNER LÁSER AEROTRANSPORTADO PARA LA ESTIMACIÓN DE LA BIOMASA FOLIAR DEL *PINUS SYLVESTRIS L.* EN CANENCIA (MADRID)

S. Condés Ruiz ¹ y D. Riaño Arribas ²

¹ Departamento de Economía y Gestión Forestal de la ETSI de Montes. Universidad Politécnica de Madrid. Ciudad Universitaria s/n. 28040-MADRID (España). Correo electrónico: scondes@montes.upm.es

² Center for Spatial Technologies and Remote Sensing (CSTARS). Department of Land, Air and Water Resources. University of California. One Shields Avenue. DAVIS, CA 95616-8617. (USA).

Resumen

La estimación de la biomasa foliar es uno de los problemas actuales que se presenta en los inventarios forestales, entre otras razones por su relación con la fijación del carbono atmosférico, y consecuentemente con la disminución del efecto invernadero. Para poder llevar a cabo una estimación adecuada de la biomasa foliar es necesario recurrir a un muestreo destructivo, que requiere el apeo de los árboles, la separación de cada uno de sus componentes así como el pesaje de los mismos. Para el cálculo de la biomasa foliar por unidad de superficie, se suelen crear modelos que relacionan la biomasa foliar del árbol con variables de fácil medición en los inventarios forestales, tales como el diámetro normal. Generalmente no se emplean en estos modelos otras variables que también están altamente correlacionadas, como la altura de copa o el diámetro de la copa, ya que dificultan la utilización posterior del modelo resultante. Mediciones obtenidas a partir de un escáner láser aerotransportado (lidar), y su alta correlación con valores de biomasa foliar por unidad de superficie, permiten el cálculo de la biomasa foliar en superficies extensas sin necesidad de la realización de un inventario exhaustivo. En este trabajo se presenta un modelo que permite la obtención de un mapa de la biomasa foliar a partir del sensor lidar en masas de *Pinus sylvestris L.* en Canencia (Madrid).

Palabras clave: *Biomasa foliar, Copa, Pinus sylvestris, Lidar*

INTRODUCCIÓN

El estudio íntegro de los ecosistemas, incluyendo interceptación de precipitaciones o intercambio de nutrientes, la búsqueda de nuevas materias primas para usos energéticos o la mayor demanda de productos del bosque son factores que influyen significativamente en el creciente interés por el estudio de la biomasa forestal (PARRESOL, 1999).

Pero es el cambio climático, y en particular los compromisos adquiridos en el Protocolo de Kyoto, los que hacen que surja la necesidad de realizar estudios que aporten datos sobre la emisión y absorción de gases efecto invernadero. Así se da especial importancia a los ecosistemas forestales como sumideros de carbono, ligando la relación entre el CO₂ almacenado y la biomasa de dichos ecosistemas.

Estos estudios a escala del monte suelen estar basados en estudios de la biomasa de las distintas componentes del árbol (raíces, fuste, ramas, ramillas y hojas), y en el establecimiento de modelos que relacionen los pesos de dichas componentes con variables de fácil medición en los inventarios forestales.

Por lo general la mayoría de los modelos de biomasa incluyen como única variable independiente el diámetro normal (KELLOMÄKI, 1999; KUMAR et al., 1998), o combinaciones del diámetro normal con otras variables como la altura (HINGSTON & GALBRAITH, 1998) o la edad (PORTE et al., 2002). También son numerosos los modelos, que basándose en la *pipe theory* (SHINOZAKI et al., 1964), emplean como variable independiente la superficie de albura (BERNINGER & NIKINMAA, 1994; MORATAYA et al., 1999; O'HARA & VALAPPIL, 1995).

En el caso de la biomasa foliar se puede observar, analizando las ecuaciones de diversas coníferas, que se consigue una precisión menor al introducir como única variable el diámetro normal, y que las regresiones mejoran sensiblemente cuando se incluye el diámetro de copa (HOFFMANN & USOLTSEV, 2002). Algunos autores, sin embargo, recomiendan el uso de las relaciones en función del diámetro normal como única variable (BALDWIN, 1989), justificado por la facilidad de medición del mismo y, por lo tanto, por la posibilidad de expandir las medidas en árboles individuales a medidas de biomasa por unidad de superficie.

Los sensores ópticos han sido empleados para la estimación de biomasa a escala regional, sin embargo estos sensores se saturan para valores elevados de biomasa (SADER et al., 1989). En la actualidad el uso de las nuevas tecnologías como el lidar permite realizar con facilidad medidas dasométricas de masas forestales sin la necesidad de recurrir a un inventario tradicional. El lidar es un sensor activo que envía pulsos láser. En función del tiempo que tardan en retornar se puede saber la posición exacta de la superficie sobre la que impactan. El tamaño del láser cuando toca con la superficie se denomina huella. Estos retornos no proporcionan una imagen completa (DUBAYAH & DRAKE, 2000), es decir, que el área de estudio está infra-muestreada. El espacio entre las huellas depende princi-

palmente de la altitud de la plataforma aerotransportada y de su velocidad (BALTSAVIAS, 1999); mientras que el tamaño de la huella depende de la divergencia del haz del láser y de la altitud de la plataforma, pudiéndose clasificar este tipo de equipos en función del tamaño de la huella (DUBAYAH & DRAKE, 2000): a) huellas pequeñas (unos pocos centímetros), y b) huellas grandes (decenas de metros).

Otro rasgo a tener en cuenta con respecto a las huellas es si el sistema sólo puede grabar el primer y/o el último retorno o ecos múltiples (es decir, el registro completo del retorno). En el primer caso, el primer retorno que llega al equipo proviene de la primera superficie interceptada, mientras que el último retorno procede de la última. En el caso del registro completo del retorno, éste representa la distribución vertical de todas las superficies interceptadas dentro de la huella (BLAIR & HOFTON, 1999). Los sistemas de huella pequeña normalmente graban el primer y/o el último retorno, mientras que los sistemas de huella grande normalmente graban el registro completo del retorno. La ventaja de los primeros es que se puede identificar por ejemplo la posición X, Y de la copa de cada uno de los árboles, ya que se dispone de la posición de cada retorno. Los segundos no permiten localizar la posición X, Y dentro del retorno, aunque tienen la ventaja de que el volumen de datos es menor facilitando su procesamiento, ya que hay un solo X, Y para distintos valores del retorno Z. La información de ambos no es tan diferente. Así, el registro completo del retorno que se obtiene con huellas grandes puede modelarse si la densidad de puntos de las huellas pequeñas es suficientemente alta como la suma de las reflexiones de las superficies individuales (primer y/o último retorno en huellas pequeñas) (BLAIR & HOFTON, 1999).

El uso del lidar ha demostrado su utilidad para la estimación de variables relacionadas con la estructura de la masa como la altura de la masa, el área basimétrica, el volumen del fuste o el número de pies (HOLMGREN, 2003; LEFSKY et al., 1999; NAESSET, 2002; NAESSET & BJERKNES, 2001; RIAÑO et al., 2004).

Hay que señalar que la mayoría de las estimaciones de biomasa predicen la biomasa total, usando, en la mayor parte de los casos, ecuaciones empíricas. Estos ajustes relacionan la bio-

masa con una o más variables predichas por el láser: la altura media del dosel, la altura mediana del dosel, la altura cuadrática media del dosel o la altura máxima del dosel (DRAKE et al., 2002; LEFSKY et al., 1999; NELSON et al., 1997). Todos estos estudios se han llevado a cabo utilizando el registro completo del retorno de huellas grandes, aunque también se han hecho algunos ensayos con huellas pequeñas (NELSON et al., 1988). En este estudio se aplica la tecnología lidar de huellas pequeñas a la estimación de la biomasa foliar de *Pinus sylvestris*, obteniéndose como resultado un mapa de biomasa foliar por unidad de superficie para dicha especie en Canencia (Madrid).

MATERIAL Y MÉTODOS

La zona de estudio se sitúa en la provincia de Madrid, en el término municipal de Canencia, en la sierra de Guadarrama (entre los 3,737 y los 3,773 grados de longitud oeste, y los 40,875 y 40,902 grados de latitud norte). El estudio se restringe a una masa pura de *Pinus sylvestris*, con densidades de alrededor de 600 pies por hectárea, áreas basimétricas entorno a los 37 m²/ha y alturas dominantes próximas a los 14 metros (ASSMANN, 1961).

El trabajo comprende una primera parte en la que se mide la biomasa foliar, mediante muestreo destructivo, y se estudian funciones que la relacionen con otras variables dendrométricas, cuya medición resulta más sencilla. A continuación se realiza un muestreo piloto en parcelas circulares de 10 metros de radio, que va a permitir el cálculo de la biomasa foliar por unidad de superficie. Finalmente se analizan las posibles relaciones entre dicha biomasa foliar y diversos parámetros obtenidos a partir del sensor lidar.

Medición de la biomasa foliar del árbol

La biomasa foliar se estima a partir de un muestreo destructivo de 10 árboles, dos de cada clase diamétrica de 5 cm. En primer lugar se mide su diámetro normal y dos diámetros de copa perpendiculares en direcciones N-S y E-W. A continuación se apean limpiando previamente la zona en la que vaya a caer el árbol para minimizar la pérdida de acículas. Una vez apeados se

miden la altura total y la altura de copa, ambas con cinta métrica.

A continuación se divide la copa en tres partes iguales, seleccionando una rama en cada una de las partes, es decir en el tercio superior de la copa, en la zona central y en el tercio inferior.

Tras pesar cada rama por separado ($P_{v\text{rama}}$), se separan todos los ramillos y se pesan ($P_{v\text{ramillos}}$). A continuación se separan 20 de estos ramillos y se pesan en verde ($P_{v20\text{ramillos}}$) y una vez secados en estufa ($P_{s20\text{ramillos}}$). Por último se toma una muestra de los ramillos y se separan las acículas, pesando en seco acículas y ramillos completos ($P_{s\text{acículas}}$ y $P_{s\text{ramillos}}$).

Finalmente se calcula la biomasa foliar en kg como $BF = P_v * K$, donde P_v representa el peso verde de las ramas del árbol y K el cociente medio del peso seco de las acículas y el peso verde de ramas (LÓPEZ-SERRANO et al., 2000):

$$K = \frac{\sum_i P_{v\text{ramillos}}}{\sum_i P_{v\text{rama}}} \cdot \frac{\sum_i P_{s20\text{ramillos}}}{\sum_i P_{v20\text{ramillos}}} \cdot \frac{\sum_i P_{s\text{acículas}}}{\sum_i P_{s\text{ramillos}}} \quad (1)$$

siendo i cada una de las 3 ramas.

Una vez calculada la biomasa foliar de cada árbol se estudia un modelo que relacione dicho valor con distintas variables dendrométricas: diámetro normal, altura total, altura de copa, superficie de proyección de la copa (calculada como una elipse a partir de los dos diámetros medidos), y volumen de copa (calculado como un elipsoide cuyos ejes son los dos diámetros y la altura de la copa).

Estimación de la biomasa foliar por unidad de superficie

Para expandir los valores de biomasa foliar del árbol individual a valores por unidad de superficie se realiza un muestreo piloto con 10 parcelas circulares de 10 metros de radio. Los centros de estas parcelas se localizan mediante topografía tradicional y dos GPS (solución entera de dobles diferencias) para su posterior relación con los datos procedentes del lidar (Figura 1).

En las parcelas de muestreo se localizan asimismo todos los árboles mediante su distancia al centro y su rumbo respecto al norte magnético, lo cual podría permitir establecer relaciones entre la biomasa y parámetros lidar pero a escala de árbol individual.

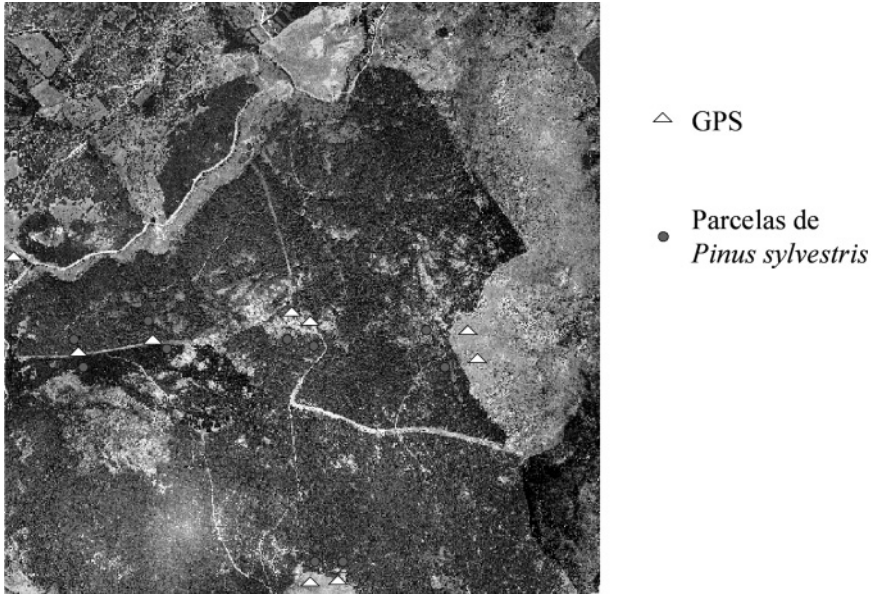


Figura 1. Fotografía aérea de la zona de estudio con la localización de las parcelas de muestreo y las medidas GPS

En cada árbol se miden el diámetro normal con forcípula, dos diámetros de copa perpendiculares en direcciones N-S y W-E, la altura total y la altura de la base de la copa con un hipsómetro Vertex III.

Cálculo de los parámetros lidar en las parcelas de muestreo

Aquellos pulsos láser que impactan dentro de cada parcela de muestreo se seleccionan para su comparación con los datos de campo. Es decir, se consideran los pulsos que se encuentran a una distancia menor de 10 m al centro de la parcela. Los datos lidar proporcionan la altura (Z) sobre el nivel del mar y se necesita obtener la altura sobre el suelo para cada pulso láser para lo que se utiliza el modelo digital del terreno (MDT) generado por el proveedor Toposys (www.toposys.com), basándose en el ángulo bisector entre pulsos láser (VON HANSEN & VÖGTLE, 1999). Este MDT se toma como altura del suelo verdadera sobre el nivel del mar para interpolar los datos lidar brutos. Para cada pulso láser (X, Y) se obtiene la altura interpolada del suelo con respecto al nivel del mar (Z'). La altura de la vegetación sobre el suelo se calcula como $Z-Z'$ (Fig. 2). El algoritmo de interpola-

ción utilizado es una función tipo spline. Dentro de cada parcela se realiza un cluster de tipo K-means que permite agrupar los pulsos utilizando como variable de agrupación la altura y así determinar si los pulsos pertenecen o no a la copa de los árboles. Se calculan entonces los siguientes parámetros: altura máxima de todos los pulsos (Z_{max}), altura mínima de la copa (Z_{min}), percentil 99 (Z_{99}) y 1 (Z_1) de los pulsos que impactan con las copas.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Biomasa foliar

Los resultados de la biomasa foliar obtenidos para los 10 árboles muestreados son los que aparecen, junto con distintas variables dendrométricas, en la tabla 1. En la tabla 2 se presentan las variables que se han estudiado como independientes y sus coeficientes de correlación con la biomasa foliar.

El mejor modelo para estimar la biomasa foliar en un árbol se encuentra empleando el método de regresión múltiple de selección de variables por pasos hacia delante. La curva resultante es la siguiente:

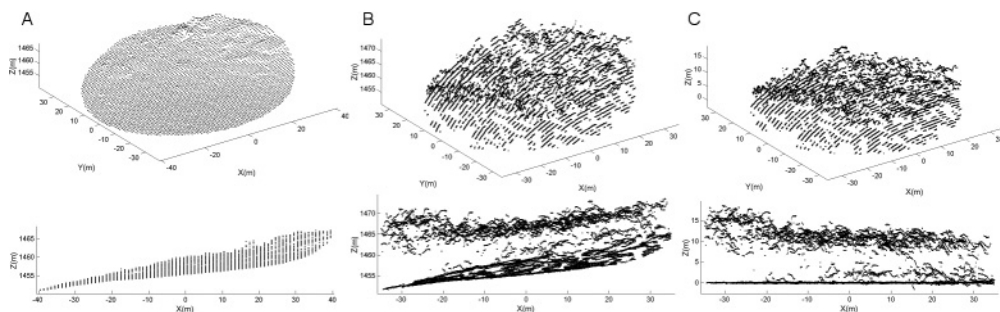


Figura 2. Generación de la altura sobre el suelo. Todos los pulsos láser con referencia al centro de la parcela. MDT proporcionado por el proveedor (A). Pulsos láser brutos con la altura sobre el nivel del mar (B). Pulsos láser con la altura sobre el suelo (C)

$BF = 2.5776 + 0.547877 * V_{copa} - 8.47494 * V_{copa}/d$ (2)
 donde BF es la biomasa foliar (kg), V_{copa} el volumen de la copa (m^3) y d el diámetro normal (cm). La tabla 3 muestra el resultado completo de esta regresión. Todos los coeficientes de la regresión son significativos. El coeficiente de determinación ajustado es de 98.89%, y el error estándar de la estimación inferior al 10%.

Se pueden aplicar modelos más sencillos, dependientes solo del diámetro normal, con los que se puede conseguir un coeficiente de deter-

minación del 94.8% (RIÑO et al., 2004). Sin embargo, se puede comprobar tras un análisis gráfico, que para valores crecientes del diámetro normal los residuos aumentan considerablemente. Este hecho se puede observar en las Figuras 3a y 3b donde se presentan el modelo seleccionado en este estudio y otro dependiente del diámetro normal en exclusiva.

Tras la aplicación de la ecuación anterior a las parcelas de muestreo, se obtienen valores de biomasa foliar que aparecen en la tabla 4. Se obser-

BF	d	h	hcopa	dcopa	Scopa	Vcopa
2.5923	14	5	2	2.215	3.74	4.99
1.9018	14.1	14.92	9.6	2.12	3.52	22.54
3.1913	17.60	11.85	4.35	2.22	3.81	11.05
4.1002	19.20	10.70	3.60	2.20	3.66	8.79
6.0904	21.00	14.50	7.50	2.43	4.60	22.98
5.8180	21.80	11.00	4.80	3.33	7.69	24.60
12.0855	26.20	9.62	5.62	4.39	13.88	52.02
13.2896	26.60	12.00	4.60	4.42	15.04	46.12
24.5889	28.80	11.23	6.30	5.00	19.63	82.47
28.9659	32.80	10.50	7.75	4.73	17.57	90.77

Tabla 1. Resultados obtenidos para la biomasa foliar BF en kg, el diámetro normal d en cm, la altura total h, la altura de copa hcopa y el diámetro de copa dcopa, en metros, la superficie de proyección de la copa Scopa, en m^2 , y el volumen de copa Vcopa en m^3

	d	g	h	hcopa	dcopa	Scopa	Vcopa
Coeff.Corr	0.9282	0.9595	-0.0470	0.3032	0.8938	0.9302	0.9753
P-valor	0.0001	0.0000	0.8974	0.3945	0.0005	0.0001	0.0000

Tabla 2. Coeficientes de correlación entre distintas variables y la biomasa foliar, donde d es diámetro normal, g área basimétrica, h altura total, hcopa altura de copa, dcopa diámetro de copa medio, Scopa superficie de proyección de la copa y Vcopa volumen de la copa

Variable dependiente: BF				
Parámetro	Estimación	Err. estándar	Estadís. T	P-Valor
CONSTANTE	2.5776	0.8077	3.1914	0.0152
Vcopa	0.547877	0.0438	12.516	0.0000
Vcopa / d	-8.47494	1.4872	-5.6988	0.0007

Tabla 3. Resultado del modelo de biomasa para un árbol

va que los valores de biomasa foliar tienden a crecer al aumentar la altura dominante de la masa.

Relación biomasa foliar–parámetros lidar

A la hora de encontrar una buena relación entre la biomasa foliar y el lidar resulta interesante por un lado, conseguir ajustes adecuados y por otro que la simplicidad de la ecuación permita su aplicación a toda la zona de estudio.

Así pues, tras probar distintas variables independientes: Zmax, Zmin, Z99 y Z1, finalmente se selecciona el siguiente modelo (Tabla 5):

$$BF = \exp(1.61189 - 19.0224/Z_{\max}) \quad (3)$$

Donde BF es la biomasa foliar en kg/m².

El coeficiente de determinación resulta ser R² = 82.50% y el error estándar inferior al 10%.

Otros modelos que incluyen como variables el Z 99 y el Z1 consiguen mejores ajustes (mejorando el coeficiente R² hasta el 88.49%). Sin embargo, esta ligera mejora complica demasiado su posterior aplicación a los datos lidar.

Creación del mapa de biomasa foliar de Canencia

El mapa de biomasa foliar se genera aplicando la ecuación 3 a toda la zona de estudio a partir del modelo digital de superficie (MDS) y el modelo

digital del terreno (MDT) que cuentan con una resolución de 0.5 m (Figura 4). Tal y como se ha explicado anteriormente el MDS lo genera el proveedor de los datos lidar Toposys, utilizando los valores de altura máxima e interpolando para obtener un grid regular. Al MDS se le resta el MDT obteniéndose la altura de la vegetación.

Para cada píxel se obtiene el valor máximo Zmax considerando el tamaño de 10 m de radio de las parcelas de muestreo. Para cada píxel se aplica entonces la ecuación 3.

A partir de aquí se puede estimar la biomasa foliar total de la zona, obteniendo un valor de 6770 tn, lo cual corresponde a un valor medio de alrededor de 13 tn/ha.

CONCLUSIONES

El escáner láser aerotransportado, que como se ha demostrado en trabajos anteriores puede servir para la estimación de variables tanto dendrométricas como dasométricas, se presenta aquí como una herramienta de gran interés para la estimación de la biomasa.

Si bien aquí la metodología se aplica al cálculo de la biomasa foliar exclusivamente, se

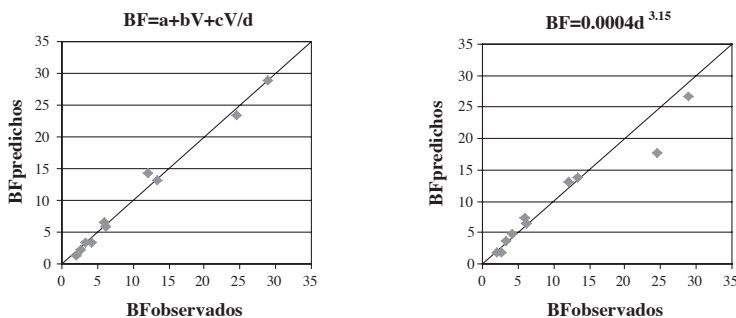


Figura 3 a (izda), b (dcha). Relación entre valores observados y valores predichos de la biomasa foliar para dos de los modelos analizados, dibujados por orden creciente de diámetros

BF(kg/m ²)	N(pies/ha)	G(m ² /ha)	Fcc (%)	Ho(m)
0.8240	509.30	26.80	67.00	10.00
0.9694	827.61	35.85	89.70	11.68
1.0215	572.96	31.22	73.92	11.25
1.0657	827.61	31.20	102.67	11.23
1.1097	732.11	32.80	97.02	12.30
1.4736	381.97	27.32	81.70	12.18
1.5594	636.62	63.21	85.50	17.10
1.5778	350.14	28.45	85.18	16.30
1.8925	668.45	57.73	90.77	19.60
2.2231	477.46	39.83	115.40	18.05

Tabla 4. Valores de la biomasa foliar por unidad de superficie, y de variables de masa. N representa el número de pies, G el área basimétrica, Fcc la fracción de cabida cubierta y Ho la altura dominante según el criterio de ASSMAN (1961)

Modelo Curva-S: $Y = \exp(a + b/X)$				
Variable dependiente: BF (kg/m ²)				
Variable independiente: Zmax				
Parámetro	Estimación	Err. Estándar	Estadís. T	P-Valor
Ordenada	1.6119	0.2082	7.7416	0.0001
Pendiente	-19.0224	2.8869	-6.5892	0.0002

Tabla 5. Resultado del modelo de biomasa-lidar

podría ampliar el estudio incluyendo la biomasa del resto de las componentes del árbol. Asimismo, al proporcionar lidar un modelo digital de la superficie, sería posible incluir también la biomasa del matorral.

El uso práctico, sustituyendo al inventario tradicional, para la estimación de la biomasa total, está supeditado a un estudio de comparación de costes. Si bien, parece probado que a medida que crece la superficie a inventariar, el coste del lidar se iguala e incluso es menor que el de los inventarios tradicionales.

En cualquier caso el uso del escáner láser aerotransportado, junto con una metodología similar a la aquí descrita, puede permitir la creación de mapas de biomasa, y por lo tanto mapas de sumideros de carbono.

BIBLIOGRAFÍA

- ASSMANN, E.; 1961. *Waldertragskunde*. BLV Verlagsges. München.
- BALDWIN, V.C.; 1989. Is Sapwood Area a Better Predictor of Loblolly-Pine Crown Biomass

Than Bole Diameter. *Biomass* 20(3-4): 177-185.

- BALTSAVIAS, E.P.; 1999. Airborne laser scanning: basic relations and formulas, *ISPRS J. Photogram. Rem. Sens.* 54(2-3): 199-214.
- BERNINGER, F. & NIKINMAA, E.; 1994. Foliage Area - Sapwood Area Relationships of Scots Pine (*Pinus-Sylvestris*) Trees in Different Climates. *Can. J. For. Res.* 24(11): 2263-2268.
- BLAIR, J.B. & HOFTON, M.A.; 1999. Modeling laser altimeter return waveforms over complex vegetation using high-resolution elevation data, *Geoph. Res. Letters* 26(16): 2509-2512.
- DRAKE, J.B., DUBAYAH, R.O., CLARK, D.B., KNOX, R.G., BLAIR, J.B., HOFTON, M.A., CHAZDON, R.L., WEISHAMPEL, J.F. & PRINCE, S.D.; 2002. Estimation of tropical forest structural characteristics using large-footprint lidar. *Rem. Sens. Env.* 79: 305-319.
- DUBAYAH, R.O. & DRAKE, J.B.; 2000. Lidar Remote Sensing of Forestry. *J. For.* 98(6): 44-46.
- HINGSTON, F.J. & GALBRAITH, J.H.; 1998. Application of the process-based model BIOMASS to *Eucalyptus globulus* ssp. glo-

- bulus plantations on ex-farmland in south western Australia - II. Stemwood production and seasonal growth. *For. Ecol. Manage* 106(2-3): 157-168.
- HOFFMANN, C.W. & USOLTSEV, V.A.; 2002. Tree-crown biomass estimation in forest species of the Ural and of Kazakhstan. *For. Ecol. Manage.* 158(1-3): 59-69.
- HOLMGREN, J.; 2003. Estimation of Forest Variables using Airborne Laser Scanning. *Acta Universitatis Agriculturae Sueciae. Silvicultura.* 278.
- KELLOMÄKI, S.; 1999. *Calculation of Foliage Mass and Foliage Area. Biogenic VOC emissions and photochemistry in the boreal regions of Europe - Biphorep.* Tuomas Laurila and Virpi Lindfors. Finland.
- KUMAR, B.M., GEORGE, S.J., JAMALUDHEEN, V. & SURESH, T.K.; 1998. Comparison of biomass production, tree allometry and nutrient use efficiency of multipurpose trees grown in woodlot and silvopastoral experiments in Kerala, India. *For. Ecol. Manage.* 112(1-2): 145-163.
- LEFSKY, M.A., HARDING, D., COHEN, W.B., PARKER, G. & SHUGART, H.H.; 1999. Surface lidar remote sensing of basal area and biomass in deciduous forests of eastern Maryland, USA. *Rem. Sens. Env.* 67(1): 83-98.
- LOPEZ-SERRANO, F.R., LANDETE-CASTILLEJOS, T., MARTÍNEZ-MILLÁN, J. & CERRO-BARJA, A.; 2000. LAI estimation of natural pine forest using a non-standard sampling technique. *Agr. For. Meteor.* 101: 95-111.
- MORATAYA, R., GALLOWAY, G., BERNINGER, F. & KANNINEN, M.; 1999. Foliage biomass sapwood (area and volume) relationships of *Tectona grandis* L. and *Gmelina arborea* Roxb.: silvicultural implications. *For. Ecol. Manage.* 113(2-3): 231-239.
- NAESSET, E.; 2002. Predicting forest stand characteristics with airborne scanning laser using a practical two-stage procedure and field data. *Rem. Sens. Env.* 80(1): 88-99.
- NAESSET, E. & BJERKNES, K.O.; 2001. Estimating tree heights and number of stems in young forest stands using airborne laser scanner data. *Rem. Sens. Env.* 78(3): 328-340.
- NELSON, R., KRABILL, W. & TONELLI, J.; 1988. Estimating forest biomass and volume using airborne laser data. *Rem. Sens. Env.* 24: 247-267.
- NELSON, R., ODERWALD, R. & GREGOIRE, T.G.; 1997. Separating the ground and airborne laser sampling phases to estimate tropical forest basal area, volume, and biomass. *Rem. Sens. Env.* 60(3): 311-326.
- O'HARA, K.L. & VALAPPIL, N.I.; 1995. Sapwood - Leaf-Area Prediction Equations for Multi-Aged Ponderosa Pine Stands in Western Montana and Central Oregon. *Can. J. For. Res.* 25(9): 1553-1557.
- PARRESOL, B.R.; 1999. Assessing tree and stand biomass: A review with examples and critical comparisons. *For. Sci.* 45(4): 573-593.
- PORTE, A., TRICHET, P., BERT, D. & LOUSTAU, D.; 2002. Allometric relationships for branch and tree woody biomass of Maritime pine (*Pinus pinaster* Ait.). *For. Ecol. Manage.* 158(1-3): 71-83.
- RIAÑO, D., CHUVIECO, E., CONDÉS, S., GONZÁLEZ-MATESANZ, J. & USTIN, S.L.; 2004. Generation of crown bulk density for *Pinus sylvestris* L. from lidar. *Rem. Sens. Env.* (Accepted).
- SADER, S.A., WAIDE, R.B., LAWRENCE, W.T. & JOYCE, A.T.; 1989. Tropical forest biomass and successional age class relationships to a vegetation index derived from Landsat TM data. *Rem. Sens. Env.* 28: 143-156.
- SHINOZAKI, K., YODA, K., HOZUMI, K. & KIRA, T.; 1964. A quantitative analysis of plant form -the pipe model theory. ii. further evidence of the theory and its application in forest ecology. *Jap. J. Ecol.* 14: 133-139.
- VON HANSEN, W. & VÖGTLE, T.; 1999. Extraktion der Geländeoberfläche aus flugzeuggetragenen Laserscanner-Aufnahmen. *Photogrammetrie Fern. Geoinf.* 4: 229-236.

EL USO DEL ESCÁNER LÁSER AEROTRANSPORTADO PARA LA ESTIMACIÓN DE LA BIOMASA FOLIAR DEL *PINUS SYLVESTRIS* L. EN CANENCIA (MADRID)

S. Condés Ruiz y D. Riaño Arribas

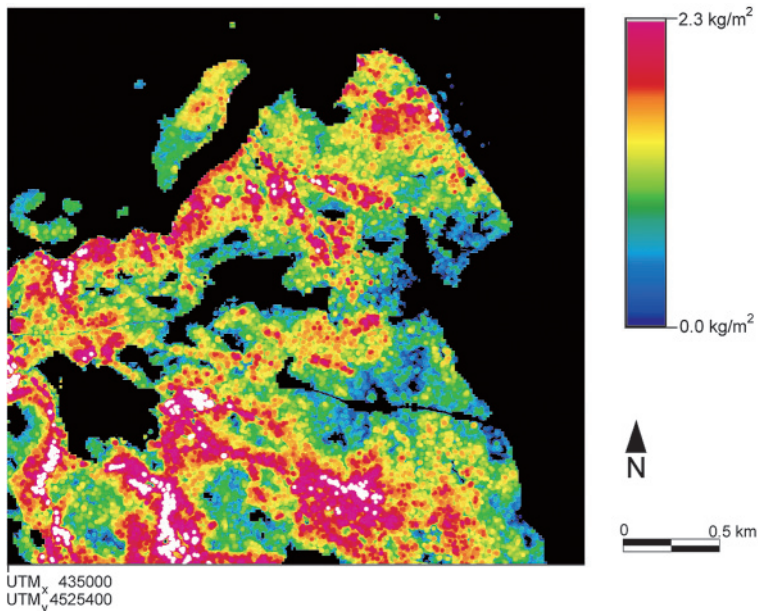


Figura 4. Mapa de biomasa foliar. Se excluyen las zonas de la imagen que no están cubiertas por pinar (en negro)