



7º CONGRESO FORESTAL ESPAÑOL

**Gestión del monte: servicios
ambientales y bioeconomía**

26 - 30 junio 2017 | Plasencia
Cáceres, Extremadura

7CFE01-241

Edita: Sociedad Española de Ciencias Forestales
Plasencia. Cáceres, Extremadura. 26-30 junio 2017
ISBN 978-84-941695-2-6

© Sociedad Española de Ciencias Forestales

Ecuaciones de biomasa para roble albar (*Quercus petraea* (Matt.) Liebl.) y rebollo (*Quercus pyrenaica* Willd) en la comarca de la “Castillería” en el Norte de la Provincia de Palencia

MANRIQUE GONZÁLEZ, J.M.¹, BRAVO OVIEDO, F.¹, DEL PESO TARANCO, C.¹ y HERRERO DE AZA, C.²

¹ Instituto Universitario de Investigación en Gestión Forestal Sostenible Universidad de Valladolid-INIA. Avda. Madrid 44, 34071, Palencia, España.

² ECM Ingeniería Ambiental. C/ Curtidores, 17. 34003. Palencia, España.

Resumen

En el valle de la Castillería situado en el norte de la provincia de Palencia, dentro del Parque Natural de Fuentes Carrionas y Fuente Cobre - Montaña Palentina, se llevó a cabo un inventario y apeo de árboles para ajustar ecuaciones de biomasa para las especies roble albar (*Quercus petraea* (Matt.) Liebl.) y rebollo (*Quercus pyrenaica* Willd) que crecen como masas mixtas en esta zona. En total se apearon 26 pies que fueron separados en fracciones, pesados en fresco y seco para conocer la biomasa de cada una de las fracciones de cada especie por separado. El ajuste de las ecuaciones se realizó utilizando la altura y el diámetro normal como variables explicativas en distintos modelos probados, para cada una de las especies por separado y considerando las dos especies juntas. Finalmente los parámetros de ajuste determinaron que la mejor opción es aquella que considera ecuaciones de biomasa para las dos especies juntas, al no encontrarse diferencias significativas.

Palabras clave

Ajuste simultáneo, gestión forestal, carbono, CO₂.

1. Introducción

Se denomina biomasa a la cantidad de materia orgánica de seres vivos que existen en un determinado ecosistema, generalmente expresado por la unidad de superficie o de volumen (PARDÉ, 1980). La gestión de los montes conlleva el conocimiento de los recursos existentes en las masas forestales. La cuantificación de esta biomasa es necesaria para su utilización como fuente de energía renovable, para la contabilización del CO₂ retenido en los ecosistemas forestales y por la potencialidad que presentan como sumideros de carbono en la mitigación del cambio climático.

Las ecuaciones alométricas de biomasa son relaciones entre el peso seco de biomasa y alguna variable del árbol (diámetro normal, altura, diámetro de copa...) o del rodal donde habita (densidad, productividad...) (BRAVO et al., 2007a). Estas relaciones permiten estimar la biomasa total y de los distintos componentes del árbol: raíz, fuste y copa (BARTELINK, 1997; MONTERO et al., 2005). Los primeros modelos desarrollados se utilizaron con haya (*Fagus sylvatica* L.) y fueron publicados por Cotta en 1804 (BOUCHON, 1974). Desde entonces numerosos estudios han cuantificado la biomasa y el carbono almacenado en diferentes tipos de vegetación (BROWN et al., 1989; DE JONG et al., 1995, DEANS et al., 1996; BRAVO et al 2007b).

A nivel mundial un gran número de autores han realizado ajustes alométricos para determinar la ecuación de biomasa en distintas especies, como para *Fagus sylvatica* L. en Países Bajos BARTELINK (1997); para *Larix spp.* en Siberia KAJIMOTO et al. (2006); para *Nothofagus pupilo* en Argentina LOGUERCIO y DEFOSSÉ (2002); para especies tropicales BROWN (2002) o para 65 especies de Norte América TER-MIKAELIAN & KORZUKHIN (1997). En España MONTERO et al. (2005) desarrollaron ecuaciones de biomasa para las distintas especies peninsulares, ajustando ecuaciones para la biomasa del fuste, de las ramas de más de 7 cm de diámetro, para las ramas de diámetro

comprendido entre 2 y 7 cm, para las ramas menores de 2 cm, acículas u hojas y sistema radicular utilizando el diámetro como variable dependiente. Posteriormente RUIZ-PEINADO et al. (2011, 2012) reajustaron las ecuaciones considerando como variables dependientes el diámetro y la altura mejorando la predicción de las ecuaciones.

La Fundación Centro de Servicios y Promoción Forestal y de su Industria de Castilla y León (CESEFOR) ha investigado la posibilidad de utilizar la madera de rebollo (*Quercus pyrenaica*) como uso enológico en la elaboración de vinos a partir de la utilización de duelas y fragmentos de madera. Para ello se necesitaban determinar parámetros dendrométricos y dasométricos de las especies de la zona de estudio, y los estudios preliminares de biomasa de MONTERO et al. (2005) y RUIZ-PEINADO et al. (2012) no consideraron la Castillería dentro de su zona de muestreo. Por eso se consideró oportuno ajustar unas ecuaciones de biomasa propias para esta comarca y así considerar su variabilidad geográfica y de gestión aplicada.

2. Objetivos

El presente estudio tiene como finalidad determinar para las masas roble (*Quercus petraea*) y rebollo (*Quercus pyrenaica*), un conjunto de ecuaciones de biomasa que determinen la biomasa total y la biomasa de cada fracción a partir del diámetro normal y la altura total del árbol.

3. Metodología

3.1. Área del estudio

La zona de estudio se encuentra en el valle de la Castillería en el Norte de la Provincia de Palencia, pertenece al término municipal de Cervera de Pisuegra, dentro del Parque Natural de Fuentes Carrionas y Fuente Cobre - Montaña Palentina. La situación geográfica viene definida por las coordenadas UTM ETRS89H30: Límite N X382875 Y4759193; límite E X388114 Y4756105, límite S X381664 Y4751808, límite W X379347 Y4755585.

Esta comarca está situada a sotavento de la Cordillera Cantábrica, presenta rasgos propios de las zonas de montaña y de transición entre un clima atlántico y mediterráneo, pertenece a la región de procedencia de Cordillera Cantábrica Meridional (DÍAZ-FERNÁNDEZ et al., 1995). La altitud mínima es de 1.090 metros y se localiza en la desembocadura del río Castillería en el embalse de Requejada y la máxima 2.143 metros en la cumbre del Valdecebollas, aunque administrativamente se encuentra fuera del área de estudio.

3.2. Muestreo y procesado de datos

Partiendo de un inventario forestal previo, que empleó una malla de muestreo de 200 por 200 m y un radio de parcela de 15 m, en el que se midió el diámetro normal (dbh) de todos los árboles de la parcela y altura total (ht) en los 3 árboles más próximos al centro de la parcela, con diámetro normal mayor de 10 cm, se seleccionaron 25 parcelas representativas de la zona en función de las especies, densidades, orientaciones y calidad de estación (Tabla 1).

Se realizó el apeo de 10 robles albares y 16 rebollos distribuidos entre las clases diamétricas 10 y la 35, apeándose en el exterior de cada parcela seleccionada, en un anillo de radio mayor de 15 m y menor de 50 m del centro de la parcela, pertenecientes a los estratos dominantes y codominantes, con buena conformación de copa y sin bifurcaciones.

Tabla 1. Número y porcentaje de pies por clase diamétrica en las 25 parcelas seleccionadas.

CD (cm)	nº pies <i>Quercus</i>	nº pies <i>Quercus</i>	% <i>Quercus</i>	% <i>Quercus</i>

	<i>pyrenaica</i>	<i>petraea</i>	<i>pyrenaica</i>	<i>petraea</i>
10	225	65	29,07	16,84
15	263	116	33,98	30,05
20	131	72	16,93	18,65
25	63	69	8,14	17,88
30	39	31	5,04	8,03
35	21	19	2,71	4,92
40	13	7	1,68	1,81
45	7	3	0,90	0,78
>50	12	4	1,55	1,04

Una vez apeados los árboles se tomaron como muestra las ramas ubicadas a las alturas de copa de 1/6, 1/2 y 5/6, se cortaron y pesaron con báscula, representando el 13,06 % del peso total de la biomasa de las copas. Posteriormente se pesó el resto de la copa. Para el secado de las muestras se utilizó una estufa de desecación y esterilización SELECTRA DRY-BIG a una temperatura de 75 °C con 6 baldas de secado de 1 por 0,5 m. Cada rama se dividió según las diferentes fracciones de biomasa propuestas por MONTERO et al. (2005): biomasa de las ramas de menos de 2 cm de diámetro (br2); biomasa de las ramas de 2 a 7 cm de diámetro (br27); biomasa de las ramas de más de 7 cm de diámetro (b7). Una vez terminado el proceso de secado, se tomaron los datos de los pesos secos de cada fracción de árbol y se procedió a calcular el peso total de cada fracción de biomasa dentro de cada árbol (Tabla 2), en función de la relación existente entre el peso en verde de las muestras de cada árbol y el peso seco de cada fracción de biomasa.

Tabla 2. Características de los árboles apeados por especie que constituyen la base de datos del ajuste para el cálculo de la ecuación de biomasa. br2: biomasa ramas de < de 2 cm de diámetro; br27: biomasa de las ramas de 2 a 7 cm de diámetro; b7: biomasa de las ramas de > de 7 cm de diámetro; bf: biomasa del fuste; bt: biomasa correspondiente a la suma de las diferentes fracciones de biomasa; ht: altura total (m); dbh: diámetro normal (cm).

		<i>br2</i> (kg)	<i>br27</i> (kg)	<i>b7</i> (kg)	<i>bf</i> (kg)	<i>bt</i> (kg)	<i>ht</i> (m)	<i>dbh</i> (cm)
<i>Quercus pyrenaica</i> nº:16	Media	12,27	34,33	21,72	176,79	245,11	14,27	21,42
	%	5,01	14,01	8,86	72,13	100,00		
	Desviación Típica	10,15	42,40	47,85	137,87	227,17	2,74	8,62
	Mínimo	2,61	0,48	0,00	27,03	32,10	9,84	10,30
	Máximo	34,65	120,19	152,18	406,48	713,50	18,16	36,45
<i>Quercus petraea</i> nº:10	Media	8,30	17,45	9,21	138,12	173,08	12,41	19,44
	%	4,79	10,08	5,32	79,80	100,00		
	Desviación Típica	6,44	22,31	19,79	127,84	170,88	3,05	7,36
	Mínimo	2,62	0,00	0,00	25,86	32,13	8,25	11,05
	Máximo	25,64	83,70	77,65	422,06	609,05	17,91	34,25
Suma <i>Quercus</i> n: 26	Media	9,83	23,94	14,02	152,99	200,78	13,12	20,20
	%	4,89	11,92	6,98	76,20	100,00		
	Desviación Típica	8,11	31,88	33,13	130,45	193,33	3,02	7,76

La fracción de biomasa de las hojas se decidió no utilizarla en el análisis estadístico al no ser representativa, ya que en el momento de muestreo el rebollo no había brotado y el roble albar estaba brotando y no había llegado al máximo desarrollo. Para el cálculo de la biomasa del fuste (*bf*) de cada árbol se utilizaron los diámetros tomados a lo largo del fuste. Se midieron los diámetros por debajo

del diámetro normal cada 0,5 m, correspondiendo a las alturas de 0,3 m y 0,8 m y diámetro a la altura del tocón. Por encima del diámetro normal se midieron cada metro los diámetros en las alturas de 2,3 m, 3,3 m así sucesivamente hasta llegar al ápice. El volumen del fuste se calculó por medio de la fórmula de Smalian (PARDÉ & BOUCHON, 1994). Con las densidades aparentes de 0,58 g/cm³ para el roble albar y de 0,61 g/cm³ para el rebollo (HERRERO, 2011) se calculó el peso del fuste para cada árbol.

3.3. Análisis estadístico

En primer lugar se realizó un análisis gráfico de los datos para detectar cualquier dato atípico, mediante la relación del diámetro normal y los diferentes pesos de las fracciones de biomasa. Con este proceso se depuraron los errores de la base de datos que pudieran alterar los resultados de la modelización.

Debido al pequeño tamaño muestral se decidió ajustar la ecuación de biomasa para las dos especies juntas (suma *Quercus*) y por separado para roble albar (*Quercus petraea*) y rebollo (*Quercus pyrenaica*) y comparar los resultados obtenidos para determinar si era posible una ecuación por especie o una para la suma de las dos especies.

Se probaron un total de 13 ecuaciones (tabla 13), constituidas por ecuaciones lineales y no lineales suficientemente probadas y utilizadas por otros autores (RUIZ-PEINADO et al., 2011, 2012) para determinar la ecuación que mejor se ajustase a cada fracción de biomasa. Como variables dependientes se consideraron el diámetro a la altura normal (dbh) y la altura total del árbol (ht).

Tabla 3. Ecuaciones de biomasa evaluados para las diferentes fracciones de biomasa del árbol. W: peso de la biomasa (kg), d: DBH (cm), h: HT altura total del árbol (m), α , β , λ , θ : parámetros de los modelos

Modelos	Ecuaciones evaluadas
Modelo 1	$W = \alpha + \beta \cdot d \cdot h$
Modelo 2	$W = \alpha + \beta \cdot d^2 \cdot h$
Modelo 3	$W = \alpha + \beta \cdot d + \lambda \cdot d^2$
Modelo 4	$W = \alpha + \beta \cdot d + \lambda \cdot d^2 + \theta \cdot d^2 \cdot h$
Modelo 5	$W = \alpha + \beta \cdot d + \lambda \cdot h$
Modelo 6	$W = \alpha + \beta \cdot d^2 + \lambda \cdot d^2 \cdot h$
Modelo 7	$W = \alpha + \beta \cdot d^2 + \lambda \cdot h$
Modelo 8	$W = \alpha + \beta \cdot d^2 + \lambda \cdot h + \theta \cdot d^2 \cdot h$
Modelo 9	$W = \alpha + \beta \cdot d^2 + \lambda \cdot d \cdot h$
Modelo 10	$W = \alpha + \beta \cdot d^2 \cdot h + \lambda \cdot d \cdot h$
Modelo 11	$W = \alpha + \beta \cdot d^\lambda \cdot h^\theta$
Modelo 12	$W = \alpha + \beta \cdot d^\lambda$

Modelo 13	$W = \alpha + \beta \cdot (d^2 \cdot h)^\lambda$
-----------	--

En todos los casos (fracciones individuales y combinación de algunas fracciones) se seleccionó el mejor modelo en función de los estadísticos de bondad de ajuste (tabla 4): suma de los errores al cuadrado (SSE), error cuadrático medio (MSE), raíz del error cuadrático medio (RMSE) y coeficiente de determinación (R^2). También se tuvo en cuenta, en la selección de los modelos, la condición de que todos los parámetros fueran significativos al menos con un $p < 0,05$ excluyéndose los modelos que no cumplieran esta condición.

Tabla 4. Estadísticos de ajuste y validación utilizados para la evaluación de los modelos. Donde y_i : valor observado; \hat{y}_i : valor estimado; \bar{y} : valor medio n : número de observaciones; p : número de parámetros.

Parámetro estimado	Símbolo	Fórmula	Ideal
Suma de los errores al cuadrado	SSE	$\sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2$	0
Error cuadrático medio	MSE	$\frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2}{n - p}$	0
Raíz del error cuadrático medio	RMSE	$\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2}{n - p}}$	0
Coefficiente de determinación	R^2	$1 - \frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2}{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}$	1
Sesgo medio	\bar{e}	$\frac{\sum_{i=1}^n y_i - \hat{y}_i}{n}$	0
Error absoluto medio	MAD	$\frac{\sum_{i=1}^n y_i - \hat{y}_i }{n}$	0
Porcentaje de error residual	$\bar{E}\%$	$\frac{\frac{\sum_{i=1}^n y_i - \hat{y}_i}{n}}{\bar{y}} * 100$	0
Porcentaje de error absoluto	MAD%	$\frac{\frac{\sum_{i=1}^n y_i - \hat{y}_i }{n}}{\bar{y}} * 100$	0

Para evitar heterocedasticidad, muy frecuente en datos de biomasa, se utilizó una regresión ponderada para homogeneizar la varianza de los residuos (LAMBERT et al., 2005; RUIZ-PEINADO et al., 2011). El análisis por regresión ponderada asocia a cada observación un peso igual a la inversa de su varianza (σ_i^2), este factor de ponderación se calcula a través de una función potencial de una variable independiente $\sigma_i^2 = (X_i)^k$ (PARRESOL, 2001; ÁLVAREZ-GONZÁLEZ et al., 2007). En el ajuste

simultáneo SUR (*Seemingly Unrelated Regressions*) (ZELLMER, 1962) se comprobó la convergencia del modelo y que todos los parámetros estimados fueran significativos (p -valor < 0,05).

Una vez elegido el mejor modelo de cada fracción de biomasa se ajustó simultáneamente con la biomasa total como suma de las fracciones de $br_2 + br_{27} + b_7 + bf$ y como $br_2 + br_{27} + bf + 7$, según la metodología SUR (ZELLMER, 1962). Este procedimiento confiere la propiedad aditiva a las ecuaciones generadas.

Para evaluar el poder predictivo global (tabla 4) de los sistemas de ecuaciones ajustados de cada especie se calculó el sesgo medio (\bar{e}), el porcentaje del error residual ($\bar{E}\%$), error absoluto medio (MAD) y el porcentaje del error absoluto (MAD%) de la biomasa aérea total predicha (bt_{pred}) frente a la observada (bt_{obs}). Con el resultado de los parámetros del ajuste se seleccionó el modelo que mejor se ajustara a cada especie o a la suma de las dos juntas. Todo el proceso fue realizado con SAS 9.1 (SAS Institute Inc, 2009).

4. Resultados

Los resultados (Tabla 5) muestran que para el caso de las dos especies juntas, el ajuste que considera la combinación de biomasa del fuste y biomasa de las ramas de diámetro superior a 7 cm obtuvo mejores resultados que considerando las fracciones por separado. En el caso de las dos especies por separado, se vio que la combinación de las dos fracciones ($bf+7$) mejora la predicción sobre las ramas (b_7). Por tanto en los tres casos, se obtuvieron mejores resultados, considerando el ajuste simultáneo de la fracción de biomasa del fuste junto con las ramas gruesas de diámetro superior a 7 cm ($bf+7$).

Tabla 5. Resultado del ajuste simultáneo para las dos especies juntas y para cada especie por separado, teniendo en cuenta distintas fracciones y modelos seleccionados. R^2 : coeficiente de determinación; br_2 : biomasa ramas < 2 cm de diámetro; br_{27} : biomasa de las ramas de 2 a 7 cm de diámetro; b_7 : biomasa de las ramas > de 7 cm de diámetro; bf : biomasa del fuste; $bf+7$: biomasa del fuste más las ramas con diámetro > de 7cm; bt : biomasa correspondiente a la suma de las diferentes fracciones de biomasa.

Especie	Fracciones	R^2 br2	R^2 br27	R^2 b7	R^2 bf	R^2 bf+7	R^2 bt
Suma <i>Quercus</i>	br2, br27, b7, bf, bt	0,8682	0,8746	0,772	0,9535		0,9881
Suma <i>Quercus</i>	br2, br27, bf+7, bt	0,8679	0,8726			0,9898	0,9891
<i>Quercus</i> <i>petraea</i>	br2, br27, b7, bf, bt	0,843	0,9186	0,7471	0,9809		0,9952
<i>Quercus</i> <i>petraea</i>	br2, br27, bf+7, bt	0,8431	0,9145			0,9935	0,9943
<i>Quercus</i> <i>pyrenaica</i>	br2, br27, b7, bf, bt	0,8926	0,9343	0,8814	0,9221		0,9794
<i>Quercus</i> <i>pyrenaica</i>	br2, br27, bf+7, bt	0,8928	0,9318			0,9890	0,988

Los errores (Tablas 6 y 7) fueron similares en todos los casos y dentro de los límites que podrían considerar óptimos (HUANG et al., 2003). Debido a los resultados obtenidos y puesto que el tamaño muestral es pequeño, se consideró que el sistema de ecuaciones de biomasa que mejor explicó los datos fue el que considera las dos especies juntas, sumando las fracciones de fuste y ramas gruesas mayores de 7 cm. Este sistema de ecuaciones presentó un error relativo medio 1,777 kg de signo positivo, subestimando ligeramente los datos, y un porcentaje de error medio del 0,885%.

Tabla 6. Errores para las distintas fracciones de biomasa obtenidos en los ajustes simultáneos de los casos considerados (dos especies juntas y para cada especie por separado). \bar{e} : el sesgo medio; MAD: error absoluto medio; $\bar{E}\%$: el porcentaje del error residual; MAD%: porcentaje del error absoluto; br2: biomasa ramas < 2 cm de diámetro; br27: biomasa de las ramas de 2 a 7 cm de diámetro; b7: biomasa de las ramas > de 7 cm de diámetro; bf: biomasa del fuste; bf+7: biomasa del fuste más las ramas con diámetro > de 7cm; bt: biomasa correspondiente a la suma de las diferentes fracciones de biomasa.

Especie	Fracciones	\bar{e} bt	MAD bt	$\bar{E}\%$ bt	MAD% bt
Suma <i>Quercus</i>	br2, br27, b7, bf, bt	4,683	15,984	2,3323	7,9607
Suma <i>Quercus</i>	br2, br27, bf+7, bt	1,7779	12,5602	0,8855	6,2556
<i>Quercus</i> <i>petraea</i>	br2, br27, b7, bf, bt	6,7129	21,655	2,7387	8,8347
<i>Quercus</i> <i>petraea</i>	br2, br27, bf+7, bt	6,414	19,317	2,6168	7,8808
<i>Quercus</i> <i>pyrenaica</i>	br2, br27, b7, bf, bt	1,0598	18,428	0,6123	10,647
<i>Quercus</i> <i>pyrenaica</i>	br2, br27, bf+7, bt	-11,520	12,680	-6,656	7,326

Tabla 7. Errores relativos de las diferentes fracciones de biomasa obtenidos en los ajustes simultáneos de los casos considerados (dos especies juntas y para cada especie por separado). \bar{e} : el sesgo medio; br2: biomasa ramas < 2 cm de diámetro; br27: biomasa de las ramas de 2 a 7 cm de diámetro; b7: biomasa de las ramas > de 7 cm de diámetro; bf: biomasa del fuste; bf+7: biomasa del fuste más las ramas con diámetro > de 7cm; bt: biomasa correspondiente a la suma de las diferentes fracciones de biomasa.

Especie	Fracciones	\bar{e} br2	\bar{e} br27	\bar{e} b7	\bar{e} bf	\bar{e} bf+7	\bar{e} bt
Suma <i>Quercus</i>	br2, br27, b7, bf, bt	0,6632	0,01554	-0,666	4,6706		4,683
Suma <i>Quercus</i>	br2, br27, bf+7, bt	0,5659	-0,6798			1,8917	1,7779
<i>Quercus</i> <i>petraea</i>	br2, br27, b7, bf, bt	1,3875	4,5136	2,5823	-1,7706		6,7129
<i>Quercus</i> <i>petraea</i>	br2, br27, bf+7, bt	2,1517	10,1014			-5,839	6,414
<i>Quercus</i> <i>pyrenaica</i>	br2, br27, b7, bf, bt	-0,151	-10,365	-0,122	11,698		1,0598
<i>Quercus</i> <i>pyrenaica</i>	br2, br27, bf+7, bt	-0,407	-12,443			1,331	-11,520

Los parámetros que definieron el sistema de ecuaciones para las dos especies juntas se muestran en la Tabla 8. Todos los parámetros resultaron significativos al 95% del nivel de confianza. Todos los modelos, que explican cada una de las fracciones de biomasa, incluyeron el diámetro normal y la altura total como variables independientes. Además presentaron un buen coeficiente de determinación superior en todo momento a 0,867.

Tabla 8. Ecuaciones de biomasa seleccionadas con ajuste simultáneo (SUR) para las dos especies juntas (*Quercus pyrenaica*. y *Quercus petraea*). br2: biomasa ramas < 2 cm de diámetro; br27: biomasa de las ramas de 2 a 7 cm de diámetro; bf+7: biomasa del fuste más las ramas con diámetro > de 7cm; SSE: suma de los errores al cuadrado; MSE: error cuadrático medio; RMSE: raíz del error cuadrático medio; R²: coeficiente de determinación; w_{r2}: peso seco de la biomasa de las ramas con diámetro < 2 cm (kg); w_{r27}: peso seco de la biomasa de las ramas con diámetro entre 2 y 7 cm (kg); w_{f+7}: peso seco de la biomasa del fuste más peso seco de la biomasa de las ramas con diámetro > de 7 cm (kg); dbh: diámetro normal (cm); ht: altura total (m).

Fracción	Modelo	SSE	MSE	RMSE	R ²
br2	$b_{r2} = 0,001333 \cdot dbh^2 \cdot ht$	217,4	8,5254	2,9197	0,8679
br27	$b_{r27} = 0,006531 \cdot dbh^2 \cdot ht - 0,07298 \cdot dbh \cdot ht$	3236,8	129,5	12,0699	0,8726
bf+7	$b_{f+7} = 0,023772 \cdot dbh^2 \cdot ht$	6182,1	242,4	15,5704	0,9898

La Figura 1 muestra la comparación de los valores de biomasa total observados frente a los predichos, para la ecuación seleccionada.

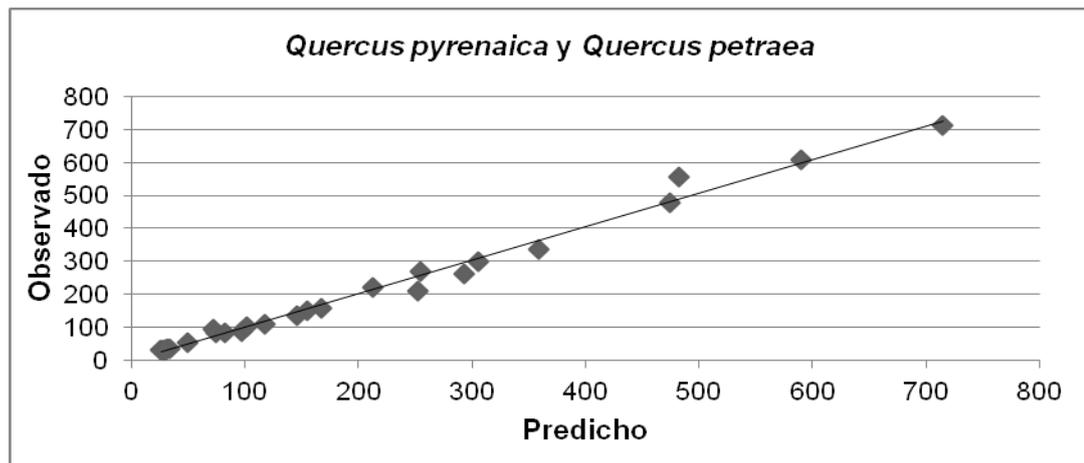
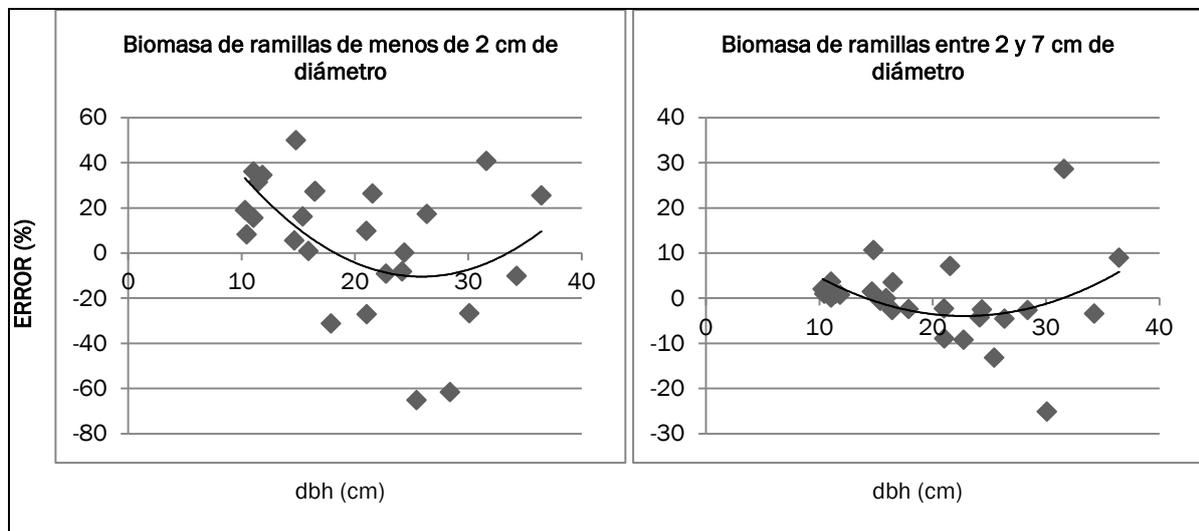


Figura 1. Valores observados y predichos de biomasa total (kg) para las dos especies juntas.

Además se analizó la distribución de residuos y precisión de las estimaciones respecto del diámetro normal (Figura 2).



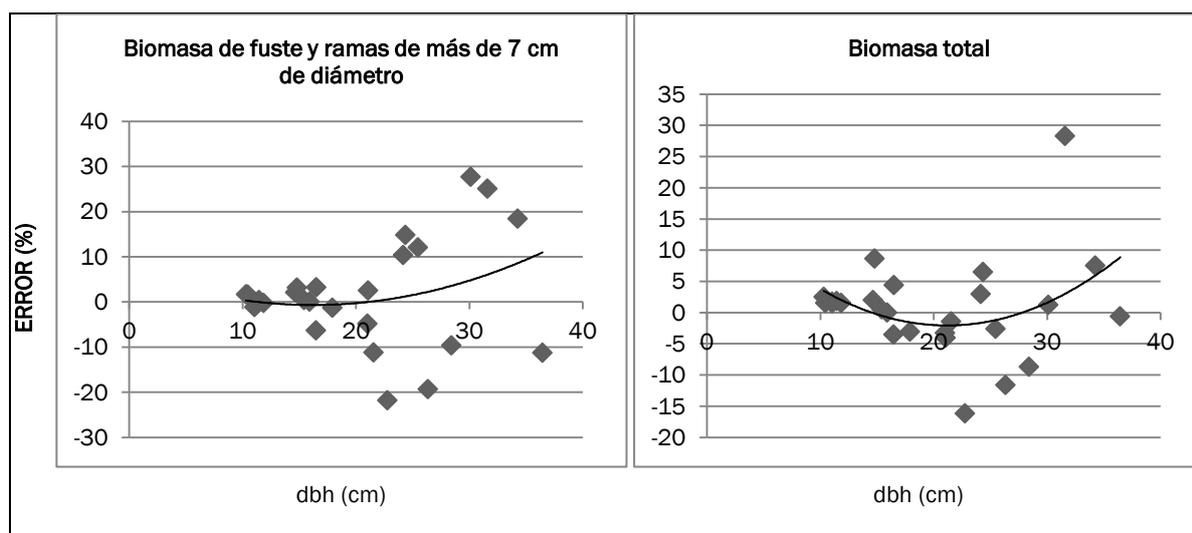


Figura 2. Porcentaje de error de predicción de la biomasa total por el diámetro normal en función del tipo de fracción para las dos especies juntas.

5. Discusión

El sistema de ecuaciones ajustado correspondiente a las dos especies en conjunto, presenta un avance significativo para la cuantificación de biomasa y carbono en estas especies y en la comarca de la Castillería. El sistema de ecuaciones ajustado es similar al obtenido por RUIZ-PEINADO et al. (2012) para rebollo a nivel estatal, donde también ajusta una ecuación para las fracciones de fuste y ramas de más de 7 cm en conjunto. En el caso de RUIZ-PEINADO et al. (2012) los coeficientes de determinación son 0,94 para $bf+7$; 0,78 para $br27$ y 0,71 para $br2$, siendo inferiores a los obtenidos para la ecuación de biomasa del presente estudio en la Tabla 8. El coeficiente de correlación del presente estudio, también fue superior al obtenido de las ecuaciones propuestas por GÓMEZ-GARCÍA et al, (2013) para definir la biomasa de *Quercus robur* L., aunque con una diferente división de fracciones. La muestra de árboles seleccionados al pertenecer a la misma zona, permite obtener parámetros estadísticos de mejor calidad y específicos para esta región.

En el presente estudio los modelos de biomasa ajustados simultáneamente presentaron coeficientes de determinación mayores en todo momento al 86%. También presentó buenos resultados en cuanto a los estadísticos de bondad del ajuste (Tablas 6 y 7). Además la precisión en la estimación de la biomasa de signo positivo (1,777 kg) muestra que el modelo subestima los resultados, siendo los resultados observados mayores que los predichos. En este sentido, la subestimación nos permite ofrecer resultados conservadores. Finalmente el error relativo se reduce al aplicar las ecuaciones a nivel de rodal (Tabla 6), lo que se debe a la compensación de los errores cometidos (por exceso y por defecto) mediante la aplicación de las ecuaciones árbol a árbol y su posterior agregación por parcela (FERNÁNDEZ-RIVAS, 2008).

Los modelos aditivos desarrollados con la regresión SUR tienen la ventaja que su ecuación general resulta de la suma de las fracciones de biomasa, confiriéndole consistencia al sistema de ecuaciones. Además los modelos desarrollados con este procedimiento resuelven los problemas de multicolinealidad que presentan los componentes de la biomasa (PARRESOL, 1999, 2001). Finalmente la combinación de las dos variables, diámetro y altura total del árbol, dentro de todos los modelos mejora su capacidad de predicción y amplía el rango para su potencial aplicación, considerando también que son variables comunes y fáciles de obtener (RUIZ-PEINADO et al., 2012).

La biomasa contenida en el fuste y ramas con diámetros de más de 7 cm representa casi el 83%, mientras que el de ramillas con diámetros menores de 2 cm representa el 4,65% y el de

ramillas con diámetro entre 2 y 7 cm representa el 12,37%. Estos datos son de vital importancia para valorar el uso de fragmentos de madera (astillas, virutas...) como uso enológico en la elaboración de vinos de calidad.

En la búsqueda de una mayor rentabilidad a los montes de la comarca de la Castillería, se debería comenzar a aplicar una gestión forestal para obtener madera de calidad para duelas. Esta silvicultura puede comenzar con pequeños trabajos culturales que destinen la madera de árboles de pequeñas dimensiones, no útiles para duelas, a la fabricación de astillas, chips u otras formas de madera para envejecimiento acelerado de vinos, con el fin de obtener un rendimiento económico a corto plazo y que sirva de base para la gestión forestal que optimice los recursos de la zona.

6. Conclusiones

El sistema de ecuaciones obtenido para la determinación de la biomasa total y de las fracciones (biomasa de las ramillas de diámetro menor de 2 cm, biomasa de las ramillas de diámetro comprendido entre 2 y 7 cm, biomasa de las fracciones ramas de diámetro mayor de 7 cm más biomasa del fuste) permite obtener el valor de la biomasa conociendo el diámetro normal y la altura total del árbol. El sistema de ecuaciones obtenido por la metodología SUR permite estimar la biomasa de especies arbóreas en sistemas forestales de manera precisa y garantizar la aditividad de las estimaciones. Estos datos son de vital importancia para valorar el uso de fragmentos de madera (astillas, virutas...) como uso enológico en la elaboración de vinos de calidad. Así se podría planificar una gestión forestal para obtener madera de calidad para duelas que comenzase con trabajos culturales que destinen la madera de árboles de pequeñas dimensiones, no útiles para duelas, a la fabricación de astillas, chips u otras formas de madera para envejecimiento acelerado de vinos, con el fin de obtener un rendimiento económico a corto plazo y que sirva de base para la gestión forestal que optimice los recursos de la zona.

7. Agradecimientos

A la Universidad de Valladolid (UVa) y la Fundación Centro de Servicios y Promoción Forestal y de su Industria de Castilla y León (CESEFOR) por la beca y la oportunidad de desarrollar este estudio. A la empresa SAIFOR, por la ayuda en la toma de datos.

8. Bibliografía

ÁLVAREZ-GONZÁLEZ, J.G.; RODRÍGUEZ-SOALLEIRO, R.; ROJO-ALBORECA, A.; 2007. Resolución de problemas del ajuste simultáneo de sistemas de ecuaciones: heterocedasticidad y variables dependientes con distinto número de observaciones. Cuad. Soc. Esp. Cienc. For. 42:35-42.

BARTELINK, H.H.; 1997. Allometric relationships for biomass and leaf area of beech (*Fagus sylvatica* L.). Ann. For. Sci. 54:39-50.

BRAVO, F.; DELGADO, J.A.; GALLARDO, J.F.; BRAVO-OVIEDO, A.; RUIZ-PEINADOR, R.; MERINO, A.; MONTERO, G.; CÁMARA, A.; NAVARRO, R.; ORDÓÑEZ, C.; CANGA, E.; 2007a. Métodos para cuantificar la fijación de CO₂ en los sistemas forestales. En: El papel de los bosques españoles en la mitigación del cambio climático. Bravo, F. (Ed.) 65-112

BRAVO, F.; HERRERO, C.; ORDÓÑEZ, C.; SEGUR, M.; GÓMEZ, C.; MENÉNDEZ, M.; CÁMARA, A.; 2007b. Cuantificación de la fijación de CO₂ en la biomasa arbórea de los sistemas forestales

españoles. En: El papel de los bosques españoles en la mitigación del cambio climático. Bravo, F. (Ed.) 143-196

BOUCHON, J.; 1974. Les tarifs de cubage. Tech. rep., ENGREF, Nancy, France.

BROWN, S.; 2002. Measuring carbon in forests: current status and future challenges. Environ. Pollut. 116: 363-372.

BROWN, S.; GILLESPIE, A.J.R.; LUGO, A.E.; 1989. Biomass estimation methods for tropical forests with applications to forest inventory data. Forest Science, 35(4): 881-902.

DE JONG, B.H.; MONTOYA-GÓMEZ, J.G.; NELSON, K.; SOTO-PINTO, L.; TIPPER, R.; 1995. Community forest management and carbon sequestration: A feasibility study from Chiapas, Mexico. Interciencia. 20(6): 409-416.

DEANS, J.D.; MORAN, J.; GRACE, J.; 1996. Biomass relationships for tree species in regenerating semi-deciduous tropical moist forest in Cameroon. Forest Ecology and Management, 88(3): 215-225.

DÍAZ-FERNÁNDEZ, P.; JIMÉNEZ, P.; MARTÍN, S.; TUERO, M.; GIL, L.; 1995. Regiones de procedencia *Quercus robur* L. *Quercus petraea* (Matt) Liebl, *Quercus humilis* Miller. I.C.O.N.A. Madrid. 87pp

FERNÁNDEZ-RIVAS, E.; 2008. Elaboración de ecuaciones de estimación de biomasa arbórea para plantaciones de *Eucalyptus nitens* Deane Maiden en Galicia. Proyecto Fin de Carrera. Universidad de Santiago de Compostela.

GÓMEZ-GARCÍA, E.; CRECENTE-CAMPO, F.; DIÉGUEZ-ARANDA, U.; 2013. Tarifas de biomasa aérea para abedul (*Betula pubescens* Ehrh.) y roble (*Quercus robur* L.) en el noroeste de España. Madera y bosques, 19(1), 71-91.

HERRERO, C.; 2011. Cuantificación de Carbono en pinares (*Pinus nigra* Arn., *Pinus pinaster* Ait., *Pinus sylvestris* L.) y rebollares (*Quercus pyrenaica* Willd) Mediterráneos. Tesis Doctoral. ETSIIAA. Universidad de

HUANG, S.; YANG, Y.; WANG, Y.; 2003. A critical look at procedures for validating growth and yield models. En: Modelling Forest Systems. Amaro, A.; Reed, D.; Soares, P. (Eds.) 271-293

KAJIMOTO, T.; MATSUURA, Y.; OSAWA, A.; ABAIMOV, A.P.; ZYRYANOVA, O.A.; ISAEV, A.P.; YEFREMOV, D.P.; MORI, S.; KIOKE, T.; 2006. Size-mass allometry and biomass allocation of two larch species growing on the continuous permafrost region in Siberia. Forest Ecol. Manag. 222: 314-325.

LAMBERT, M.; UNG, C.; RAULIER, F.; 2005. Canadian national tree aboveground biomass equations. Can. J. For. Res. 35:1996-2018.

LOGUERCIO, G.A.; DEFOSSÉ, G.; 2002. Ecuaciones de biomasa aérea, factores de expansión y de reducción de la lenga *Nothofagus pumilio* (OPEP.Et.Endl.) Krasser, en el SO del Chubut, Argentina. Actas del Congreso IUFRO World Series Vol. 13. Viena

MONTERO, G.; RUIZ-PEINADOR, R.; MUÑOZ, M.; 2005. Producción de biomasa y fijación de CO₂ por los bosques españoles. Monografías INIA: Serie forestal nº 13. Instituto Nacional de Investigación y Tecnología Agraria y Alimentaria. Madrid 270 pp.

PARDÉ, J.; 1980. Forest Biomass. For. Abstr. 41, 343-362

PARDÉ, J.; BOUCHON, J.; 1994. Dasometría. Paraninfo. Madrid. 387 pp

PARRESOL, B.R.; 1999. Assessing Tree and Stand Biomass: A Review with Examples and Critical Comparisons. *For. Sci.* 573-593.

PARRESOL, B.R.; 2001. Additivity of nonlinear biomass equations. *Canadian Journal of Forest Research* 31:865-878.

RUIZ-PEINADO, R.; DEL RÍO, M.; MONTERO, G.; 2011. New models for estimating the carbon sink capacity of Spanish softwood species. *Forest Systems* 20. 176-188

RUIZ-PEINADO, R.; MONTERO, G.; RIO, M.; 2012. Biomass models to estimate carbon stock for hardwood tree species. *Forest Systems* 21(1): 42-52.

SAS INSTITUTE INC.; 2009. SAS/Stat User's Guide, Release 9.1, Cary, N.C, USA.

TER-MIKAELIAN, M.T.; KORZUKHIN, M.D.; 1997. Biomass equations for sixty-five North American tree species. *Forest Ecol. Manag.* 97: 1-24.

ZELLNER, A.; 1962. An efficient method of estimating seemingly unrelated regressions and tests for aggregation bias. *J Am Stat Assoc.* 348-368