



7º CONGRESO FORESTAL ESPAÑOL

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

26 - 30 junio 2017 | Plasencia
Cáceres, Extremadura

7CFE01-242

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 perfil para las especies de 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.^{1,2}, BRAVO OVIEDO, F.¹, DEL PESO TARANCO, C.¹, HERRERO DE AZA, C.² y RODRÍGUEZ PUERTA, F.^{3, 4}

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.

³ Fõra forest technologies. C/ Eduardo Saavedra, 38. 42004, Soria, España.

⁴ Departamento de Producción Vegetal y Recursos Forestales, EU de Ingenierías Agrarias. Universidad de Valladolid, Soria, 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 perfil para las especies roble albar (*Quercus petraea* (Matt.) Liebl.) y rebollo (*Quercus pyrenaica* Willd) que crecen como masas mixtas en esta zona. Las ecuaciones de perfil proporcionan una información privilegiada de la evolución del diámetro a lo largo del fuste en las especies forestales. Su uso se ha generalizado debido a la flexibilidad que presentan para estimar los volúmenes de árboles individuales a distintos diámetros en punta delgada o con distintas longitudes de troza. Para ajustar la ecuación de perfil de estas dos especies se utilizó un total de 1329 pares altura-diámetros correspondientes a las alturas de 0,3 m; 0,8 m; diámetro normal (1,3 m), 2,3 m; 3,3 m y así sucesivamente cada metro hasta llegar al ápice del árbol. Los resultados determinaron que la ecuación de D'AQUITAINE (1999) es la que mejor describe el perfil para las dos especies de forma conjunta, no encontrándose diferencias significativas entre las dos especies por separado.

Palabras clave

Modelización, forma del fuste, volumen, dendrometría.

1. Introducción

Las funciones o ecuaciones de perfil del tronco fueron inicialmente introducidas por Höjer en 1903 (BEHRE, 1923) como un intento de describir el perfil del tronco de los árboles. Desde entonces éste ha sido un tema de gran interés en el sector forestal (KOZAK, 1988; BI, 2000).

Las ecuaciones de perfil expresan la reducción del diámetro a medida que se incrementa la altura a lo largo del tronco (NEWNHAM, 1992), lo que está altamente correlacionado con la calidad o aptitud de la madera para diferentes usos y el crecimiento del árbol (PETERSSON, 1999). Las ecuaciones de perfil están basadas en mediciones de diámetros a diferentes alturas del tronco, por lo que proporciona una estimación del volumen total y comercializable del árbol (MUHAIRWE, 1999).

Entre los estudios realizados en España para definir las ecuaciones de perfil en especies del género *Quercus* destacan los realizados por VILA-LAMEIRO et al. (2009). Estos autores determinaron que para *Quercus petraea* en el noroeste peninsular, la mejor ecuación que definía el perfil era el modelo de MAX & BURKHART (1976). Este resultado coincide con los obtenidos para otras especies de *Quercus spp* en el noroeste peninsular (BALBOA, 2001), para *Quercus robur* L. en Lugo (MANIN et al, 2001) y para otras especies como pino insigne (*Pinus radiata* D. Don) en España (CASTEDO y

ÁLVAREZ, 2000). Otros estudios realizados destacan la ecuación de D'AQUITAINE et al, (1999) para especies del género *Pinus* como para pino insigne (*Pinus radiata* D. Don) (BADÍA et al., 2001; MARTÍNEZ y HERRANZ, 2006), pino canario (*Pinus canariensis* Chr.Sm. ex DC.) (MARTÍNEZ y HERRANZ, 2006), para pino silvestre (*Pinus sylvestris* L.) y pino negral (*Pinus pinaster* Ait.) (LIZARRALDE, 2008) o para chopo (*Populus x euramericana* (Dode) Guinier cv. I-214) (RODRÍGUEZ y BLANCO, 2001), y en pinares (*Pinus nigra* Arn., *Pinus pinaster* Ait., *Pinus sylvestris* L.) y rebollares (*Quercus pyrenaica*) (HERRERO, 2011).

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. Por eso se consideró oportuno ajustar unas ecuaciones de perfil propias para esta comarca y así considerar su variabilidad geográfica y de gestión aplicada.

2. Objetivos

El objetivo específico del presente estudio es determinar una ecuación de perfil para roble albar (*Quercus petraea*) y rebollo (*Quercus pyrenaica*), en el valle de la Castillería en la provincia de Palencia.

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.

La 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 Requeja. 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).

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

CD	nº pies <i>Quercus pyrenaica</i>	nº pies <i>Quercus petraea</i>	% <i>Quercus pyrenaica</i>	% <i>Quercus 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

Se realizó el apeo de 40 robles y 46 rebollos (Tabla 2) distribuidos entre las clases diamétricas 10 y la 35, apeándose 3 ó 4 árboles 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. 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.

Tabla 2. Características de los árboles apeados por especie que constituyen la base de datos del ajuste para el cálculo de la ecuación de perfil.

		Edad (años)	Diámetro normal(cm)	Altura total(m)
<i>Quercus petraea</i> nº: 40	Media	74	20,94	14,05
	Desviación típica	20	6,91	2,59
	Mínimo	39	10,30	9,84
	Máximo	115	36,45	18,16
<i>Quercus pyrenaica</i> nº:46	Media	63	19,90	12,78
	Desviación típica	18	6,62	2,88
	Mínimo	30	9,55	6,95
	Máximo	103	34,25	17,91

3.3. Análisis estadístico

Para realizar el análisis estadístico se partió de una base de datos formada por diámetros relativos a distintas alturas procedentes de roble albar y rebollo. Lo primero que se realizó fue un análisis para detectar posibles anomalías en los datos, examinando el gráfico de dispersión entre el diámetro relativo y la altura relativa (Figura 1).

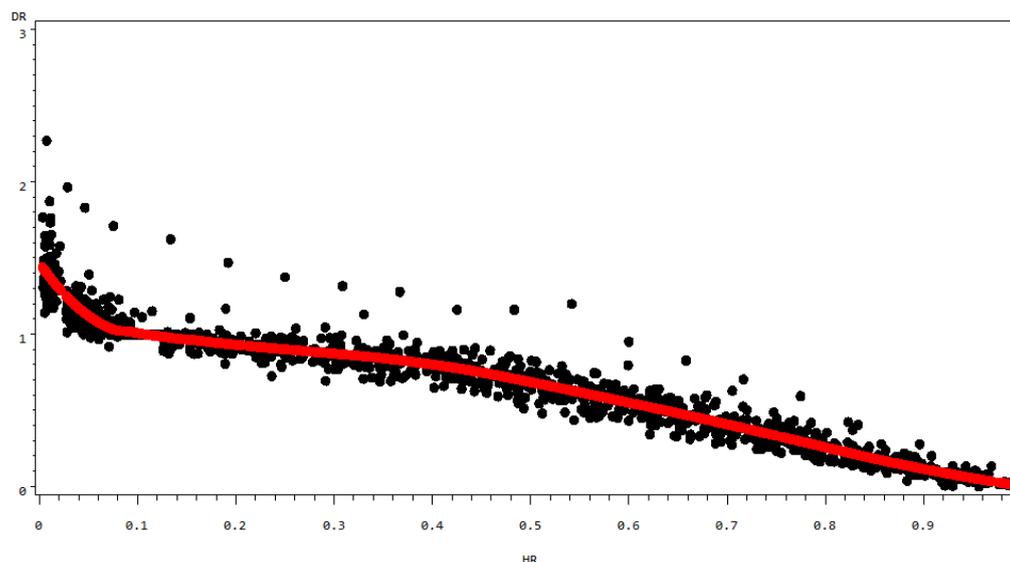


Figura 1. Distribución de datos de *Quercus petraea* (Matt.) Liebl. y *Quercus pyrenaica* Willd inicial.

Posteriormente para aumentar la eficiencia en la detección de datos atípicos se realizó un ajuste local cuadrático no paramétrico (asumiendo una distribución normal de los errores) usando regresión local Loess (CLEVELAND, 1993). Para ello se empleó el procedimiento LOESS del paquete estadístico SAS 9.1 (SAS Institute Inc, 2009) con un parámetro de suavizado de 0,3 para cada especie. Los residuos de cada ajuste Loess se dividieron en diez intervalos de altura relativa en los que se examinó su distribución y se calcularon dos valores límite para discriminar los datos atípicos: el cuartil inferior menos dos veces el rango intercuartílico y el cuartil superior más dos veces el rango intercuartílico (BI, 2000; RODRÍGUEZ y MOLINA, 2003). Los datos fuera de este rango no fueron incluidos en la fase de ajuste, eliminando 81 datos el 6,1 % del total. Muchos de ellos provenían de errores en la toma de datos, secciones deformadas o fuertes anomalías por bifurcaciones o grandes nudos.

Una vez depurada la base de datos se procedió a ajustar los datos a distintos modelos de perfil con el fin de determinar qué ecuación se ajustaba mejor. En total se probaron 18 modelos: tres ecuaciones polinómicas simples: KOZAK et al., (1969), MUNRO (1966), CERVERA (1973); dos modelos bisegmentados de exponente fijo: RODA (2001), MAX & BURKHART (1976); cuatro ecuaciones potenciales: ORMEROD (1973), DEMAERSCHALK (1972), DEMAERSCHALK I (1973), DEMAERSCHALK II (1973); dos modelos exponenciales: BRINK & GADOW (1986), HUI & GADOW (1997); modelos de exponente variable analizados: MUHAIRWE et al., (1993), MUHAIRWE I (1999), MUHAIRWE II (1999); D'AQUITAINE et al., (1999) y modelos trigonométricos de exponente variable: BI (2000), HUIQUAN (2000) y HUIQUAN (2000) modificado sin α_5 y α_6 .

Todas las ecuaciones de perfil probadas se ajustaron siguiendo métodos de regresión lineal a través de procedimientos PROC REG de SAS 9.1 (SAS Institute Inc, 2009) o no-lineal, en cuyo caso se utilizó el procedimiento PROC NLIN, también del paquete estadístico SAS 9.1. Los resultados del ajuste de los diferentes modelos, se evaluaron con distintos estadísticos de ajuste (tabla 3) como fueron el coeficiente de determinación (R^2), la suma de los errores al cuadrado (SSE), el error cuadrático medio (MSE) y la raíz del error cuadrático medio (RMSE).

Tabla 3. 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	$\bar{E}\%$	$\frac{\sum_{i=1}^n y_i - \hat{y}_i}{\bar{y}} * 100$	0
Porcentaje de error absoluto	MAD%	$\frac{\sum_{i=1}^n y_i - \hat{y}_i }{\bar{y}} * 100$	0

En los modelos con los mejores resultados de los estadísticos de ajuste se procedió a ajustar las ecuaciones con la estructura de error continua autorregresiva (CAR(p)) con el procedimiento MODEL del paquete estadístico SAS 9.1 (SAS Institute Inc, 2009), debido a la estructura de datos longitudinal (LINDSTROM & BATES, 1990). Una vez realizado este ajuste, se determinó el modelo que mejor se adaptaba a la base de datos.

La validación de los modelos se realizó mediante la técnica denominada validación cruzada (*leave-one-out-validation*) o de los residuos eliminados (ZHU & ROHWER, 1996) al carecer de independencia las medidas dentro de cada árbol.

Además se determinó mediante el test de Lakkis-Jones (KHATTREE & NAIK, 1999), si era necesario un modelo de perfil para cada una de las especies consideradas, roble albar y rebollo, en vez de uno único para los dos *Quercus spp.* mediante la comparación del modelo completo (dos ecuaciones una por especie) con el modelo reducido (una ecuación y las dos especies juntas) para ver si el resultado significativo o no.

4. Resultados

Los modelos que mostraron mejores parámetros a la hora del ajuste (Tabla 4) fueron los modelos de BI (2000), D'AQUITAINE et al. (1999), HUIQUAN (2000), CERVERA (1973) y DEMAERSCHALK (1972), presentando un coeficiente de determinación comprendido entre 0,9604 y 0,978. El resto de modelos presentaron parámetros no significativos o coeficientes por debajo de 0,92. No se logró ajustar la ecuación de MUHAIRWE et al., (1993) debido a que no convergía.

Tabla 4. Estadísticos de ajuste de todos los modelos probados para *Quercus sp.* antes de aplicar CAR. D: diámetro normal del árbol; DR: diámetro relativo, cociente entre el diámetro para una altura determinada y el diámetro normal; DR²: diámetro relativo al cuadrado; R: radio del diámetro normal del árbol; b_i, a_i, k_i: parámetros estimadores; R²: coeficiente de determinación; parámetros no significativos: parámetros del modelo que no han resultado significativos en la fase de ajuste; SSE: suma de los errores al cuadrado; MSE: error cuadrático medio; RMSE: raíz del error cuadrático medio y NC: no converge el modelo en el ajuste.

Modelo	Variable dependiente	R ²	Parámetros no significativos	SSE	MSE	RMSE
BI 2000	D	0,9786		2242,5	1,9415	1,3934
D'AQUITAINE 99	D	0,978		2304,6	1,9936	1,412
HUIQUAN 00	D	0,9769	todos	2426,7	2,101	1,4495
HUIQUAN 00 MOD	D	0,9767		2444,6	2,1129	1,4536
MUHAIRWE I 99	D	0,9753	b2 y b5	2593,4	2,2473	1,4991
HUI Y GADOW 97	R	0,9708	k5	764,6	0,6603	0,8126
CERVERA 73	DR	0,9619		6,7045	0,00579	0,0761
DAMAERSCHALK 72	D	0,9604		4153,9	3,5872	1,894
RODA 2001	S	0,948	a6	4386256	3794,3	61,5982
BRINK Y GADOW 86	R	0,9378	b0 y b2	1632	1,4081	1,1866
MUHAIRWE II 99	D	0,9343	b2 y b4	6891	5,9662	2,4426
DAMAERSCHALK II 73	DR ²	0,9305	b5 y b6	25,3248	0,0219	0,148
ORMEROD 73	DR	0,9137		15,191	0,0131	0,1144
KOZAR 69	DR ²	0,8757		45,2887	0,039	0,196
MAX Y BURKHART 76	DR ²	0,8757	b3, b4, a1, a2	45,2887	0,0392	0,1979
DAMAERSCHALK I 73	DR ²	0,8753	b1 y b2	45,4436	0,0392	0,1981
MUNRO 66	DR ²	0,8254		63,6214	0,0548	0,2354
MUHAIRWE 93	D	NC				

Solamente el modelo Bi (2000) convergió al realizar la CAR2, pero los parámetros CAR p_1 y p_2 no fueron significativos (Tabla 5). Aunque todos los modelos evaluados en la CAR1 obtuvieron resultados adecuados y muy parecidos de los estimadores del ajuste (Tabla 5) como se puede ver para los modelos de BI (2000), HUIQUAN (2000) y D'AQUITAINE et al., (1999).

Tabla 5. Estadísticos de ajuste CAR en los modelos de perfil probados para *Quercus sp.*

Orden CAR	Modelo	Variable depen_diente	R ²	Parámetros no significativos	SSE	MSE	RMSE
CAR0	BI 2000	D	0,9786		2242,5	1,9415	1,3934
CAR1	BI 2000	D	0,979	p1	2200,6	1,9069	1,3809
CAR2	BI 2000	D	0,979	p1 y p2	2198	1,9063	1,3807
CAR0	CERVERA 73	DR	0,9618		6,7045	0,0057	0,0761
CAR1	CERVERA 73	DR	0,9655		6,0774	0,0052	0,0725
CAR2	CERVERA 73	DR	NC				
CAR0	DAMAERSCHALK 72	D	0,9604		4153,9	3,5872	1,894
CAR1	DAMAERSCHALK 72	D	0,9667		3491,4	3,0176	1,7371

CAR2	DAMAERSCHALK 72	D	NC				
CAR0	D'AQUITAINE 99	D	0,978		2304,6	1,9936	1,4129
CAR1	D'AQUITAINE 99	D	0,9804		2051,4	1,7761	1,3327
CAR2	D'AQUITAINE 99	D	NC				
CAR0	HUI Y GADOW 97	D	0,9708	k5	3058,3	2,6411	1,6251
CAR1	HUI Y GADOW 97	D	NC				
CAR0	HUIQUAN 00 MOD	D	0,9767		2444,6	2,1129	1,4536
CAR1	HUIQUAN 00 MOD	D	0,9793		2169	1,8763	1,3698
CAR2	HUIQUAN 00 MOD	D	NC				
CAR0	MUHAIRWE I 99	D	0,9753	b2 y b5	2593,4	2,2473	1,4991
CAR1	MUHAIRWE I 99	D	0,9773	b5	2376,7	2,0613	1,4357
CAR2	MUHAIRWE I 99	D	NC				

El modelo seleccionado fue el D'AQUITAINE et al. (1999) debido a que obtuvo los mejores resultados, aunque muy parecidos a los otros dos modelos. Presentó un error relativo medio (\bar{e}) 0,014 cm de signo positivo, subestimando ligeramente, y un porcentaje de error medio (E%) del 0,096, inferior al 20% (HUANG et al., 2003). Si analizamos (Tabla 6) la variación del sesgo y el porcentaje error residual con el parámetro hr (cociente entre altura a un diámetro determinado y altura total), vemos que se obtienen valores inferiores a 20% a lo largo de todos los valores de hr . En el caso de la altura relativa menor de 0,1, es donde se observa un error mayor, debido a que los datos observados de diámetro en muchos casos eran inferiores a 1 cm. Se observan los errores mayores a medida que aumenta la hr , debido a la disminución del diámetro.

Tabla 6. Parámetros de ajuste de la ecuación de perfil D'AQUITAINE et al. (1999), para *Quercus sp.* hr : altura relativa (cociente entre altura a un diámetro determinado y altura total), dividida en 10 intervalos; $d_{obs.}$: media del diámetro observado; \bar{e} : error relativo medio; MAD: error absoluto medio; E%: porcentaje del error residual; MAD%: porcentaje del error absoluto.

	Media	$hr < 1$	$hr < 0,9$	$hr < 0,8$	$hr < 0,7$	$hr < 0,6$	$hr < 0,5$	$hr < 0,4$	$hr < 0,3$	$hr < 0,2$	$hr < 0,1$
$d_{obs.}$	14,35	24,62	22,09	18,82	18,00	15,98	13,13	10,26	6,96	3,72	1,13
\bar{e}	0,014	-0,012	0,016	-0,113	0,043	0,051	-0,122	0,031	0,052	0,113	0,094
MAD	0,887	1,404	0,687	0,661	0,787	0,949	0,973	0,923	0,781	0,623	0,313
E%	0,096	-0,050	0,071	-0,601	0,241	0,320	-0,929	0,301	0,747	3,038	8,283
MAD%	6,185	5,702	3,109	3,512	4,372	5,938	7,411	8,991	11,223	16,763	27,674

El test de Lakkis-Jones (KHATTREE & NAIK, 1999) mostró un p-valor de 0,83585 no significativo para la diferenciación en dos ecuaciones según especies, por lo que se consideró una única ecuación que englobe las 2 especies de la zona de estudio. Así la ecuación de perfil de D'AQUITAINE et al. (1999) para *Quercus spp.* definida para el valle de la Castillería con sus parámetros es la ecuación Eq.1.

$$d = \left(1 + 0,558513 \cdot e^{-25,933370 \frac{h}{ht}} \right) \cdot \left[0,942294 \cdot dbh \cdot \left(1 - \frac{h}{ht} \right)^{1,312840 - 0,342491 \cdot \left(\frac{ht}{dbh} \right) - 1,239930 \cdot \left(1 - \frac{h}{ht} \right)} \right] \text{ [Eq. 1]}$$

5. Discusión

En este estudio se seleccionó la ecuación propuesta por D'AQUITAINE et al. (1999) (Eq. 1), inspirada en la propuesta por NEWNHAN (1992) como la que mejor se adapta a las especies de roble albar y rebollo en la comarca de la Castillería en el Norte de Palencia. Esta ecuación fue elegida para las dos especies en conjunto, sin diferenciar una ecuación ajustada para cada una de las especies, debido al resultado del test Lakkis-Jones (KHATTREE & NAIK, 1999). La no necesidad de ajustar una

ecuación para cada especie puede ser debida: a) la similitud del perfil del tronco, es decir, a la similitud en cómo disminuye el diámetro a lo largo de la altura en ambas especies o b) al no haber recogido la variabilidad existente (pequeño tamaño muestral). En el segundo caso, el tamaño muestral (40 robles albares y 46 rebollos) es pequeño en comparación con otros estudios de esta temática donde sí encuentran diferencias entre especies muestreadas, como por ejemplo el realizado por LIZARRALDE (2008) en pinares del Sistema Ibérico. Este autor encontró diferencias significativas en la ecuación de perfil para pino silvestre y negral. En este caso, el tamaño de muestra fue mucho mayor (327 pino silvestre (*Pinus sylvestris* L.) y 273 pino negral (*Pinus pinaster* Ait.)). Sin embargo se consideró que los resultados confirman que no existen diferencias significativas en cuanto a la forma del perfil del tronco para estas dos especies ya que las especies son muy parecidas entre sí en esta comarca. Además la similitud de estas dos especies fue puesta de manifiesto por CASTAÑO-SANTAMARÍA & BRAVO (2012), donde no se encontraron diferencias significativas entre estas dos especies en el porcentaje del tipo de tejido leñoso (corteza, albura o duramen) en el tronco de ambas especies.

La ecuación de D'AQUITAINE et al. (1999) se seleccionó en otros trabajos, siendo la que mejor se ajusta a los datos en el caso del género *Pinus*, por ejemplo, en pino insignie (*Pinus radiata* D. Don) (BADÍA et al., 2001; MARTÍNEZ y HERRANZ, 2006), en pino canario (*Pinus canariensis* Chr.Sm. ex DC.) (MARTÍNEZ y HERRANZ, 2006), en pino silvestre (*Pinus sylvestris* L.) y pino negral del Sistema Ibérico (*Pinus pinaster* Ait.) (Lizarralde, 2008), y en pinares (*Pinus nigra* Arn., *Pinus pinaster* Ait., *Pinus sylvestris* L.) en los páramos ácidos de Casilla y León (HERRERO, 2011). También se utilizó en el género *Populus* para chopo (*Populus x euramericana* (Dode) Guinier cv. I-214) (RODRÍGUEZ y BLANCO, 2001).

Un grupo de autores (BALBOA, 2001; MANIN et al, 2001; VILA-LAMEIRO et al. 2009) probaron para diferentes especies de *Quercus* en la zona del noroeste de la Península Ibérica la ecuación de perfil de MAX & BURKHART (1976) con la que obtienen los mejores ajustes. En el presente estudio se probó el modelo MAX & BURKHART (1976), no obteniendo buenos resultados, debido a que cuatro de sus parámetros estimadores resultaron no significativos. En el presente estudio la ecuación de D'AQUITAINE et al. (1999) presenta mejores resultados que la ecuación de MAX Y BURKHART (1976). Cabe destacar que estos autores no probaron la ecuación de D'AQUITAINE et al. (1999).

Esta ecuación (Eq. 1) tiene la característica que cada una de sus variables explica una parte del árbol. Los tres primeros parámetros o variables explican el comportamiento del perfil por encima de la altura del pecho, donde β_{10} y β_{11} (representa la esbeltez del tronco) explican el comportamiento en la parte alta del tronco, que correspondería con el tronco de cono, mientras que β_2 explica la zona intermedia, la zona paraboloide del tronco. Los parámetros β_3 , β_4 , β_5 , explican la parte más baja del tronco, la zona del raigal de forma neiloide. Más concretamente β_3 muestra la anchura total del raigal, β_4 la altura de la zona y β_5 el diámetro relativo donde acaba el raigal y deja el árbol de ser neiloide.

El ajuste del modelo presentó limitaciones en las mayores alturas del árbol (Tabla 6), si bien se consideró que ésta es la parte menos importante desde un punto de vista tecnológico y económico. Esta peculiaridad también ha sido reflejada por otros autores (CRECENTE-CAMPO et al., 2009).

La ecuación de perfil del árbol obtenida es una buena herramienta, útil y fiable estadísticamente para determinar la forma del árbol, con la que se puede estimar de forma robusta y fiable el volumen mediante integración numérica, por el método Minle, y clasificar los distintos productos maderables en la mayor parte del fuste mediante programas como CubiFOR (RODRÍGUEZ et al., 2008). Con esta ecuación se pueden definir los criterios selvícolas para mejorar la silvicultura, obtener un mayor aprovechamiento de los productos forestales de la zona, en busca de la máxima rentabilidad por especie para impulsar la economía rural de la comarca de la Castillería.

Con el modelo de ecuación de perfil obtenido para las dos especies en conjunto (*Quercus petraea* y *Quercus pyrenaica*) se puede estimar el volumen total, el volumen maderable de las diferentes fracciones en las que se puede dividir el tronco (que permite conocer la biomasa acumulada en las distintas trozas), determinar el rendimiento de cada una de ellas (RODRÍGUEZ y BROTO, 2003), el uso comercial más adecuado (madera de desarrollo, de sierra, de trituración...) (AMIDON, 1984), determinar la cantidad de CO₂ almacenado y el periodo de retorno del CO₂ a la atmósfera en función del uso comercial (MONTERO et al., 2002)

6. Conclusiones

En este trabajo se ajustó la mejor ecuación que explica cómo evoluciona el perfil de *Quercus petraea* y de *Quercus pyrenaica* en la comarca de la Castillería. Se trata del modelo D'AQUITAINE et al., (1999), ecuación versátil y adaptable a diferentes grupos de datos y especies, que ha sido probada también con éxito por varios autores.

Con la obtención de la ecuación de perfil se obtiene una herramienta muy útil para la gestión forestal en esta comarca. Gracias a la ecuación se puede conocer el diámetro del árbol a cualquier altura requerida, lo que permite mediante métodos numéricos la resolución de sus integrales y conocer el volumen de los distintos productos obtenibles a nivel de comarca, definiendo con detalle sus particularidades tecnológicas.

El estudio de estas ecuaciones de perfil es de vital importancia para valorar la utilización de duelas de madera, procedentes de la comarca de la Castillería, 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

AMIDON, E.L.; 1984. A general taper functional form to predict bole volume for five mixed-conifer species in California. *Forest Sci.* 30 (1): 166-171

BADÍA, M.; RODRÍGUEZ F.; BROTO M.; 2001. Modelos de perfil del árbol. Aplicación al pino radiata (*Pinus radiata* D.Don). III Congreso Forestal Español. Granada. 5: 478-486

BALBOA, M.; 2001. Estudio de crecimiento y producción de *Quercus robur* L. en los municipios de A Fonsagrada y Ribeira de Piquín (Lugo). Proy. Fin de Carrera (Enx. De Montes). E. P. S. de Lugo, Universidade de Santiago de Compostela.

BEHRE, C.E.; 1923. Preliminary notes on studies of tree form. *J For* 21, 507-511.

BI, H.; 2000. Trigonometric variable-form taper equations for Australian eucalyptus. *For. Sci.* 46: 397-409.

BRINK, C.; GADOW, K.V.; 1986. On the use of growth and decay functions for modeling stem profiles. *EDV in Medizin u. Biología* 17(1-2): 20-27

CASTAÑO-SANTAMARÍA, J.; BRAVO, F.; 2012. Variation in carbon concentration and basic density along stems of sessile oak (*Quercus petraea* (Matt.) Liebl.) and Pyrenean oak (*Quercus pyrenaica* Willd.) in the Cantabrian Range (NW Spain). *Annals of Forest Science*, Springer Verlag (Germany), 2012, 69 (6), pp.663-672.

CASTEDO F.; ÁLVAREZ J.G.; 2000: Construcción de una tarifa de cubicación con clasificación de productos para *Pinus radiata* D.Don en Galicia basada en una función del perfil del tronco. *Invest. Agr.:Sist.Recur. For.* Vol.9(2):253-268.

CERVERA, J.; 1973. El área basimétrica reducida, el volumen reducido y el perfil. *Montes Nov-Dic* 1973. 415-418

CLEVELAND, W.S.; 1993. *Visualizing data*. AT&TBell Laboratories, Murray Hill.New Jersey. 360 pp.

CRECENTE-CAMPO, F.; ROJO, A.; DIEGUEZ, U.; 2009. A merchantable volume system for *Pinus sylvestris* L. the mountain ranges of Spain. *Ann. For. Sci.* 66: 808, 1-12

D'AQUITAINE, R.; SAINT-ANDRÉ, L.; LEBAN, J. M.; 1999. Modelling stem properties distribution. Final report of Subtask A2.1. Stud Research Project. FAIR CT-96-1915. (Leban, J.C.; Herve, J.C., Ed) En: INRA-ERQB Documento interno.. (Eds.) 3-23

DEMAERSCHALK, J.; 1972. Converting volume equations to compatible taper equations. *For. Sci.* 18: 241-245

DEMAERSCHALK, J.; 1973. Integrated systems for the estimation of tree taper and volume. *Can. J. For. Res.*, 3(1), 90-94

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

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 Valladolid.

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

HUI, G.Y.; GADOW, K.V.; 1997. Entwicklung und Erprobung eines Einheitsschaftmodells für die Baumart *Cunninghamia lanceolata*. *Forstw. Cbl.* 116: 315-321

HUIQUAN, B.; 2000. Trigonometric Variable-Form Taper Equations for Australian Eucalypts. *Forest Science* 46(3): 397-409

- KHATTREE, R.; NAIK, D.N.; 1999. Applied multivariate statistics with SAS software. SAS Institute Inc., Cary. North Carolina. 338 pp.
- KOZAK, A.; 1988. A Variable-Exponent Taper Equation. *Canadian Journal of Forest Res.* 18:1363-1368.
- KOZAK, A.; MUNRO, D.; SMITH, J.; 1969. Taper functions and their application in forest inventory. *Forest Chronicle*. Nº 45 (4). Págs. 278-283.
- LINDSTROM, M.J.; BATES, D.M.; 1990. Nonlinear mixed effects for repeated measures data. *Biometric*. 46: 673-687.
- LIZARRALDE, I.; 2008. Dinámica de rodales y competencia en las masas de pino silvestre (*Pinus sylvestris* L.) y pino negral (*Pinus nigra* Ait.) de los sistemas central e ibérico meridional. Tesis doctoral. ETSIIAA. Universidad de Valladolid. 256 pp
- MANIN, G.; BARRIO, M.; DÍAZ-MAROTO, I.J.; 2001. Tarifa de cubicación con clasificación de productos para *Quercus robur* L. en el norte de la provincia de Lugo. Actas del III Congreso Forestal Español. Mesa 5. 592-598
- MARTÍNEZ, Y.; HERRANZ, O.; 2006. Tarifas de cubicación y curvas de perfil de *Pinus canariensis* y *Pinus radiata* en la isla de Tenerife. Cabildo de Tenerife. Área de Medio Ambiente y Paisaje. Servicio Técnico Forestal. 29 pp
- MAX, T.A.; BURKHART, H.E.; 1976. Segmented polynomial regression applied to taper equations. *For. Sci.* 22: 283-289.
- MONTERO, G.; ALONSO, A.; RUIZ-PEINADOR, R.; CAÑELLAS, I.; CANDELA, J.A.; PAVÓN, J.; 2002. La fijación de CO₂ por las masas de pino piñonero en Andalucía. *Forestalia*, 7, 1-8
- MUHAIRWE, .K.; 1999. Taper equations for *Eucalyptus pilularis* and *Eucalyptus grandis* for the north coast in New South Wales, Australia. *For. Ecol. Manage.* 113: 251-269
- MUHAIRWE, C.K., LEMAY, V.M y KOZAK, A.; 1993. "Effects of adding tree, stand and site variables to Kozak's variables-exponent taper equation". *Can. J. For. Res.* Vol 24, pp: 252-259.
- MUNRO, D.D.; 1966. The distribution of log size and volume within trees. A preliminary investigation. Univ. British Columbia, Fac. of Forestry.
- NEWNHAM, R.M.; 1992. Variable-Form Taper Functions for Four Alberta Tree Species. *Canadian Journal of Forest Res.* 22: 210-223
- ORMEROD, D.; 1973. A simple bole model. *For. Chro.*, 49: 136-138
- PETERSSON, H.; 1999. A segmented stem profile model for *Pinus sylvestris*. *For. Ecol. Manage.* 124: 13-26

RODA, J.M.; 2001. Form function for the I-214 poplar merchantable item (*Populus x euramericana* (Dode) Guinier cv cultivar I-214).

RODRÍGUEZ F.; BLANCO R.; 2001. Tarifa de cubicación con clasificación de productos para chopo I-214 del valle medio del Cinca (Huesca). Actas del III Congreso Forestal Nacional. Mesa 4-5: 321-326

RODRÍGUEZ F.; BROTO M.; 2003. Cubica v1.2: Programa informático para cubicar y clasificar productos a partir de los datos procedentes de un inventario. Montes: Revista de Ámbito Forestal. 72: 33-38

RODRÍGUEZ, F.; BROTO M.; LIZARRALDE, I.; 2008. Aplicación para clasificar y calcular biomasa de bosques de castilla y León. CIM Madera, 157: 48-50.

RODRÍGUEZ F.; MOLINA, C.; 2003. Análisis de modelos de perfil del fuste y estudio de la cilindridad para tres clones de chopo (*Populus x euramericana*) en Navarra. Invest. Agr.: Sist. Recur. For.12 (3):73-85.

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

VILA-LAMEIRO, P.; DÍAZ-MAROTO, I.J.; BARCADA-PÉREZ, E.; FERRO-FERNÁNDEZ, I.; 2009. Construcción de una función de perfil para *Quercus petraea* Matts. (Liebl) en el noroeste peninsular. 5º Congreso Forestal Español. REF.: 5CFE01-126. Pp 6.

ZHU, H.; ROHWER, R.; 1996. No free lunch for cross-validation. Neural comput. 8: 1421-1426.