

Modelos de producción de corcho de árbol individual para la Sierra de San Pedro (Cáceres)

Manuel RODRÍGUEZ GALLEGO

Felipe BRAVO OVIEDO

Universidad de Valladolid

Gregorio MONTERO GONZÁLEZ

Instituto Nacional de Investigación y Tecnología Agraria y Alimentaria

RESUMEN

El alcornoque (*Quercus suber* L.) es una de las especies forestales más importantes de Extremadura debido a su importancia tanto económica como ecológica. Por lo tanto, la creación de modelos que predigan la producción de corcho es necesaria desde el punto de vista económico y de la gestión.

En el presente trabajo se desarrolla y pone a punto un modelo de producción de corcho de árbol individual independiente de la distancia para la Sierra de San Pedro (Cáceres). El desarrollo del modelo comprende el estudio de la correlación entre diferentes variables dendrométricas y la producción de corcho obtenida. Posteriormente, se estudia la influencia de una serie de variables, relacionadas con el vigor del árbol y la competencia, sobre la producción de corcho.

Palabras clave: alcornoque, corcho, modelos de producción, árbol individual.

ABSTRACT

Cork oak (*Quercus suber* L.) is one of the most outstanding forest species in Extremadura due to its economic and ecologic importance. Therefore, the creation of models for the prediction of cork production is necessary from the economic and management points of view.

In this work a distance-independent cork yield model at individual tree level is developed for Sierra de San Pedro (Cáceres, Spain). The model development includes the study of the correlation between some dendrometric variables and the obtained cork production. The influence of some variables related to vigour and competence over cork production is also analyzed.

Key words: cork oak, cork, yield models, individual tree level.

1. INTRODUCCIÓN

El alcornoque (*Quercus suber* L.) presenta un área de distribución con numerosas disyunciones, centrándose en general en la región mediterránea occidental, apareciendo las poblaciones más extensas y continuas en el suroeste de la península ibérica (España y Portugal) y en las costas occidentales del norte de África (Marruecos, Argelia y Túnez). Los datos de superficie cubierta por el alcornocal en España varían según la fuente entre las 365.000 y 478.000 ha (Montero, 1987), aunque en 1999 el *Natural Cork Quality Council* ofrecía unas cifras para el país de 510.000 ha, lo que da una idea de la importancia de la especie. Sin embargo, hay que tener en cuenta que, en la mayor parte de su área de distribución española, el alcornoque forma masas mixtas, apareciendo como dominante sólo en 104.254 ha (MAPA, 1998). Esta superficie se reparte casi exclusivamente en dos áreas principales: el Suroeste y Cataluña.

La estructura natural del alcornocal está fuertemente alterada por el hombre. Así los alcornocales de llanura han sido convertidos en dehesas o en bosques abiertos donde abunda el matorral colonizador, al igual que en las serranías, donde a pesar de su menor accesibilidad, no se han librado de incendios, pastoreo, etc.

Otra de las características de los alcornocales es que la mayor parte de los mismos se encuentran formando bosques mixtos, mezclados con otras especies arbóreas. Son comunes las mezclas con encina (*Quercus ilex* L.), acebuche (*Olea europaea* L. var. *sylvestris*) y quejigo andaluz (*Quercus canariensis* Willd.), aunque también se puede encontrar asociado a pinos (*Pinus pinaster* Sol. in Aiton, *Pinus pinea* L.) y a otras frondosas mediterráneas y submediterráneas como castaño (*Castanea sativa* Miller), quejigo (*Quercus faginea* Lam.), rebollo (*Quercus pyrenaica* Willd.) y roble pubescente (*Quercus humilis* Miller), sobre todo en las zonas periféricas de su área de distribución y en los enclaves donde el frío limita al alcornoque.

En contraste con otras especies forestales, en la cuales la producción de madera es el objetivo, el parámetro más importante en la selvicultura del alcornocal es el crecimiento del corcho, junto con aspectos relacionados con la biodiversidad y el uso agrosilvopastoral (dehesas). Considerando los incrementos en perímetro del tronco, se deben tener en cuenta dos componentes del crecimiento radial: el crecimiento de la madera, que es acumulativo a lo largo de la vida del árbol, y que resulta de la actividad del cambium, y el crecimiento del corcho, producido por el felógeno en períodos sucesivos de, por ejemplo, nueve años (Costa y otros, 2001). Durante el ciclo de producción de un alcornoque maduro, el crecimiento total anual en diámetro y el incremento del corcho muestran curvas similares, con tendencia a decrecer con el tiempo. Sin embargo, el corcho representa la parte más importante del crecimiento radial y presenta una variación interanual menos pronunciada que la madera. (Costa y otros, 2002a)

A pesar de la importancia de los alcornocales y el corcho en la Península Ibérica, apenas hay estudios para esta especie, y menos aún aquellos que tratan la modelización de la producción de corcho. Los estudios anteriores realizados son muy escasos y casi todos centrados en los alcornocales portugueses (Nunes de Mexía, 1934; Natividade, 1950; Gomes Guerreiro, 1951; Monteiro Alves, 1958; Monteiro y Morais, 1961; Ferreira y Oliveira, 1991; Fonseca y Parresol, 2001; Vázquez y otros, 2002; Ribeiro y Tomé, 2002), aunque también hay que destacar los estudios llevados a cabo en España por Montero (1987 y 1996) y González y otros (2000).

Los primeros modelos solían ser bastante sencillos, utilizando variables fáciles de medir. Posteriormente, el producto del perímetro a la altura del pecho y la máxima altura descorchada se convierte en la variable independiente más usada, como un compromiso entre la simplicidad y la aproximación a la superficie de descorche real (Montero,

1987; Ferreira, 1991). En la actualidad, se están empezando a desarrollar modelos de producción de árbol individual más complejos, como los de Fonseca y Parresol (2001) que incluyen intervalos de confianza; o los de Ribeiro y Tomé (2002), que utilizan variables independientes medidas sobre muestras de corcho, como el calibre. Otra innovación de éste último modelo es la utilización, como variable dependiente, del peso del corcho secado al aire.

Aunque la competencia es una de las fuerzas principales que controlan el desarrollo y crecimiento de las masas forestales y, en el caso particular de los alcornocales, el crecimiento y producción de corcho, son pocos los trabajos que incluyen variables de competencia para estimar la producción de corcho (Vázquez y otros, 2002). Sin embargo, sí se han realizado algunos estudios acerca de la influencia que tiene la densidad de una masa de alcornocal sobre la producción total de corcho de la misma (Motte, 1957; Montero y otros, 1993) o sobre ciertas características morfológicas y de tamaño de la copa del alcornoque (Paulo y otros, 2002).

El objetivo del presente trabajo es desarrollar modelos que permitan estimar la producción de corcho para cada árbol, al final del turno de descorche, a partir de mediciones realizadas en el momento de la saca del corcho, y sirvan para orientar la selvicultura de los alcornocales.

2. MATERIAL Y MÉTODOS

2.1. ÁREA DE ESTUDIO

Para el desarrollo del presente trabajo se estudiaron datos procedentes de quince parcelas de ensayo situadas en el monte Moro Alto del Mayorazgo, dentro del término municipal de Cáceres, pero cercano a los cascos urbanos de Aldea del Cano y Casas de Don Antonio. El monte se encuentra en la vertiente Norte de la Sierra de San Pedro, a una altitud media de 470 m. s. n. m. y tiene una orientación predominante N-NE, con pendientes que oscilan entre el 25 y el 30%.

Su situación geográfica queda delimitada por las siguientes coordenadas geográficas:

- Latitud: 39° 14' 40" - 39° 14' 10" N

- Longitud: 6° 24' 40" - 6° 24' 55" W

El clima de la zona es de tipo mediterráneo, con una temperatura media anual de 15,5°C y una precipitación de 647,76 mm. La precipitación se concentra principalmente en los meses de invierno, originándose un período seco entre junio y septiembre.

2.2. DATOS

Los datos de la muestra proceden de un proyecto de investigación del I. N. I. A., iniciado y dirigido en su primera fase por González Aldama y Currás y finalizado por Montoya y Montero. Este proyecto de investigación estaba encaminado a conocer las normas selvícolas más idóneas para conseguir un incremento de la producción y de la regeneración natural de los montes alcornocales, así como una mejora en la calidad del corcho producido.

Los más de 1.900 árboles que componen la muestra de las 15 parcelas, de forma cuadrangular y con una superficie unitaria de 1 ha, fueron individualizados mediante un número y se señaló con pintura su perímetro a la altura normal (1,3 m del suelo). Se realizaron dos mediciones, con un intervalo de nueve años, coincidiendo con la saca del corcho. De cada árbol se midieron las siguientes variables:

- *CSC* (cm): Circunferencia sobre corcho a 1,3 m del suelo (justo antes del descorche).
- *CBC* (cm): Circunferencia bajo corcho a 1,3 m del suelo, y tomada al inicio y final del turno de descorche.
- *CSB* (cm): Circunferencia sobre bornizo a 1,3 m del suelo.
- *Ht* (m): Altura total del árbol
- *Hf* (m): Altura del fuste.
- *Hd* (m): Altura de descorche (coincidente con la máxima longitud de descorche del árbol)
- *DC* (m): Diámetro de copa medido en dos direcciones perpendiculares.

Para calcular la superficie de descorche (*SD*) se tomaron:

- Altura descorchada en el fuste y circunferencia en el punto medio del mismo (justo después del descorche).
- Longitud descorchada en cada rama y circunferencia en el punto medio de la misma. (La longitud de descorche en ramas se mide desde su inserción con el fuste, por la parte superior, hasta donde llega la zona descorchada).

Para determinar la producción se pesó el corcho inmediatamente después de sacado del árbol (corcho fresco o verde).

- kg de corcho en plancha (panas mayores de 20 x 20 cm).
- kg de corcho en trozos (panas menores de 20 x 20 cm).
- kg de bornizo.

Con estos datos se calcularon las siguientes variables para cada árbol:

- *CR*: Relación de copa, relación entre la altura de la copa y la altura total del árbol considerado.
- *VC* (m³): Volumen de la copa del árbol tras asociar su forma a una semiesfera (forma de copa más común para árboles no sometidos a podas excesivas).
- *BAL* (m²/ha): Suma del área basimétrica de todos los pies de la parcela con sección normal mayor al árbol considerado. Esta variable sólo pudo ser calculada para las parcelas nº 3, 7 y 15, en las que se tenían datos de todos los pies presentes en las mismas.
- *PT* (kg): Kilogramos de corcho de reproducción, obtenido como suma de plancha y trozos.
- *PCM2* (kg/m²): Kilogramos de corcho de reproducción por metro cuadrado de superficie descorchada.

El desarrollo de las ecuaciones para la modelización de la producción de corcho se realizará en dos fases: ajuste y validación. Por ello, para la puesta a punto de los modelos reducidos (modelo básico sin incluir competencia ni variables de copa), el conjunto inicial de datos se ha dividido en dos grupos, uno para el ajuste (con el 70% de los datos) y otro para la validación (30% de los datos), aprovechando el elevado número de observaciones disponibles (Tablas 2 y 3).

Por otro lado, para el ajuste del modelo general (modelo que incluye, sobre el modelo reducido, datos que contemplan la influencia de factores como la competencia y las

variables de copa) solamente se emplearon datos procedentes de las parcelas 3, 7 y 15, pues eran las únicas que disponían de mediciones para todos los árboles, incluidos los macheros (pies que todavía no han sido descorchados). Esto resulta fundamental a la hora de utilizar el BAL como variable regresora, ya que considera el área basimétrica de todos los pies de la parcela con sección normal superior a la del individuo considerado.

El número de observaciones disponibles para el desarrollo del modelo general fue de 411, realizándose también una partición de la muestra en dos grupos, uno para el ajuste (70% de los datos) y otro para la validación (30% de los datos).

TABLA 1. Caracterización del conjunto inicial de datos

Nº obs.	Variable	Unidad	Máximo	Mínimo	Media	Desv. típica
1.920	<i>CSC</i>	cm	220,00	34,00	89,37	26,37
	<i>Hf</i>	m	5,60	0,40	2,32	0,72
	<i>DC</i>	m	11,75	1,00	5,56	1,61
	<i>Ht</i>	m	10,10	2,50	5,63	1,24
	<i>SD</i>	m ²	11,99	0,17	1,83	1,45
	<i>HD</i>	m	6,13	0,47	2,09	0,99
	<i>CR</i>	---	0,92	0,31	0,58	0,10
	<i>VC</i>	m ³	424,70	0,26	56,70	49,62
	<i>PT</i>	kg	107,70	1,30	19,30	15,68

TABLA 2. Caracterización de los datos utilizados para el ajuste

Nº obs.	Variable	Unidad	Máximo	Mínimo	Media	Desv. típica
1.344	<i>CSC</i>	cm	220,00	37,00	96,44	23,42
	<i>Hf</i>	m	5,60	0,40	2,42	0,71
	<i>DC</i>	m	11,75	1,00	5,97	1,44
	<i>Ht</i>	m	10,10	2,50	5,86	1,18
	<i>SD</i>	m ²	11,99	0,23	2,14	1,42
	<i>HD</i>	m	6,13	0,50	2,34	0,91
	<i>CR</i>	---	0,92	0,31	0,58	0,10
	<i>VC</i>	m ³	424,70	0,26	65,69	50,22
	<i>PT</i>	kg	107,70	1,64	22,58	15,46

TABLA 3. Caracterización de los datos utilizados para la validación

Nº obs.	Variable	Unidad	Máximo	Mínimo	Media	Desv. típica
576	<i>CSC</i>	cm	214,00	35,00	89,29	27,79
	<i>Hf</i>	m	5,10	0,40	2,31	0,72
	<i>DC</i>	m	11,50	1,45	5,55	1,71
	<i>Ht</i>	m	9,50	2,50	5,61	1,21
	<i>SD</i>	m ²	10,65	0,20	1,84	1,49
	<i>HD</i>	m	5,60	0,50	2,07	0,98
	<i>CR</i>	---	0,92	0,31	0,59	0,11
	<i>VC</i>	m ³	398,16	0,80	58,08	55,06
	<i>PT</i>	kg	105,40	1,30	19,62	16,32

2.3. MÉTODOS ESTADÍSTICOS

Para realizar una primera aproximación a los datos y estudiar las relaciones entre las principales variables dendrométricas y el peso del corcho, se representaron gráficamente dichas variables, una a una, frente a la variable dependiente y se calculó el coeficiente de correlación. El principal objetivo de este análisis es la selección de las variables regresoras más significativas, así como estudiar las formas más apropiadas de las funciones para expresar la relación entre las variables predictivas y el peso del corcho individual (lineal, logarítmica, cuadrática, etc.).

El ajuste de modelos lineales consiste, en un primera fase, en el análisis de los modelos propuestos por Montero y otros (1996) y Ribeiro y Tomé (2002), con los datos disponibles para este trabajo, mediante la aplicación del procedimiento PROC REG del módulo SAS STAT (SAS Institute, 1989).

Posteriormente, se ha de realizar una evaluación y validación de los modelos ajustados que permita contrastar su utilidad.

El concepto de evaluación de un modelo es muy amplio, y requiere no sólo de un examen estadístico y matemático del mismo, sino también biológico, que le otorgue consistencia y realismo, de manera que el comportamiento que describa esté de acuerdo con la conducta biológica y empírica esperada (Soares y otros, 1995; Vanclay y Skovsgaard, 1997). Cada uno de los componentes del modelo y el modelo completo deben ser lógicamente consistentes y ajustarse a la realidad desde un punto de vista biológico.

Cuando se realiza un análisis de regresión, y se selecciona un determinado modelo que parece explicar mejor el comportamiento de un fenómeno a partir de los datos disponibles, es necesario verificar después que las hipótesis a las que está sujeto el procedimiento son aceptables. Esta verificación debe constituir la siguiente etapa tras la comprobación de la adecuación del modelo, su buen ajuste, y la significación de todos los parámetros. Los métodos gráficos permiten una primera aproximación al comportamiento del modelo y de los errores, pero los test de hipótesis, cuando pueden ser aplicados, son métodos más formales de verificación.

Para Vanclay y Skovsgaard (1997), la mejor manera de demostrar la calidad de un modelo consiste en testarlo con datos totalmente independientes de los utilizados para el ajuste. Esto plantea el problema de que se requieren entonces un dispositivo de datos para el ajuste y otro diferente para la validación, hecho que no siempre es posible. Por ello algunas veces, se opta por dividir el conjunto total de datos iniciales en dos grupos, siempre que la repartición no comprometa la representatividad de los datos iniciales que se utilicen para el ajuste (que impida entonces detectar la posible influencia que sobre la respuesta ejerce alguna variable independiente, o que produzca un efecto no deseado de reducción en la precisión de la estimación de los parámetros).

La validación se ha llevado a cabo mediante el estudio de una serie de estadísticos, basados en los residuos, que permiten la evaluación de los modelos en cuanto a precisión y sesgo (Soares y otros (1995) en Ribeiro y Tomé, 2002):

- Media de los residuales de la predicción (M_{rp}), que evalúa el sesgo del modelo:

$$M_{rp} = \frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)}{n}$$

Este estadístico mide el error que se produce al combinar varias observaciones completamente o mediante medias. Su valor debe ser próximo a cero.

- Media de los residuales de la predicción en valor absoluto (MA_{rp}), que evalúa la precisión del modelo:

$$MA_{rp} = \frac{\sum_{i=1}^n |y_i - \hat{y}_i|}{n}$$

MA_{rp} mide el error medio asociado con una sola predicción. Su valor debe ser tan pequeño como sea posible.

- Eficiencia del modelo (EF), o proporción de la variación explicada por el modelo:

$$EF = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2}{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}$$

Este estadístico proporciona un sencillo índice de funcionamiento en una escala relativa, donde 1 indica un ajuste perfecto y 0 revela que el modelo no es mejor que una media. Sin embargo, este método de evaluación no es del todo fiable, ya que la obtención de valores altos no implica necesariamente que los modelos sean realmente eficaces, como demuestran Soares y otros (1995).

-Residuales *PRESS*, que se calculan mediante la siguiente expresión:

$$PRESS = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_i - y_{i,-i})$$

donde $y_{i,-i}$ es el valor estimado para el individuo i por un modelo ajustado sin la presencia de ese mismo individuo (Myers, 1990). Interesa que *PRESS* tome valores pequeños y cercanos a la suma de cuadrados de los residuales.

- La apreciación de la calidad del modelo puede venir dada también a través de la comparación del valor hallado del error medio cuadrático (*MSE*) con los nuevos datos, y el de la regresión. Estos dos valores deben ser tan parecidos como sea posible.

$$MSE = \bar{\sigma}^2 = \frac{\sum (y_i - \hat{y}_i)^2}{n - 1}$$

2.4. ESTRUCTURA GENERAL DEL MODELO

Antes del desarrollo del modelo se estudiaron los factores que pueden tener más influencia sobre la producción de corcho. En general, los estudios realizados hasta el momento, han tenido en cuenta variables relacionadas con el tamaño del árbol y el descorche (Montero, 1987, 1996), además del número de ramas descorchadas (Ferreira y otros, 1991; Tomé y Ribeiro, 2002) o el calibre del corcho obtenido (Tomé y Ribeiro, 2002 ; Fonseca y Parresol, 2001).

En este trabajo se pretende analizar, además, la relevancia de otros dos factores que pueden incidir significativamente sobre la producción de corcho a nivel individual, como son el vigor del árbol (explicado a partir de diferentes variables de copa) o la competencia.

Así, el esquema general del modelo será el siguiente:

Modelos reducidos:

$$LnPT = \beta_0 + \beta_1 \cdot LnTAMAÑO + \beta_2 \cdot LnDESCORCHE$$

$$LnPT = \beta_0 + \beta_1 \cdot Ln(TAMAÑO \cdot DESCORCHE)$$

Por lo tanto se han estudiado siete modelos reducidos alternativos.

Modelo general:

Una vez seleccionado el mejor modelo reducido se ha ajustado el siguiente modelo general:

$$\text{LnPT} = \{\text{Modeloreducido}\} + \beta_3 \cdot \text{LnVIGOR} + \beta_4 \cdot \text{LnCOMPETENCIA}$$

3. RESULTADOS

3.1. SELECCIÓN DE VARIABLES EXPLICATIVAS

Se comprobó, a través de la representación gráfica y del cálculo de los coeficientes de correlación, cuáles de las potenciales variables explicativas presentaban una relación más fuerte con la variable dependiente. Los resultados obtenidos se compararon con la bibliografía existente (Montero, 1987 y 1996; Ferreira y otros, 1991) llegándose a la conclusión de que los regresores que presentan las mayores correlaciones coinciden con los señalados por dichos autores para distintas zonas geográficas y tratamientos selvícolas. Así, los coeficientes de correlación más altos aparecen para la superficie de descorche (*SD*), la altura de descorche (*HD*) y el perímetro normal sobre corcho (*CSC*) (Figura 1).

Sin embargo, la determinación de la superficie total de descorche conlleva una mayor complejidad y tiempo, puesto que implica, en algunos casos, una medición exhaustiva de todas las ramas principales descorchadas. Por tanto, se trabajará también con otras variables alternativas, quizá no tan buenas predictoras, pero más fáciles de medir en campo.

Modelos de producción seleccionados:

Una vez ajustados los siete modelos (Tabla 4) reducidos iniciales se procedió a la evaluación de los mismos.

Inicialmente se estudiaron los coeficientes de determinación de cada modelo (R^2 y R^2 - ajustado). Así, los modelos 1 y 2 se descartan debido a los valores de dichos coeficientes, significativamente inferiores al resto.

Un posterior análisis de los parámetros estimados en cada modelo ($\hat{\beta}_j$), llevó a la eliminación de los modelos 6 y 7, debido a que presentaban una clara inconsistencia biológica. En ambos casos, el signo negativo que acompaña a alguno de los parámetros contradice las observaciones empíricas, puesto que éstas relacionan el aumento en la producción de corcho con incrementos en los valores de las variables afectadas por dichos parámetros.

De este modo, ambos modelos indicarían que el incremento de la variable *CSC* (Circunferencia Sobre Corcho) conlleva una reducción de la producción total de corcho para ese árbol. Este hecho no responde a las expectativas generadas a partir de la observación directa en campo y del gráfico de correlación entre la variable *CSC* y la variable dependiente (*PT*).

Así pues, los tres modelos que presentaban mayores coeficientes de determinación y a la vez eran consistentes biológicamente, pasaron a las fases de verificación de las hipótesis de partida y validación.

Los modelos 4 y 5 son equivalentes por lo que sólo se evaluará el modelo 5 ya que, de este modo, se puede realizar una comparación entre la eficacia predictiva de la superficie de descorche teórica (modelo 5) y la superficie de descorche real (modelo 3).

FIGURA 1. Correlación entre las variables regresoras y el peso del corcho

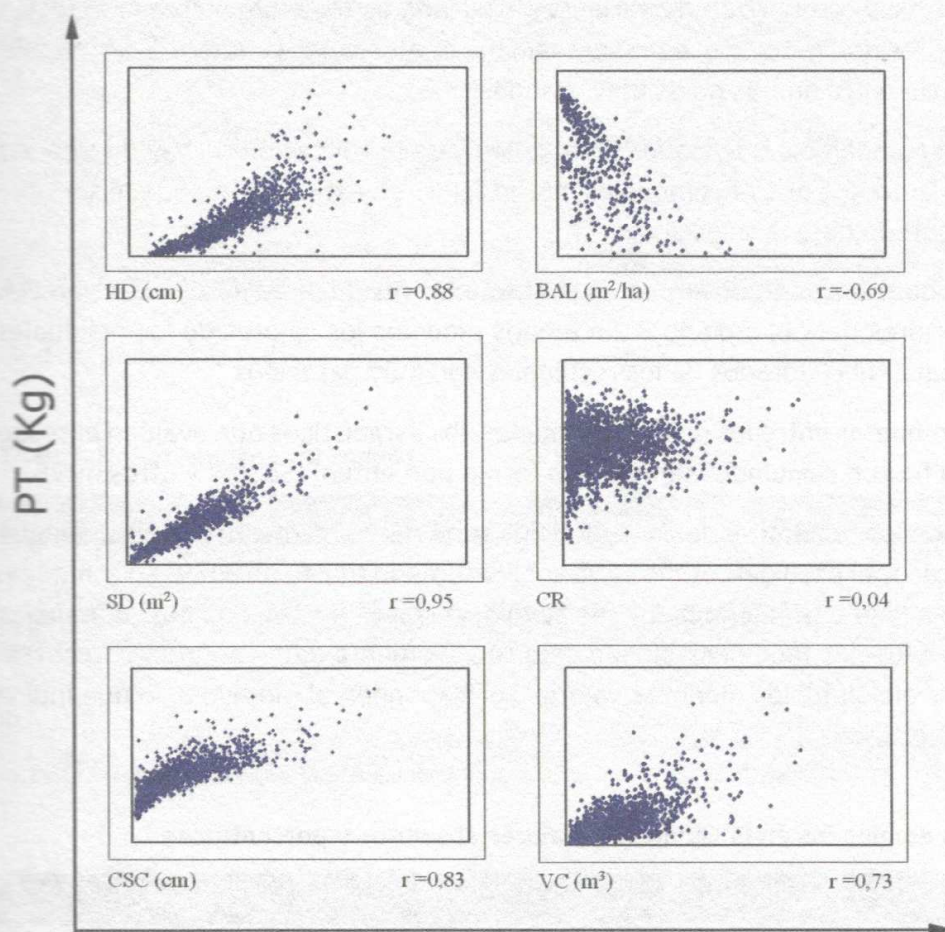


TABLA 4. Modelos reducidos ajustados

	Modelo ajustado	R²	R²-ajustado
1	$\ln PT = -8,80785 + 1,28352 \cdot \ln CSC^2 + \varepsilon$	0,7768	0,7766
2	$\ln PT = -5,02265 + 0,80244 \cdot \ln(HD \cdot CSC^2) + \varepsilon$	0,9186	0,9185
3	$\ln PT = 2,32558 + 1,01643 \cdot \ln SD + \varepsilon$	0,9458	0,9458
4	$\ln PT = -2,79870 + 1,05889 \cdot \ln CSC + 1,13602 \cdot \ln HD + \varepsilon$	0,9333	0,9332
5	$\ln PT = -3,00083 + 1,10817 \cdot \ln(CSC \cdot HD) + \varepsilon$	0,9332	0,9332
6	$\ln PT = 2,47607 - 0,03453 \cdot \ln CSC + 1,02769 \cdot \ln SD + \varepsilon$	0,9459	0,9458
7	$\ln PT = -2,79870 + 1,13602 \cdot \ln(HD \cdot CSC) - 0,03856 \cdot \ln CSC^2 + \varepsilon$	0,9333	0,9332

3.2. VALIDACIÓN DE LOS MODELOS

Los resultados obtenidos en la fase de validación fueron los siguientes:

TABLA 5. Estadísticos empleados en la validación de los modelos

Modelo	EF	MSE ajuste	MSE validación	PRESS
3	0,90089	0,03969	0,08259	53,34990
5	0,88725	0,04896	0,09383	65,81733

En primer lugar se compara la eficiencia de los modelos (Tabla 5), observándose que en los dos casos, la proporción de variación explicada es muy alta (cercana al 90%). Según este criterio, el modelo que presenta un mejor ajuste es el número 3. Sin embargo, la diferencia entre ambos no es muy grande.

Respecto a la comparación de los *MSE* del ajuste y de la validación no hay diferencias significativas entre los distintos modelos, por lo tanto, en este caso, no puede ser utilizado como método para la selección.

Las mayores diferencias se observan en cuanto a los residuales *PRESS*, pues son claramente inferiores para el modelo 3. En ambos modelos los valores de los residuales *PRESS* y la suma de cuadrados de los residuales son muy parecidos.

Para poder comparar entre los distintos modelos, los estadísticos que evalúan el sesgo y la precisión fueron calculados también en forma porcentual (Soares y otros, 1995).

De acuerdo con los resultados, los dos modelos son relativamente insesgados, aunque en todos los casos el peso del corcho sería sobreestimado (hasta un 3,17% en el modelo 3). En cuanto a la precisión (Tabla 6), que se mide a través de MA_{rp} , no hay diferencias notables entre los dos modelos, siendo ésta relativamente alta. Tanto en porcentaje como en valor absoluto, los menores valores corresponden al modelo 3, lo que indica que es el más preciso.

TABLA 6. Estadísticos empleados en la validación. Valores absolutos y porcentuales

Modelo	Sesgo		Precisión	
	$\Sigma(y - \hat{y})/n$	$100 \cdot \Sigma[(y - \hat{y})/y]/n$	$\Sigma y - \hat{y} /n$	$100 \cdot \Sigma[(y - \hat{y})/y]/n$
3	0,00345	- 3,17 %	0,18103	10,46 %
5	0,01224	- 2,71 %	0,19562	11,07 %

3.3. DESARROLLO DEL MODELO GENERAL

El modelo general de producción de corcho para la Sierra de San Pedro, pretende incluir, dentro del modelo reducido seleccionado, un conjunto de variables que contemplen la influencia sobre la producción de factores como el vigor del árbol o la competencia.

Las variables consideradas fueron las siguientes:

Vigor del árbol:

- Relación de copa (*CR*): relación entre la altura de la copa y la altura total del árbol considerado.
- (*VC*): Volumen de la copa del árbol tras asociar su forma a una semiesfera.

Competencia:

- *BAL*: Suma del área basimétrica de todos los pies de la parcela con sección normal mayor al árbol considerado.

Se ajustaron los datos a dos modelos distintos, de forma que se pudiesen considerar por separado las dos variables relativas al vigor del árbol, manteniéndose fijas la superficie de descorche y el *BAL*.

Al igual que para el desarrollo de los modelos reducidos, se utilizó el ajuste de regresión lineal múltiple, aplicando el procedimiento PROC REG del módulo SAS STAT (SAS Institute, 1989).

Modelo general 1: $\ln PT = \beta_0 + \beta_1 \cdot \ln SD + \beta_2 \cdot \ln CR + \beta_3 \cdot \ln BAL + \varepsilon$

TABLA 7. Parámetros estimados

Parámetros	Grados de libertad	Parámetro estimado	Error estándar	t de Student	Pr > t
$\hat{\beta}_0$	1	2,33067	0,04181	55,75	<0,0001
$\hat{\beta}_1$	1	1,00967	0,01545	65,33	<0,0001
$\hat{\beta}_2$	1	-0,01911	0,05510	-0,35	0,7289
$\hat{\beta}_3$	1	-0,00154	0,01651	-0,09	0,9257

$$\text{Modelo general 2: } \ln PT = \beta_0 + \beta_1 \cdot \ln SD + \beta_2 \cdot \ln VC + \beta_3 \cdot \ln BAL + \varepsilon$$

TABLA 8. Parámetros estimados

Parámetros	Grados de libertad	Parámetro estimado	Error estándar	t de Student	Pr > t
$\hat{\beta}_0$	1	2,26461	0,06624	34,19	<0,0001
$\hat{\beta}_1$	1	0,99262	0,02050	48,43	<0,0001
$\hat{\beta}_2$	1	0,02161	0,01658	1,30	0,1930
$\hat{\beta}_3$	1	0,00022	0,01639	0,01	0,9891

Del estudio del análisis de varianza y de los parámetros estimados se deduce que las nuevas variables incluidas no tienen influencia sobre el modelo general. En ambos casos, los resultados obtenidos para el test de la *t de Student*, con p-valores superiores al nivel de significación ($\alpha=0,05$), indican que los parámetros estimados para las variables, *CR*, *VC* y *BAL* no son significativamente distintos de cero. Por lo tanto, se hace innecesario realizar una evaluación más completa de los modelos, concluyéndose que la inclusión de estas variables en el modelo de producción no aporta una mejora en su capacidad predictiva.

4. DISCUSIÓN

La selección del mejor modelo debe tener en cuenta dos objetivos principales, que en algunas ocasiones pueden ser contradictorios. El modelo debe explicar la máxima proporción de la variabilidad de los datos originales, lo que se consigue generalmente considerando un alto número de variables y, por otro lado, es deseable conseguir un modelo lo más simple posible, que incluya variables fáciles de medir en campo (Ribeiro y Tomé, 2002).

Respecto al primer punto, la capacidad predictiva de los modelos ha sido estudiada mediante la verificación de la hipótesis de partida para la regresión lineal. Asimismo, en una fase posterior, dichos modelos han sido validados con datos independientes, de modo que se ha podido analizar su eficacia, precisión y sesgo.

En cuanto al segundo objetivo, los dos modelos sobre los que finalmente se centra este trabajo son relativamente sencillos, pues incluyen una sola variable, la superficie de descorche, ya sea real (*SD*) o teórica (*CSC · HD*). Además, son lógicamente consistentes y se ajustan a la realidad desde el punto de vista biológico.

En principio, la superficie de descorche teórica implica un menor número de mediciones en campo, aunque llevaría a una mayor sobreestimación de la producción en árboles descorchados en las ramas. Para árboles en los que sólo se descorcha el fuste no habría ninguna diferencia en cuanto a la medición de una u otra variable.

Una vez ajustados los modelos mediante regresión lineal, se ha comprobado que se verificaban las hipótesis de partida. Se realizó un estudio gráfico de los residuos representando los residuales estandarizados frente a los valores predichos de la variable respuesta. La distribución más o menos homogénea de los puntos en torno al cero indica que el modelo es insesgado; es decir, la esperanza matemática de los errores es igual a cero.

El modelo en cuyo gráfico los residuos se distribuyen de una forma aparentemente más homogénea en torno al cero es el 3, aunque no se aprecia una diferencia significativa con el resto de modelos.

Este gráfico también permite apreciar que no existen problemas de heterogeneidad de varianza (heterocedasticidad), puesto que la distribución de los residuos es bastante homogénea, no observándose la clásica forma de embudo o trompeta.

Para esta hipótesis, el test de Kolmogorov-Smirnov no proporcionaba resultados concluyentes para el modelo 5, mientras que para el modelo 3 se aceptaba la normalidad de los residuales.

En la fase de validación se ha comprobado que nuevas observaciones se ajustan a los modelos creados. Según los criterios considerados, el modelo que presenta un mejor comportamiento es el número 3, pues posee una mayor eficiencia (el modelo explica un 90,09% de la variación) y precisión. Sin embargo, es ligeramente más sesgado que el número 5, dando lugar a predicciones sobreestimadas (3,17%). La variable dependiente que considera (Superficie de descorche real) permite realizar predicciones mucho más precisas, puesto que considera, de forma individual, todas las ramas del árbol. Para pies de tamaño medio y grande, en los que también las ramas son descorchadas, el considerar la superficie teórica de descorche ($CSC \cdot HD$) lleva a una mayor sobreestimación de la producción. Además, la mayor laboriosidad en la medición de la superficie de descorche real (sólo en árboles descorchados en ramas) se compensa con el incremento en la capacidad predictiva que proporciona este modelo.

No se ha podido obtener un modelo general de producción de corcho en el que se tuviesen en cuenta variables relacionadas en el vigor y la competencia. Dichas variables, obtenidas a partir de los datos de campo disponibles, no ejercen, dentro del modelo reducido, una influencia significativa sobre la producción de corcho a nivel de árbol individual. En cualquier caso, esto no quiere decir que la competencia o el vigor del árbol no tengan una influencia clara sobre la producción de corcho, sino que las variables seleccionadas en este trabajo para demostrarlo no son las adecuadas.

En el alcornoque, las variables relacionadas con la copa presentan el problema de ser muy dependientes de ciertas características selvícolas de la masa, como el espaciamiento entre pies, y de las podas realizadas (Paulo y otros, 2002). Así, no tendría sentido su aplicación en zonas en las que se realizan podas inadecuadas para la obtención de leñas o en las que la densidad de las masas es excesiva.

El cálculo del *BAL*, como medida de la competencia, no permite apreciar la influencia de este factor sobre la producción de corcho a nivel de árbol individual. Las singulares características de los alcornocales, generalmente adehesados, provocan que los principales factores que influyen en el crecimiento y producción sean la competencia por los recursos agua y nutrientes, teniendo menos importancia la competencia por la luz. Por lo tanto, sería necesario estudiar esta variable computando sólo los pies más cercanos al individuo considerado; además de tener en cuenta la presencia de matorral, que puede llegar a ser muy importante en algunos alcornocales de sierra.

Otro punto a tener en cuenta a la hora de llevar a cabo posteriores trabajos relacionados, podría ser el estudio de la influencia que ejerce la calidad de estación de las superficies

sobre las que se asientan las masas de alcornocal sobre la producción y la calidad del corcho. En el presente trabajo, debido al escaso número de parcelas estudiadas y a que todas se encontraban situadas en una misma posición fisiográfica y presentaban la misma orientación, existía una baja variabilidad en cuanto a la calidad de estación, lo que no permitió considerar este parámetro a la hora de desarrollar los modelos de producción.

Por último, la gran variabilidad intraespecífica que presenta el alcornoque, asociada con la intensidad de explotación y los tratamientos selvícolas, contribuye a la existencia de masas con características de crecimiento particulares, especialmente en relación con la cantidad y calidad del corcho producido. Por tanto, el uso del modelo formulado en este trabajo debe restringirse a la zona productiva para la que ha sido desarrollado y su extrapolación a otras regiones debe hacerse de forma extremadamente cuidadosa.

5. CONCLUSIONES

1. Se ha conseguido elaborar un modelo de producción de corcho de árbol individual independiente de la distancia para *Quercus suber* en la Sierra de San Pedro. Este modelo está integrado por una sola ecuación, capaz de predecir la producción total de corcho (panas y trozos) de cada árbol.
2. La producción total de corcho en fresco de un árbol puede ser fácilmente explicada a partir de un pequeño número de variables dendrométricas, la mayoría relacionadas con el descorche.
3. La variable *SD* (superficie real de descorche) es la que mejor funciona como regresora, aunque la superficie de descorche teórica también puede ofrecer buenos resultados.
4. No se ha podido desarrollar un modelo general de producción que incluyese los factores vigor del árbol (a través de distintas variables de copa) y competencia debido a la no significatividad de las variables empleadas para su ajuste.
5. El empleo del *BAL* como variable regresora dentro del modelo general no contribuye a mejorar el mismo, ya que ejerce una influencia muy pequeña sobre el valor de la variable dependiente. Sería necesario realizar un estudio más amplio de todos los factores que controlan la competencia y determinar algún modo fácil de medirla para poder utilizarla en modelos de producción.

BIBLIOGRAFÍA

- COSTA, A.; PEREIRA, H.; OLIVEIRA, A. C. (2001): "A dendroclimatological approach to diameter growth in adult cork oak trees under production", *Trees*, 15, pp. 438-443.
- COSTA, A.; PEREIRA, H.; OLIVEIRA, A. C. (2002a): "Influence of climate on the seasonality of radial growth of cork oak during a cork production cycle", *Annals of Forest Science*, 59, pp. 429-437.
- COSTA, A.; OLIVEIRA, A. C. (2001): "Variation in cork production of the cork oak between two consecutive harvests", *Forestry*, 74 (4), pp. 337-346.
- FERREIRA, M. C.; OLIVEIRA, A. C.; CARVALHO-OLIVEIRA, A. M. (1991): "Modelling cork oak production in Portugal", *Agroforestry Systems*, 16 (1), pp. 41-54.
- FONSECA, T.; PARRESOL, B. (2001): "A new model for cork weight estimation in Northern Portugal with methodology for construction of confidence intervals", *Forest Ecology and Management*, 152, pp. 131-139.

- GOMES GUERREIRO, M. (1951): *Previsão do peso de cortiça explorável de un montado*, Lisboa, Direcção Geral de Serviços. Florestais e Acuícolas, Tomo I.
- GONZÁLEZ, J. R.; GONZÁLEZ, F.; CALVO, R. (2000): "La predicción del calibre del corcho al final del turno y su aplicación al muestreo de la producción", *Investigación Agraria: Sistemas y Recursos Forestales*, 2, pp. 363-374.
- MINISTERIO DE AGRICULTURA, PESCA Y ALIMENTACIÓN (1998): *Segundo Inventario Forestal Nacional. 1986-1996, España*, Madrid.
- MONTEIRO, A. (1958): "Tabelas de previsão de peso de cortiça para o sobreriro nos xistos do carbonico", *Cortiça*, 237.
- MONTEIRO, A.; MORAIS DE MAÇEDO, M. (1961): "Sobre tabelas de peso de cortiça", *Cortiça*, 275.
- MONTERO, G. (1987): *Modelos para cuantificar la producción de corcho en alcornocales (Quercus suber L.), en función de la calidad de estación y de los tratamientos selvícolas*, Madrid, I. N. I. A. (Tesis doctoral).
- MONTERO, G.; TORRES, E.; SUÁREZ, M. A.; ORTEGA, C. (1993): "Influencia de la densidad de la masa en la calidad y producción de corcho en los alcornocales de Cortes de la Frontera (Málaga)", *Congreso Forestal Español*, Lourizán (Pontevedra).
- MONTERO, G.; TORRES, E.; CAÑELLAS, I.; ORTEGA, C. (1996): "Modelos para la estimación de la producción de corcho en alcornocales", *Investigación Agraria: Sistemas y Recursos Forestales*, 1, pp. 97-127.
- MOTTE, M. (1957): "Bilan de l'étude expérimentale de la croissance du chêne-liège en Tunisie", *Revue Forestière Française*, 7, pp. 571-582.
- MYERS, R. H. (1990): *Classical and modern regression with applications*, Belmont, Duxbury Press.
- NATIVIDADE, J. V. (1950): *Subericultura*, Porto, Ministerio de Economía, (Versión en castellano a cargo de P. CAMPOS, editada por Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación, Madrid, 1991).
- NATURAL CORK QUALITY COUNCIL (1999): *Industry Statistics*, Sebastopol, Natural Cork Quality Council, USA. (URL: <http://www.corkqc.com> (Consulta: 17 febrero, 2003)).
- NUNES DE MEXIA, J. C. (1934): "Subsidios para o ordenamento dos sobrerais", *Agronómica*, 22, pp. 40-62.
- PAULO, M. J.; STEIN, A.; TOMÉ, M. (2002): "A spatial statistical analysis of cork oak competition in two Portuguese silvopastoral systems", *Canadian Journal of Forest Research*, 32 (11), pp. 1893-1903.
- RIBEIRO, F.; TOMÉ, M. (2002): "Cork weight prediction at tree level", *Forest Ecology and Management*, 171, pp. 231-241.
- SAS INSTITUTE (1989): *SAS/STAT User's guide, Version 6*, Cary, NC, SAS Institute, vol. 2, (4ª edición).
- SOARES, P.; TOMÉ, M.; SKOVSGAARD, J. P.; VANCLAY, J. K. (1995): "Evaluating a growth model for forest management using continuous forest inventory data", *Forest Ecology and Management*, 71, pp. 251-265.
- VANCLAY, J. K.; SKOVSGAARD, J. P. (1997): "Evaluating forest growth models", *Ecological Modelling*, 98, pp. 1-12.
- VÁZQUEZ, J.; PEREIRA, H.; OLIVEIRA, A. (2002): "Distance dependent and distance independent individual tree cork weight models for cork oak (*Quercus suber* L.) in central and southern regions of Portugal", *Reality, models and parameter estimation - The forestry scenario*, Sesimbra.

