

MODELO DE CALIDAD DE ESTACIÓN Y CRECIMIENTO EN ALTURA DOMINANTE PARA *QUERCUS FAGINEA* LAM. EN ESPAÑA

Eduardo López-Senespleda y Otilio Sánchez-Palomares

Unidad de Ecología Forestal. CIFOR – INIA, Ctra. A Coruña km 7.5 28040-MADRID (España). Correo electrónico: elopez@inia.es

Resumen

El objetivo de este trabajo ha sido la elaboración de un modelo de crecimiento en altura dominante que nos permita realizar una clasificación de las masas de quejigo para orientarlas hacia una gestión sostenible. Los datos utilizados corresponden a 91 parcelas repartidas por el área de distribución de la especie en España, de las que se han obtenido 162 análisis de tronco. Se probaron una serie de funciones habitualmente empleadas en investigación forestal en las que el ajuste se realizó por el método de los mínimos cuadrados generalizados. En la elección del mejor modelo se tuvo en cuenta la suma de cuadrados de los residuos (SCR), el residuo absoluto medio (RAM), el residuo medio (RM) y el coeficiente de eficiencia del modelo (EF), además de la representación gráfica conjunta de los modelos y los datos. Finalmente se seleccionó el modelo de Bailey-Clutter con el parámetro b libre, entre los mejores modelos observados. Debido a los irregulares patrones de crecimiento, los resultados obtenidos en el ajuste deben ser interpretados de forma cuidadosa, añadiendo como conclusión que es necesario plantearse la búsqueda de otro tipo de indicadores de la calidad de estación para las masas de quejigo.

Palabras clave: *Quejigo, Ecuaciones en diferencias algebraicas, Mínimos cuadrados generalizados, Índice de sitio, Análisis de tronco, Gestión sostenible*

INTRODUCCIÓN

Los quejigares son unas formaciones forestales que han sido muy aprovechadas silvopascionalmente por las poblaciones humanas a lo largo de la historia, generalmente para la obtención de leñas y carbón, y para el aprovechamiento de pastos en masas adehesadas (SERRADA et al., 1992). Actualmente, debido al desarrollo social y económico, esta función productora de leñas y carbón ha caído en desuso. Se trata de masas, en su mayoría tratadas en monte bajo con turnos entre 20-25 años. Frente al decaimiento de estos usos tradicionales, la sociedad actual

demanda nuevas funciones no menos importantes, como el mantenimiento de su valor paisajístico, ecológico y protector. La información existente sobre la silvicultura y aprovechamientos de esta especie es reducida. Para las masas españolas se puede encontrar sobre silvicultura (claras y sus efectos) y silvopastoralismo los trabajos de BAEZA et al. (2002), CAÑELLAS et al. (1994, 1996), MONTERO Y MONTOTO (1985), ZULUETA Y MONTERO (1982), sobre ecología de la especie los trabajos de SAN MIGUEL (1986) y SAN MIGUEL et al. (1984), sobre fitoclimatología, botánica y tipología los de GONZALO JIMÉNEZ et al. (2001), LOIDI Y HERRERA (1990) y

SARMIENTO et al. (1994), y sobre efectos de la sequía en el crecimiento y las propiedades de la madera el trabajo de CORCUERA et al. (2004). Para las masas de Portugal, hay trabajos sobre botánica de CARVALHO E VASCONCELOS Y AMARAL (1951), y sobre selvicultura (claras y sus efectos) de CARVALHO OLIVEIRA Y GONÇALVES (1996a; 1996b); y para las de Marruecos trabajos sobre fitosociología y taxonomía de ZINE EL ABIDINE (1998) y ZINE EL ABIDINE Y FENNANE (1995).

Aunque existe esta información sobre algunos aspectos parciales de selvicultura, botánica y ecología de la especie, la gestión sostenible de estas masas necesita de un modelo de calidad de estación. La clasificación de las masas a partir de estos modelos de calidad, permite decidir sobre la aplicación de tratamientos selvícolas o no, justificando así su posible viabilidad económica. En este trabajo se sigue la línea iniciada por otros trabajos realizados para otras especies del ámbito mediterráneo, como los de SÁNCHEZ et al. (2005; 2006) para los alcornocales, los de CALAMA et al. (2003, 2004) para el pino piñonero, el de ALONSO PONCE Y MADRIGAL (2006) para la sabina o el de ADAME et al. (2006) sobre el rebollo.

El objetivo de este trabajo es el ajustar un modelo de calidad de estación mediante el método de los mínimos cuadrados generalizados, basado en el crecimiento en altura dominante de la especie, a partir de datos de parcelas del segundo y tercer inventario forestal en los que el quejigo es especie dominante.

MATERIAL Y MÉTODOS

Datos

Se eligieron 117 parcelas del IFN2 tras una estratificación previa considerando la clasificación biogeoclimática (ELENA ROSSELLÓ, 1997), la litología (IGME, 1994) y las clases altitudinales definidas en la metodología del IFN. En cada parcela elegida, en una parcela auxiliar próxima a la parcela del IFN y con similares características, se procedió al apeo de 1 o 2 árboles, siempre que existiesen árboles sanos y claramente dominantes, en los que se midió el diámetro normal, diámetro del tocón, la altura total y de fuste, y se trocearon, extrayendo la rodaja basal,

la normal y una rodaja por cada metro hasta alcanzar la guía terminal. Con este conjunto de rodajas por cada árbol se procedió en laboratorio a construir la curva de crecimiento en altura en función de la edad.

El colectivo de muestreo está formado por 162 árboles a los que se aplicó la corrección de CARMEAN (1972). Se representaron todos los árboles separados por parcelas, para intentar detectar crecimientos o comportamientos anómalos. Si en una parcela había dos árboles, y uno de ellos era claramente dominante, se elegía éste, y en el caso en que los dos presentaban un crecimiento similar, se calculó un valor medio.

Para el ajuste de los modelos se eligió la estructura de datos en la que se toman todas las combinaciones posibles ascendentes y descendentes, ya que según HUANG (1997) será la que proporcione mejores resultados y más consistentes.

Metodología de ajuste y modelos probados.

La metodología que se ha utilizado ha sido la de las ecuaciones en diferencias algebraicas (ADA), asegurando así el cumplimiento de la mayor parte de los requisitos que debe cumplir una función de crecimiento: ser creciente y con punto de inflexión, ser polimórfica y con asíntota, y ser invariante con respecto a la edad de referencia.

Se probaron seis ecuaciones escogidas entre las más empleadas en investigación forestal (Tabla 1), y sus formas integrales fueron tomadas de KIVISTE et al. (2002). Todas ellas cumplen el criterio de invariabilidad respecto a la edad de referencia (HUANG, 1997). Las formas en diferencias de cada una de las ecuaciones se obtuvieron despejando el parámetro correspondiente, bien sea la asíntota o los parámetros de forma de la ecuación.

El ajuste se realizó mediante mínimos cuadrados generalizados, aplicando la corrección propuesta por GOELZ Y BURK (1992), que consiste en introducir unos términos autoregresivos para rectificar el problema de autocorrelación de los datos originado por la estructura seleccionada de los mismos. Para realizar este ajuste se ha empleado el procedimiento MODEL del paquete estadístico SAS/ETS (1999).

Hay que tener en cuenta que los análisis de tronco empleados presentan una ausencia de observaciones en las edades y calidades altas, lo

Ecuación	Ptro. libre	(ADA)	Cód. modelo
McDILL-AMATEIS (1992) $H = \frac{a}{1 + \frac{b}{t^c}}$	b	$h_2 = \frac{a}{1 - \left(1 - \frac{a}{h_1}\right) \cdot \left(\frac{t_1}{t_2}\right)^c}$	M-Ab
	c	$h_2 = \frac{a}{1 + \frac{b \cdot h_1}{a - h_1} \left(\frac{Ln t_2 / Ln t_1}{Ln t_1}\right)^c}$	M-Ac
RIHARDS-CHAPMAN (1959) $H = a \cdot (1 - e^{-bt})^c$	a	$h_2 = h_1 \cdot \left[\frac{1 - e^{-bt_2}}{1 - e^{-bt_1}} \right]^c$	R-Ca
	b	$h_2 = a \cdot \left[1 - \left[1 - \left(\frac{h_1}{a} \right)^{\left(\frac{1}{c}\right)} \right]^{\left(\frac{t_2}{t_1}\right)^c} \right]^c$	R-Cb
	c	$h_2 = a \cdot \left(\frac{h_1}{a} \right)^{\left[\frac{Ln(1 - e^{-bt_2})}{Ln(1 - e^{-bt_1})} \right]^c}$	R-Cc
BAILEY-CLUTTER (1974) $H = e^{a+bt^c}$	b	$h_2 = e^{a + (Ln h_1 - a) \left(\frac{t_2}{t_1}\right)^c}$	B-Cb

Tabla 1. Funciones seleccionadas para el ajuste de curvas de crecimiento en altura

cual es común en estos estudios, pero que causa una caída artificial del valor de la asíntota (ÁLVAREZ GONZÁLEZ et al., 2004). La solución adoptada consiste en ajustar los modelos considerando solamente las observaciones hasta una edad tal que quede recogido todo el espectro de clases de calidad, en este caso hasta los 80 años, y luego fijar la asíntota y recalculer el resto de los parámetros del modelo, comprobando si existen diferencias significativas.

La elección del mejor modelo se basó en consideraciones numéricas y gráficas. La bondad del ajuste se evaluó mediante el cálculo de la suma de cuadrados de los residuos (SCR), el residuo absoluto medio (RAM), el residuo medio (RM), el residuo relativo del modelo (RRM) entendiendo como tal la relación del residuo

absoluto respecto de la media de la altura para todas las observaciones, y por último el coeficiente de eficiencia del modelo (EF). Respecto a los métodos gráficos, se representó cada modelo frente al conjunto de datos observados, con el objetivo de comprobar que las tendencias de los modelos eran similares a los patrones de crecimiento individuales de los datos.

Debido a la falta de una muestra independiente para realizar la validación, se decidió emplear el método autosuficiente *jackknife* (TUKEY, 1958). En la tabla 2 se presentan los valores medios de la suma de cuadrados del error (SCE_i), del residuo medio (RM_i) y del residuo absoluto (RAM_i) de todos los modelos obtenidos siguiendo el procedimiento de validación descrito.

En cuanto a la determinación de la edad de referencia, se ha considerado el criterio propuesto por ÁLVAREZ GONZÁLEZ et al. (2004), según el cual la edad de referencia será aquella en la que el error relativo sea menor y el número de observaciones suficientemente alto, siendo el error relativo el expresado en la ecuación (1) (HUANG et al., 2003):

$$RE(\%) = \frac{\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (H_i - \hat{H}_i)^2}{(n-p)}}}{H} \quad (1)$$

Donde H_p , \hat{H}_p , H son respectivamente el valor observado, el valor predicho y el valor medio de la altura dominante, n es el número de observaciones y p es el número de parámetros del modelo.

RESULTADOS

Modelo seleccionado

En la tabla 2 se exponen los resultados obtenidos del ajuste de las funciones seleccionadas. Los demás modelos no representados o tenían asíntotas anormalmente grandes, o no convergían, es decir, presentaban un comportamiento que no se ajustaba a la realidad biológica de la especie.

De los modelos de Richards-Chapman, el que tiene el parámetro b libre se descartó por tener la menor eficiencia de los cuatro modelos seleccionados, y el que presenta el parámetro c libre, por tener el mayor error medio de todos los modelos. Para decidir entre los dos modelos restantes, se optó por representarlos gráficamente y combinar los resultados estadísticos con la visualización del comportamiento del modelo frente al conjunto de datos. Los cuatro modelos

presentaban un leve sesgo que infraestimaba la altura, pero en todo caso no suponen más de 2,5 cm para el modelo de Bailey-Clutter, y en torno a los 6 cm para los otros tres seleccionados. Así, el modelo elegido es el de BAILEY-CLUTTER (1974) con el parámetro b libre, cuya expresión final es la de la ecuación (2).

$$h_2 = e^{3,094 + (Ln h_1 - 3,094) \left(\frac{t_2}{t_1}\right)^{-0,562}} \quad (2)$$

Por último, como se puede observar (Figura 1), el intervalo de edad que cumple los requisitos exigidos para la elección de la edad de referencia es 40 a 60 años (ÁLVAREZ GONZÁLEZ et al., 2004), tomando así como edad de referencia 50 años. En la figura 2 se representa el modelo elegido considerando la edad de referencia de 50 años, y los índices de sitio de 10, 8, 6 y 4 metros para las calidades I, II, III y IV respectivamente.

DISCUSIÓN

En este trabajo se presentan por primera vez unas curvas de calidad y un modelo de crecimiento en altura para toda el área de distribución del quejigo en España. El procedimiento de ajuste seguido aconseja el uso de este modelo hasta una edad cercana a los 80 años.

El hecho de que gran parte de las masas sean procedentes de monte bajo, de las cuales se desconoce su pasado selvícola, o que han sido abandonadas en cuanto a su manejo, se ha traducido en unos patrones de crecimiento muy irregulares. El modelo obtenido presenta variaciones del índice de sitio en las edades más bajas (Figura 3), pero se aprecia una tendencia a estabilizarse a mayores edades.

Modelo	Parámetros*			Jackniffe							
	a	b	c	SCR	RM	RAM	RRM(%)	EF(%)	SCE _j	RM _j	RAM _j
M-Ab	15,269		1,399	4168,16	0,0613	0,655	15,8	72,3	4119,60	0,0611	0,655
R-Cb	14,919		1,261	4759,14	0,0807	0,696	16,8	66,2	4701,31	0,0805	0,696
R-Cc	18,904	0,0116		3800,65	0,0483	0,635	15,3	74,8	3758,09	0,0482	0,635
B-Cb	3,094		-0,562	3594,07	0,0241	0,609	14,7	78,8	3555,04	0,0241	0,609

* Significativo con $p < 0,05$

Tabla 2. Parámetros y estadísticos de los modelos seleccionados

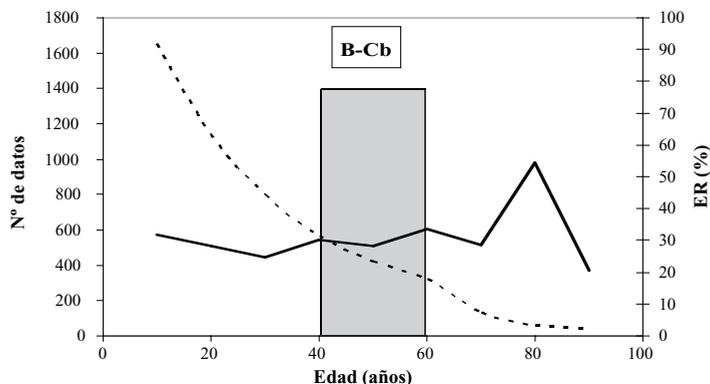


Figura 1. Error relativo en la predicción de la altura en función de la edad de referencia para el modelo de BAILEY-CLUTTER (1974). La línea continua es el Error Relativo (ER %), la línea discontinua es el número de datos. El área sombreada corresponde al intervalo de edad de 40 a 60 años

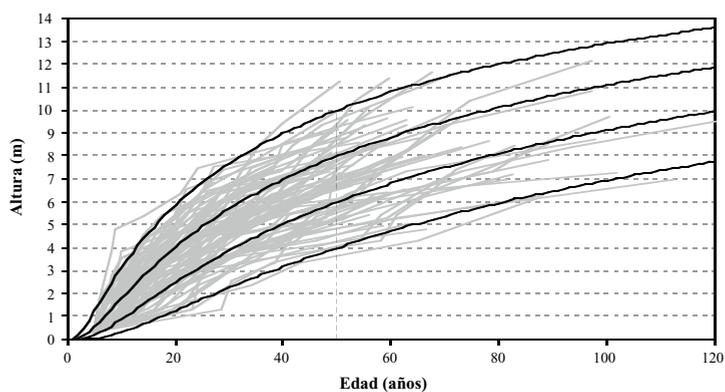


Figura 2. Modelo de crecimiento en altura para *Quercus faginea*, representado para las clases de calidad definidas, sobre los datos procedentes de los análisis de tronco

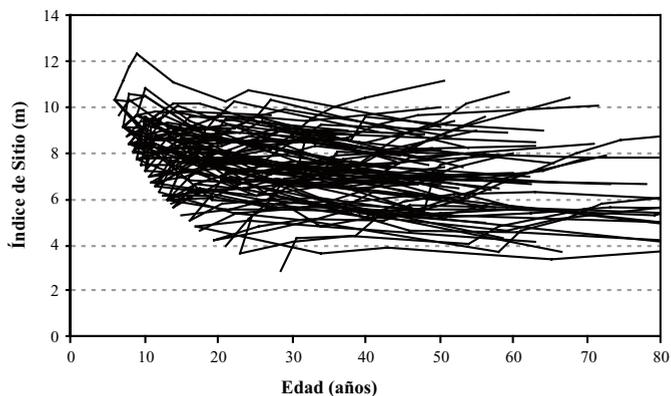


Figura 3. Predicciones del índice de sitio frente a la edad para los datos obtenidos de los análisis de tronco

En cuanto a la enorme irregularidad de los patrones de crecimiento obtenidos con esta metodología, habría que replantearse la necesidad de encontrar nuevos y mejores indicadores de la calidad de la estación para las masas de quejigo, o bien utilizar la metodología de ajuste de los modelos GADA, ya que este tipo de modelos suelen ser más flexibles que los ADA. Estos modelos se complementan con el análisis de las interacciones con variables climáticas y edáficas.

También cabe plantearse la posibilidad de ajustar distintos modelos para distintas agrupaciones o tipos de masa, y comprobar si existirían diferencias significativas entre la consideración de un único modelo para todas las masas de quejigo en España, o distintos modelos de calidad de estación en función del tipo de masa o del estrato al que pertenezca (ADAME et al., 2006).

Agradecimientos

Este trabajo se encuadra dentro del convenio DGB-INIA "Tipificaciones ecológico selvícolas de distintas especies forestales españolas: *Quercus faginea* Lamk."

BIBLIOGRAFIA

- ADAME, P.; CAÑELLAS, I.; ROIG, S. & RÍO, M.; 2006. Modelling dominant height growth and site index curves for rebollo oak (*Quercus pyrenaica* Willd.). *Ann. For. Sci.* En prensa.
- ALONSO PONCE, R. Y MADRIGAL, G.; 2006. Modelo de crecimiento en altura e índice de sitio para *Juniperus thurifera* L. en España. In: *III Coloquio Internacional sobre sabinas y enebrales (género Juniperus): ecología y gestión forestal sostenible II*: 157-165. Soria.
- ÁLVAREZ GONZÁLEZ, J.G.; BARRIO ANTA, M.; DIÉGUEZ ARANDA, U. Y ROJO ALBORECA, A.; 2004. Metodología para la construcción de curvas de calidad de estación. *Cuad. Soc. Esp. Cienc. For.* 18: 303-309.
- BAEZA, E.; 2002. *Modelo de crecimiento en masas de monte bajo de quejigo (Quercus faginea Lamk.)* en Guadalajara. Universidad Politécnica de Madrid. Madrid.
- CALAMA, R.; CAÑADAS, N. & MONTERO, G.; 2003. Inter-regional variability in site index models for even-aged stands of stone pine (*Pinus pinea* L.) in Spain. *Ann. For. Sci.* 60: 259-269.
- CALAMA, R. & MONTERO, G.; 2004. Interregional nonlinear height-diameter model with random coefficients for stone pine in Spain. *Can. J. For. Res.* 34: 150-163.
- CAÑELLAS, I.; MONTERO, G. & BACHILLER, A.; 1996. Transformation of quejigo oak (*Quercus faginea* Lam.) coppice forest into high forest by thinning. *Annali Istituto Sperimentale Selvicoltura* 27: 143-147.
- CAÑELLAS, I.; MONTERO, G.; ORTEGA, C. & TORRES, E.; 1994. Transformación del monte bajo de quejigo (*Quercus faginea* Lamk.) a monte adhesionado por claras de diferente intensidad. Primeros resultados. En: F. Páscoa, L. Pinheiro e A. Isidoro (eds.), *Actas III Congreso Florestal Nacional* 1: 163-169. Soc. Port. Cienc. For. Figueira da Foz.
- CARMEAN, W.H.; 1972. Site index curves for upland oaks in the central Status. *For. Sci.* 18 (2): 109-120.
- CARVALHO E VASCONCELLOS, J. & AMARAL, J.; 1951. A *Quercus faginea* Lamk. na flora e na vegetação natural portuguesas. *Anais do Instituto Superior de Agronomia*: 95-98.
- CARVALHO OLIVEIRA, A. & GONÇALVES, A.C.; 1996a. Effect of different cutting seasons on stump resprouting and shoots growth in Portuguese oak (*Quercus faginea* Lam.). *Annali Istituto Sperimentale Selvicoltura* 27: 71-75.
- CARVALHO OLIVEIRA, A. & GONÇALVES, A.C.; 1996b. Evaluation of growth in thinned permanent plots of young Portuguese oak (*Quercus faginea* Lam.) high forest and coppice stands. *Annali Istituto Sperimentale Selvicoltura* 27: 135-142.
- CORCUERA, L.; CAMARERO, J.J. & GIL-PELEGRÍN, E.; 2004. Effects of a severe drought on growth and wood anatomical properties of *Quercus faginea*. *IAWA Journal* 25 (2): 185-204.
- ELENA ROSSELLÓ, R.; 1997. *Clasificación biogeoclimática de España peninsular y Balear*. Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación. Madrid.
- GOELZ, J.C.G. & BURK, T.E.; 1992. Development of a well-behaved site index equation: jack

- pine in north central Ontario. *Can. J. For. Res.* 22: 776-784.
- GONZALO JIMÉNEZ, J.; GARCÍA LÓPEZ, J.M. Y ALLUÉ CAMACHO, C.; 2001. Caracterización fitoclimática de procedencias de *Quercus faginea* en el centro-norte peninsular. *Cuad. Soc. Esp. Cienc. For.* 12: 69-75.
- HUANG, S.; 1997. Development of compatible height and site index models for young and mature stands within an ecosystem-based management framework. In: A. Amaro & M. Tomé (eds.), *Empirical and process-based models for forest tree and stand growth simulation*: 61-98. Edições Salamandra. Lisboa.
- HUANG, S.; YANG, Y. & WANG, Y.; 2003. A critical look at procedures for validating growth and yield models. In: A. Amaro, A.D. Reed y P. Soares (eds.), *Modelling forest systems*. 271-293. CABI Publishing. Wallingford.
- IGME; 1994. *Mapa Geológico Nacional a escala 1:1.000.000*. Instituto Geológico y Minero de España. Madrid.
- KIVISTE, A.; ÁLVAREZ GONZÁLEZ, J.G.; ROJO ALBORECA, A. Y RUIZ GONZÁLEZ, D.; 2002. *Funciones de crecimiento de aplicación en el ámbito forestal*. Monografías INIA: Forestal 4. Madrid.
- LOIDI, J. & HERRERA, M.; 1990. The *Quercus pubescens* and *Quercus faginea* forests in the Basque Country (Spain): distribution and typology in relation to climatic factors. *Vegetatio* 90: 81-92.
- MONTERO, G. & MONTOTO, J.L.; 1985. Aumento de las posibilidades pastorales en montes de quejigo (*Quercus faginea* Lamk.). *Anales INIA. Ser. Forestal* 9: 105-113.
- SAN MIGUEL, A.; 1986. *Ecología, tipología, valoración y alternativas silvopascícolas de los quejigares (Quercus faginea Lamk.) de Guadalajara*. UPM. Madrid.
- SAN MIGUEL, A.; MONTERO, G. & MONTOTO, J.L.; 1984. Estudios ecológicos y silvopascícolas en un quejigal (*Quercus faginea* Lamk.) de Guadalajara. Primeros resultados. *Anales INIA. Ser. Forestal* 8: 153-166.
- SÁNCHEZ-GONZÁLEZ, M.; RÍO, M.; CAÑELLAS, I. & MONTERO, G.; 2006. Distance independent tree diameter growth model for cork oak stands. *Forest Ecol. Manage.* 225: 262-270.
- SANCHEZ-GONZÁLEZ, M.; TOME, M. & MONTERO, G.; 2005. Modelling height and diameter growth of dominant cork oak trees in Spain. *Ann. For. Sci.* 62: 633-643.
- SARMIENTO, L.A.; BRAVO, F. Y CALVO, L.; 1994. Tipos forestales de quejigar (*Quercus faginea* Lamk.) de las provincias de Burgos y Palencia. *Ecología* 8: 151-156.
- SAS/ETS; 1999. *User's Guide, version 8*. SAS Institute Inc. Cary. NC.
- SERRADA, R.; ALLUÉ, M. & SAN MIGUEL, A.; 1992. The coppice system in Spain. Current situation, state of art and major areas to be investigated. *Annali Istituto Sperimentale Selvicoltura* 23: 266-275.
- TUKEY, J.; 1958. Bias and confidence in not quite large samples. *The Annals of Mathematical Statistics* 29: 614.
- ZINE EL ABIDINE, A.; 1998. Analyse de la diversité phyto-écologique des forêts du chêne zeen (*Quercus faginea* Lamk.) au Maroc. *Bull. Inst. Sci.* 12: 69-77.
- ZINE EL ABIDINE, A. Y FENNANE, M.; 1995. Essai de taxonomie numérique sur le chêne zène (*Quercus faginea* Lamk.) au Maroc. *Lagascalia* 18: 39-54.
- ZULUETA, J. Y MONTERO, G.; 1982. Posibilidades de mejora silvopascícola en montes bajos de quejigo (*Quercus faginea* Lamk.). Efecto de los aclareos en la producción de bellota. *Anales INIA. Ser. Forestal* 6: 75-87.