

MODELO DE CRECIMIENTO EN ALTURA E ÍNDICE DE SITIO PARA *JUNIPERUS THURIFERA* L. EN ESPAÑA.

Alonso Ponce, R. & Madrigal Casanueva, G.

Dpto. Sistemas y Recursos Forestales. Centro de Investigación Forestal. INIA. Ctra la Coruña km 7,5. 28040 Madrid ponce@inia.es, madrigal@inia.es

Resumen Hasta la fecha los planes de gestión elaborados para el enebro o sabina albar (*Juniperus thurifera* L.) se reducen a proyectos de ordenación para algunos montes en concreto. Para paliar esta falta de información, dentro del marco del convenio DGB-INIA "Tipificaciones ecológico selvícolas de distintas especies forestales españolas" se han elaborado modelos de crecimiento en altura, ya que son herramientas básicas para la gestión sostenible de las masas. Los datos con los que se cuenta para generar estos modelos corresponden a 54 parcelas repartidas por el área de distribución de la especie en España, de las que se han obtenido 77 análisis de tronco de otros tantos árboles dominantes. Se han probado distintas funciones, ajustando los modelos mediante ecuaciones en diferencias por el método de mínimos cuadrados generalizados.

Palabras clave: modelización, calidad de la estación, sabina albar, árboles dominantes.

HEIGHT GROWTH MODEL AND SITE INDEX FOR *JUNIPERUS THURIFERA* IN SPAIN.

Abstract Management plans for *Juniperus thurifera* have been scarcely tackled and for specific forests only. In order to ease this lack of information, height growth models have been developed, as they are basic tools for the sustainable management of the stands. Data were taken out from the stem analysis of 77 dominant trees growing in 54 sites throughout the Spanish distribution area of the species. Difference forms of several growth functions were tested and fitted using the generalized least squares method.

Key words: growth modelling, site quality, *Spanish juniper*, dominant trees.

MODÈLE DE CROISSANCE EN ALTITUDE POUR LE *JUNIPERUS THURIFERA* L. EN ESPAGNE

Résumé Jusqu'à nos jours, les plans de gestion élaborés pour le genévrier thurifère (*Juniperus thurifera*) ont été réduits à des projets d'organisation pour certains bois. Pour compenser cette manque de renseignements et dans le cadre de la convention DGB-INIA « Tipificaciones ecológico selvícolas de distintas especies forestales españolas » (Typifications écologie- sylvicoles des différentes espèces forestières espagnoles) on a élaboré des modèles de croissance en altitude puisqu'il s'agit des outils basiques pour la gestion durable des peuplements. Nous comptons avec certaines données pour la génération de ces modèles; elles correspondent à 54 parcelles distribuées sur la surface de distribution de l'espèce en Espagne. On a obtenu 77 analyses de trocs d'un même nombre d'arbres dominants. Diverses fonctions ont été testés, toujours à l'essai d'ajuster les modèles grâce aux équations en différences par la méthode des minimales carrés d'une façon généralisé.

Mots clés : modèle de croissance, *Juniperus thurifera*, arbres dominants, indice de station.

INTRODUCCIÓN

La gestión a largo plazo de las masas forestales es condición indispensable para su sostenibilidad, tanto desde un punto de vista socioeconómico como ecológico. El enebro o sabina albar (*Juniperus thurifera* L.) ha sido tradicionalmente olvidado por la investigación orientada a la gestión, probablemente debido su baja productividad maderera (LUCAS, 1998). Sin embargo, es una de las especies más importantes de nuestro país, al menos desde un punto de vista cuantitativo, ya que se extiende por más 664.000 ha, de las cuales unas 124.000 son masas puras y en 293.000 ha es la especie dominante, según la información del IFN y el MFE.

Aun cuando la importancia de los enebrales como montes protectores es incuestionable, su interés como fuente de recursos beneficiosos para el hombre no debe ser menospreciada. En Castilla y León, por ejemplo, se sigue aprovechando, aunque en escasa cuantía, la madera de enebro, bien para leña bien para aserrar, alcanzando la madera precios bastante elevados, además de que en toda España la calidad de los pastos de estos montes es muy estimada (LUCAS, 1998). Es pues necesaria la tarea de elaborar herramientas de fácil

aplicación que permitan al gestor poder planificar a largo plazo el manejo de los enebrales. Fundamentales son los modelos de crecimiento, ya que proporcionan información cualitativa y cuantitativa sobre las consecuencias que los diversos modos de gestión producirán en el ecosistema (SÁNCHEZ-GONZÁLEZ et al., 2005). Si bien existen varios trabajos sobre la producción en biomasa de esta especie (MONTÈS et al., 2000; MONTÈS et al., 2002), no los hay sobre el crecimiento en altura, aunque sí para otras especies americanas del mismo género (MEEUWIG, 1979; FOWLER & WITTE, 1988). Aunque muchos de los enebrales pueden ser considerados como masas semirregulares o irregulares, el uso de la altura de los pies dominantes y codominantes puede constituir un método eficaz de estudiar la potencialidad de un sitio con respecto a la especie. La dificultad estriba en la decisión subjetiva de cuáles son estos individuos, pero puede y debe ser superada con una observación minuciosa, tanto en el campo como de las curvas individuales de crecimiento.

MATERIAL Y MÉTODOS

Datos

Toma de muestras

Los datos se obtuvieron del análisis de troncos de 77 árboles apeados en 54 parcelas repartidas por el área de distribución de *Juniperus thurifera* en toda España. En cada una de ellas se apearon 1 ó 2 individuos, dependiendo de la disponibilidad de árboles sanos, sin pudriciones y claramente dominantes. Los análisis de troncos se realizaron extrayendo rodajas del fuste cada medio metro pasando por la altura normal, dada la lentitud de crecimiento de la especie. Siguiendo a PÉREZ (1999), se obtuvo al edad del árbol a la altura del tocón:

$$t = \text{ENTERO}((0,238 \cdot h_b) + 0,5) \quad (1)$$

donde h_b es la altura del tocón en centímetros y t la edad en años.

La corrección propuesta por CARMEAN (1972) para la altura que se alcanza en cada medida anual fue aplicada a los datos dada su sencillez, a pesar del mínimo error que se habría cometido (resultado de la ya comentada lentitud de crecimiento de la especie).

Depuración y estructura de los datos

Una vez calculadas las edades a las que se rebasó cada sección así como la altura total alcanzada en ese año de vida del árbol, se trazaron las curvas de edad-altura de cada individuo, agrupados por parcela. De esta manera se trató de descubrir crecimientos anómalos, principalmente por haber sufrido periodos de fuerte competencia en el pasado. En este caso, en la parcela se seleccionó el individuo con crecimiento más dominante, mientras que si ambos pies presentaban un crecimiento análogo se calculó el *árbol medio*, el cual se empleó como unidad de muestreo para la parcela correspondiente. De esta manera, en última instancia se contó con 54 unidades de muestreo, bien procedentes de árboles reales o de árboles medios.

De todas las estructuras de datos (HUANG, 1997), la que se genera al considerar todos los posibles intervalos, tanto crecientes como decrecientes, es la que ha proporcionado mejores resultados y más consistentes (RAMÍREZ-MALDONADO et al., 1987; FURNIVAL et al., 1990; GOELZ & BURK, 1992; HUANG, 1997).

Modelos de crecimiento

Método, análisis y validación del ajuste

La metodología empleada para ajustar las curvas fue la de ecuaciones en diferencias algebraicas (EDA), reflejada en la siguiente expresión:

$$h_2 = f(h_1, t_1, t_2, \beta) + e_{12} \quad (2)$$

donde h_1, t_1, h_2, t_2 son pares de valores edad altura en dos momentos del tiempo y e_{12} es el término del error y β el vector de parámetros a ajustar.

Este tipo de metodología asegura el cumplimiento de gran parte de los requisitos que debe verificar una función de crecimiento, a saber, polimorfismo, ser creciente y con punto de inflexión, existencia de asíntota horizontal, ser invariante con respecto a la edad de referencia, tener un comportamiento lógico y una base teórica, así como parsimonia en el uso de parámetros (GOELZ & BURK, 1992; ÁLVAREZ GONZÁLEZ et al., 2004). La invariabilidad con respecto a la edad de referencia es requisito fundamental e ineludible, y tanto esta metodología como las ecuaciones candidatas lo verifican (CIESZEWSKI & BELLA, 1989; ELFVING & KIVISTE, 1997).

Para rectificar el eventual problema de autocorrelación en los datos el ajuste se realizó mediante mínimos cuadrados generalizados aplicando la corrección propuesta por GOELZ & BURK (1992). Para realizar este ajuste simultáneo se ha empleado el procedimiento MODEL del paquete estadístico SAS/ETS.

Por otro lado, la elección del mejor modelo se basó tanto en consideraciones numéricas como gráficas. La *bondad del ajuste* se evaluó mediante el cálculo de la suma de cuadrados de los residuos (SCR), el residuo medio cuadrático (RMC), el residuo absoluto medio (RAM), el residuo medio (RM) y su intervalo de confianza, y el coeficiente de eficiencia del modelo (EF). En segundo lugar, la *capacidad predictiva* se valoró mediante el análisis de los residuos *press* (*prediction sum of squares*) (MYERS, 2004):

$$(e_{press_{i,-i}} = h_i - \hat{h}_{i,-i}) \quad (3)$$

donde h_i es la altura de la observación i y $\hat{h}_{i,-i}$ la estimación de esa misma altura al excluir esa observación del ajuste del modelo.

En tercer lugar, el modelo ajustado debe tener sentido biológico, en nuestro caso que la asíntota obtenga un valor realista y acorde con la especie.

En cuanto a los métodos gráficos, para cada ajuste se representó el conjunto de los residuos y el error medio cuadrático frente a las edades observadas y frente a las edades predichas, con el fin de detectar problemas de heterocedasticidad. En este caso, se volvió a realizar el ajuste por mínimos cuadrados generalizados pero ponderando cada observación con el inverso del error medio cuadrático de la clase de edad a la que perteneciera. Por último, se representaron las curvas ajustadas frente a las observadas con el objetivo de corroborar que los modelos cubrían todo el espectro de la muestra.

En cuanto a la validación, el tamaño de la muestra obligó a emplear el método autosuficiente *jackknife*, por el cual se excluye cada vez un individuo (árbol) de la muestra y se reajusta el modelo, con lo que se obtienen n distintos modelos. De esta manera se calcula el sesgo (s) y la varianza (v) del residuo medio y del residuo absoluto medio.

Funciones candidatas

Las funciones escogidas para modelizar el crecimiento en altura se exponen en la Tabla 1. Las formas integrales fueron extraídas de KIVISTE et al. (2002), escogiéndose varias de las más ampliamente empleadas en investigación forestal. Además, todas ellas cumplen el criterio de invariabilidad con respecto a la edad de referencia (HUANG, 1997). Las formas en diferencias de cada ecuación se obtuvieron despejando el parámetro que aparece en la tercera columna de la tabla.

Índice de sitio y determinación de la edad de referencia

El índice de sitio basado en la relación altura-edad es de lejos el más utilizado para evaluar la productividad o calidad de las estaciones forestales (HÄGGLUND, 1981), pero para ello es necesario fijar una edad de referencia. Siguiendo a GOELZ & BURK (1992), ésta debería ser inferior o igual al turno más breve habitualmente empleado en la gestión de la especie, y además ser un estimador fiable de la altura a otras edades. Ahora bien, la falta de un turno

“habitual” obliga a considerar el criterio propuesto por ÁLVAREZ GONZÁLEZ et al. (2004), según el cual la edad de referencia será aquélla en la que el error relativo sea menor y el número de observaciones suficientemente alto, siendo el error relativo (HUANG et al., 2003):

$$RE(\%) = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (H_i - \hat{H}_i)^2}{(n-p)H}} \quad (4)$$

RESULTADOS

Selección del modelo y caracterización del error

En la Tabla 2 se exponen los resultados obtenidos tras el ajuste de las funciones candidatas, teniendo en cuenta las siguientes consideraciones: se han obviado los modelos RC_a, MA_c, debido a las asíntotas extraordinariamente grandes que producen, el BC_a por falta de convergencia y el CL_d, a casusa de su comportamiento poco realista a edades tempranas. Además, mediante el análisis gráfico de los residuos frente al valor predicho de la altura en clases de 50 cm se estudió el grado de heterocedasticidad presente. Puede comprobarse (Figura 2) cómo el RMC aumenta para clases de altura extremas. Así pues, se procedió a recalculer el modelo mediante un ajuste por mínimos cuadrados generalizados ponderados, siendo el factor de ponderación el inverso del RMC de la clase de altura a la que pertenezca cada observación. Los análisis de troncos empleados presentan una ligera ausencia de observaciones en las edades y calidades altas, lo cual, aparte de muy común en este tipo de estudios, puede provocar una caída artificial en el valor de la asíntota (ÁLVAREZ GONZÁLEZ et al., 2004). Una solución de compromiso puede estar en considerar solamente las observaciones hasta una edad tal que quede recogido todo el espectro de clases de calidad (en este caso, 150 años, como puede observarse en la Figura 1, ajustar el modelo (y por lo tanto calcular la asíntota) y a continuación recalculer el modelo para el resto de parámetros y comprobar si hay cambios sustanciales. En todos los casos estos cambios fueron insignificantes. Así pues, los valores de los parámetros y los estadísticos expuestos en la Tabla 2 son pues el resultado del ajuste por mínimos cuadrados generalizados ponderados considerando únicamente edades inferiores a 150 años.

Ninguno de los residuos medios fue significativamente distinto de cero para un nivel de significación de 0,01 mientras que todos los parámetros resultaron significativos con $p < 0,01$. Los estadísticos relativos a la bondad del ajuste presentaron valores muy parecidos para todos los modelos, con errores absolutos medios rondando los 60 cm, así como eficiencias en torno al 86%. Sin embargo, el RPAM (que informa sobre la capacidad predictiva del modelo) resultó ser claramente peor para el modelo SCH_a, 140 cm, frente a los 75 cm aprox. de los otros tres casos. Apoyandonos en los resultados de la Tabla 2, el modelo elegido fue el MA_b ya que su asíntota es más coherente con las características de la especie, además de comprobar que cumple el criterio de invariabilidad respecto de la edad de referencia. Por consiguiente, el modelo de crecimiento en altura propuesto para *Juniperus thurifera* en España es el basado en la forma en diferencias de la ecuación de Hoßfeld IV o de McDill-Amateis con parámetro b libre, es decir, polimórfico con asíntota común. La ecuación (5) recoge este modelo con el parámetro c recalculado tras fijar la asíntota y ajustar para el conjunto de las observaciones:

$$H_2 = \frac{16,638}{1 - \left(1 - \frac{16,638}{H_1}\right) \left(\frac{t_1}{t_2}\right)^{1,384}} \quad (5)$$

En la Figura 3 se ha representado el residuo absoluto medio por clase de edad e intervalo de predicción para el modelo escogido. En general, el valor del RAM tiende a disminuir ligeramente con la edad aunque para los intervalos de predicción más amplios se

produce un máximo a edades intermedias (60-100 años). Sin tener en cuenta los intervalos de predicción, el RAM disminuye desde los 86 cm para la clase de edad inferior hasta los 58 cm para la superior. Por su parte, la eficiencia del modelo frente a las clases de edad e intervalos de predicción se muestran en la Figura 4. Salvo para el intervalo de predicción de 20-40 años, los valores se mantienen aproximadamente entre el 80y el 90%, con cierta tendencia a disminuir para clases de edad bajas (especialmente para la clase de edad 0-20 años e intervalo de predicción 20-40 años, con una paupérrima eficiencia del 30%).

Por último, el procedimiento de autovalidación *jackknife* tuvo como resultado un sesgo de 9,59 mm y una varianza de 55,45 mm².

Índice de sitio

Tal y como se expuso en el apartado de material y métodos, para el cálculo del índice de sitio es necesario fijar previamente una edad de referencia, obtenida mediante el cálculo del error relativo (RE). En la Figura 5 se ha encuadrado un rango de edades (70-110) en el que el error relativo es mínimo y además existe un número suficientemente alto de observaciones. El centro de dicho intervalo es 90 años, pero dado que precisamente en esa clase de edad se produce un pequeño mínimo relativo en número de observaciones, se ha preferido adoptar los 100 años como edad de referencia. Si obligamos a que la ecuación (5) pase por los puntos (100,10.5), (100,8.5), (100,6.5), (100,4.5) y (100,2.5) se obtienen cinco curvas que representan los límites de cuatro clases de calidad propuestas, tal y como se han representado en la Figura 1, en la que además se puede comprobar la más que aceptable concordancia entre los análisis de tronco originales y el modelo ajustado. De esta manera se puede definir el índice de sitio como la altura alcanzada por los árboles dominantes a los 100 años de edad

DISCUSIÓN

En el presente trabajo se presentan por primera vez modelos de crecimiento en altura para toda el área de distribución de *Juniperus thurifera* en España. A partir de estos modelos se ha definido un índice de sitio basado en la altura, el cual es mucho menos dependiente de la densidad de la masa o del tratamiento silvocultural que haya sufrido (SÁNCHEZ-GONZÁLEZ et al., 2005), fijando una edad de referencia de 100 años y cinco alturas, a saber, 2.5, 4.5, 6.5, 8.5 y 10.5 metros (Figura 1). La edad de referencia ha tenido que ser fijada en función de criterios estadísticos debido a la carencia de una “tradición gestora” de la especie, ya que el proyecto de ordenación más antiguo de un monte de *Juniperus thurifera* es el de Aragoncillo, en Guadalajara (CAMPOS, 1963), que además nunca fue ejecutada. Con el cálculo del error relativo se ha considerado un intervalo óptimo de edades (70-110 años), y teniendo en cuenta el lento crecimiento de la especie, los datos de los análisis de troncos empleados y que las escasas referencias a una edad de madurez o turno indican valores por encima de los 150 años, parece razonable la edad de referencia considerada de 100 años. Por encima de esa edad carecería de justificación estadística (para nuestros datos) y por debajo quedaría demasiado alejada de un hipotético turno para la especie.

El método de ajuste fue el de ecuaciones en diferencias algebraicas, con la corrección de la autocorrelación formulada por GOELZ & BURK (1992), el cual ya ha sido empleado con éxito en ocasiones anteriores para especies del ámbito mediterráneo, tanto coníferas (CALAMA et al., 2003; BRAVO et al., 2004) como frondosas (SÁNCHEZ-GONZÁLEZ et al., 2005), confirmándose de nuevo en el presente trabajo su flexibilidad y utilidad.

El modelo de McDill-Amateis (o de Hoßfeld IV) con el parámetro *b* libre, es decir, polimórfico y con asíntota común, fue escogido por presentar mejores resultados en el ajuste, además de una asíntota muy coherente con las características de la especie. Por añadidura, el proceso de autovalidación desarrollado ha puesto de manifiesto la notable capacidad predictiva del modelo. Podría pensarse a priori que un modelo con asíntota variable se

ajustaría mejor a las características de las especie, en la que parece observarse un estancamiento en el crecimiento en altura, tal y como ocurre con otros *Juniperus* (MEEUWIG, 1979; CHOJNACKY, 1986). Sin embargo no es así, quizá porque nuestros datos no alcanzan a recoger, para las clases de calidad inferiores, el momento en que se produce ese estancamiento. Además, este hecho apunta a que las clases de calidad bajas mantienen una tasa de crecimiento en altura notablemente constante a lo largo de su vida, lo cual es congruente con lo descrito por MEEUWIG (1979) para *Juniperus osteosperma*. Esta persistencia en la tasa de crecimiento también se ha corroborado para variables de masa como el área basimétrica (MEEUWIG & COOPER, 1981; PASCUAL, 2003). En cualquier caso, a efectos prácticos, el modelo aquí presentado es válido para un rango de edades suficientemente amplio (hasta los 200 años, aproximadamente) como para defender su utilidad.

La comparación del RAM entre los distintos intervalos de predicción se observa con más claridad en las clases intermedias de edad, ya que incluyen mayor número de observaciones y evitan la inestabilidad presente en el resto de clases de edad. Los errores más elevados se cometen para intervalos de predicción mayores de 60 años, aunque no es homogéneo para todas las clases de edad. El descenso observado en el valor de RAM para las clases de edad superiores es posiblemente ficticio y debido al reducido número de observaciones. En todo caso, el error que se comete al pronosticar una altura a menos de 20 años vista es el menor de todos (menos de medio metro) en un rango de edades que va de los 20 a los 100 años, por lo que es suficientemente preciso para los intervalos de tiempo normalmente manejados en la gestión forestal.

Una aplicación inmediata, entre otras, de estos modelos, puede consistir en predecir el tiempo necesario para que el regenerado alcance la altura suficiente para escapar del diente del ganado. Considerando una altura de 2 m como el umbral para verse libre del diente del ganado menor (el más habitual en los montes de *Juniperus thurifera*), los lapsos de tiempo variarían entre los 17 años para la clase de calidad I y 84 para la peor, la V. PÉREZ (1999) encontró valores análogos en terrenos agrícolas abandonados, los cuales podrían asimilarse a las mejores calidades definidas aquí. Es, pues, notoria la necesidad de mantener el ganado fuera de las peores estaciones durante un periodo de tiempo muy prolongado, más si cabe al tener en cuenta que precisamente en esas localidades de peor calidad la labor protectora del monte es la fundamental.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ÁLVAREZ GONZÁLEZ; J.G., BARRIO ANTA, M.; DIÉGUEZ ARANDA, U. & ROJO ALBORECA, A. (2004). Metodología para la construcción de curvas de calidad de estación. *Cuadernos de la SECF*, 18: 303-309.
- BRAVO, A.; DEL RÍO, M. & MONTERO, G. (2004). Site index curves and growth model for Mediterranean maritime pine (*Pinus pinaster* Ait.) in Spain. *For. Ecol. Manage.* 201: 187-197.
- CALAMA, R.; CAÑADAS, N. & MONTERO, G. (2003). Interregional site-index models for stone pine (*Pinus pinea* L.) in Spain. *Ann. For. Sci.* 60: 259-269.
- CARMENAN, W.H. (1972). Site index curves for upland oaks in the central States. *For. Sci.*, 18 (2): 109-120.
- CIESZEWSKI, C.J. & BELLA, I.E. (1989). Polymorphic height and site index curves for lodgepole pine in Alberta. *Can. J. For. Res.* 19: 1151-1160.
- CHOJNACKY, D.C. (1986). Pinyon-juniper site quality and volume growth equations for Nevada. *Intermountain Forest and Range Experiment Station*. Res. Pap. INT-372: 1-7.
- ELFVING, B. & KIVISTE, A. (1997). Construction of site index equations for *Pinus sylvestris* L. using permanent plot data in Sweden. *For. Ecol. Manage.* 98: 125-134.

- FOWLER, J.M. & WITTE, J.M. (1988). Growth characteristics and thinning response for the pinyon-juniper woodland type in New Mexico. *Intermountain Forest and Range Experiment Station*. Gen. Tech. Rep. INT-215: 266-272.
- FURNIVAL, G.M.; GREGOIRE, T.G. & VALENTINE, H.T. (1990). An analysis of three methods for fitting site-index curves. *For. Sci.*, 36 (2): 464-469.
- 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.
- HÄGGLUND, B. (1981). Evaluation of forest site productivity. *Forestry Abstracts* 42 (11): 515-527.
- HUANG, S. (1997). Development of compatible height and site index models for young and mature stands within an ecosystem-based management framework, in: Amaro A., Tomé, M. (Eds.), *Empirical and process-based models for forest tree and stand growth simulation*: 61-98. Lisboa.
- HUANG, S.; YANG, Y. & WANG, Y. (2003). A critical look at procedures for validating growth and yield models. In: Amaro, A.; Reed, A.D. & Soares, P. (eds.), *Modelling forest systems*: 271-293. CABI Publishing. Wallingford.
- KIVISTE, A.; ÁLVAREZ GONZÁLEZ, J.G.; ROJO ALBORECA, A. & RUIZ GONZÁLEZ, D. (2002). *Funciones de crecimiento de aplicación en el ámbito forestal*. Monografías INIA: Forestal nº4, 190 p.
- LUCAS, J.A. (1998). Gestión, aprovechamiento y desarrollo sostenible de las masas de enebro, jabino o sabina albar (*Juniperus thurifera* L.) en la provincia de Soria. *Montes*, 52: 121-130.
- MEEUWIG, R.O. & COOPER, S.V. (1981). Site quality and growth of pinyon-juniper stands in Nevada. *For. Sci.* 27 (3): 593-601.
- MEEUWIG, R.O., (1979). Growth characteristics of pinyon-juniper stands in the western Great Basin. *Intermountain Forest and Range Experiment Station*. Res. Pap. INT-238: 1-22.
- MONTÈS, N.; BERTAUDIÈRE MONTES, V.; BADRI, W.; ZAOUI, EL H. & GAUQUELIN, T. (2002). Biomass and nutrient content of a semi-arid mountain ecosystem: the *Juniperus thurifera* L. woodland of Azzaden Valley (Morocco). *For. Ecol. Manage.* 166 (1/3): 35-43.
- MONTÈS, N.; GAUQUELIN, T.; BADRI, W.; BERTAUDIÈRE, V. & ZAOUI, ELH. (2000). A non-destructive method for estimating above-ground forest biomass in threatened woodlands. *For. Ecol. Manage.* 130 (1/3): 37-46.
- MYERS, R. (1986). *Classical and modern regression with applications*. Duxbury- Press, Boston, Massachusetts, 359 p.
- PASCUAL, H. (2003). *Índice de sitio para Juniperus thurifera L. en Castilla y León*. Proyecto Fin de Carrera. EUIT Forestal de Soria. Universidad de Valladolid.
- PÉREZ, E. (2000). *Regeneración de Juniperus thurifera en terrenos agrícolas abandonados*. Proyecto Fin de Carrera. EUIT Agrícola de Soria. Universidad de Valladolid.
- SÁNCHEZ GONZÁLEZ, M.; TOMÉ, M. & MONTERO, G. (2005). Modelling height and diameter growth of dominant cork oak trees in Spain. *Ann. For. Sci.* 62: 633-643.

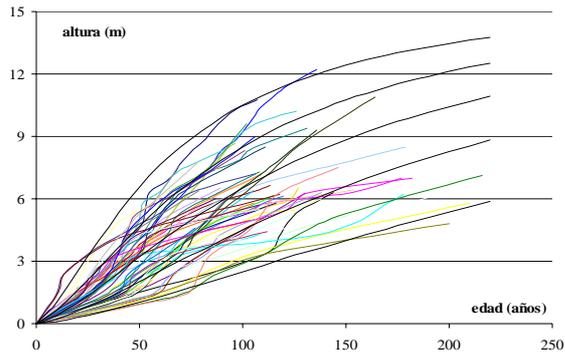


Figura 1. Modelo de crecimiento para *Juniperus thurifera*, representados para las clases de calidad definidas. Las líneas sinuosas representan los análisis de troncos empleados.

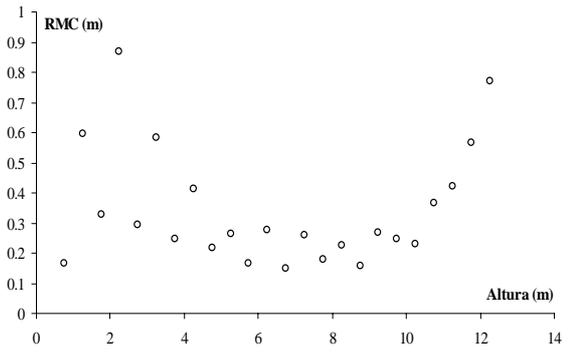


Figura 2. Residuo cuadrático medio (RMC) por clases de altura según el modelo de McDill-Amateis con el parámetro libre.

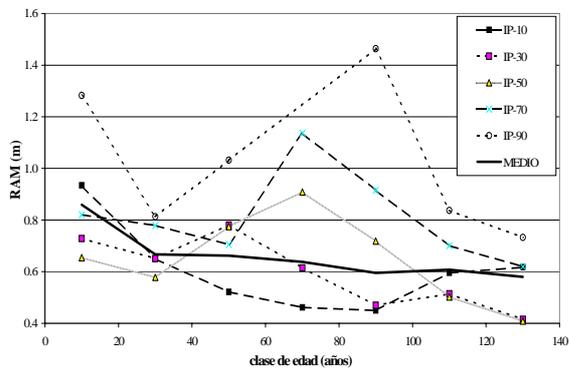


Figura 3. Residuo absoluto medio (RAM) por clases de edad e intervalo de predicción.

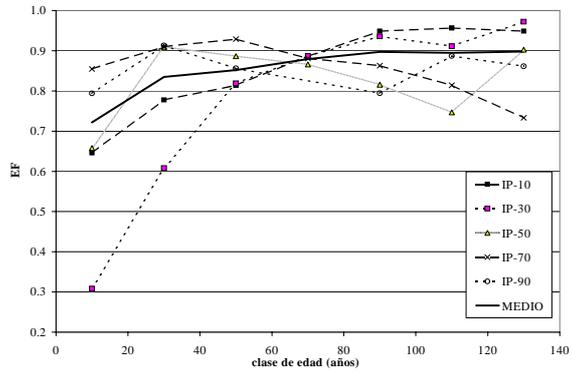


Figura 4. Eficiencia del modelo (EF), en tanto por uno, por clases de edad e intervalo de predicción.

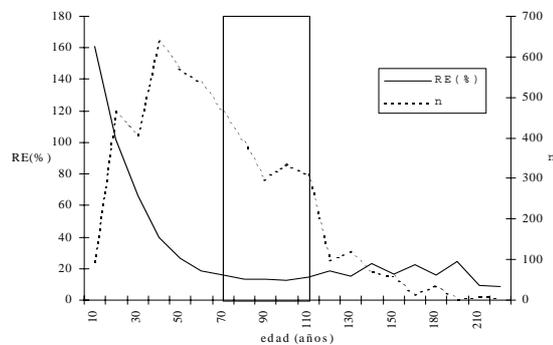


Figura 5. Error relativo de la predicción en altura según la edad de referencia escogida. La zona resaltada se corresponde con el intervalo de edades más adecuado como edad de referencia para el cálculo del índice de sitio.

Tabla 1. Funciones candidato para modelo de crecimiento en altura de *Juniperus thurifera*

Ecuación		Ptro. libre	EDA	Código
MCDILL-AMATEIS (1992) (o Hoßfeld IV)	$H = \frac{a}{1 + b/t^c}$	b	$H_2 = a / \left(1 - (1 - a/H_1)(t_1/t_2)^c \right)$	MA _b
		c	$H_2 = a / \left(1 + \left(b / \left(bH_1 / (a - H_1)^{(\ln t_2 / \ln t_1)^c} \right) \right) \right)$	MA _c
RICHARDS-CHAPMAN (1959)	$H = a(1 - e^{-bt})^c$	a	$H_2 = H_1 \left(\frac{1 - e^{-bt_2}}{1 - e^{-bt_1}} \right)$	RC _a
		b	$H_2 = a \left(1 - \left(1 - (H_1/a)^{1/c} \right)^{t_2/t_1} \right)^c$	RC _b
BAILEY & CLUTTER (1974)	$H = e^{a+bt^c}$	a	$H_2 = H_1 e^{b(t_2^c - t_1^c)}$	BC _a
		b	$H_2 = e^{a + (\ln H_1 - a) \left(\frac{t_2}{t_1} \right)^c}$	BC _b
SCHUMACHER (1939)	$H = ae^{b/t}$	a	$H_2 = H_1 e^{b \left(\frac{1}{t_2} - \frac{1}{t_1} \right)}$	SCH _a
CLUTTER-LENHART (1968)		d	$H_2 = e^{a + \frac{b}{t_2} \left(\ln H_1 - a - \frac{b}{t_1} \right) e^{\left(\frac{1}{t_2} - \frac{1}{t_1} \right)}}$	CL _d

Tabla 2. Estimación de los parámetros ajustados y estadísticos de bondad del ajuste y capacidad predictiva de las funciones candidatas. SCR, suma de cuadrados de los residuos; RMC, residuo medio cuadrático; RAM, residuo absoluto medio; RM, residuo medio; EF, eficiencia; RPAM, residuo *press* absoluto medio; a, b y c, parámetros.

Modelo	SCR	RMC	RAM	RM	EF(%)	RPAM	a	b	c
MA _b	4510,3	0,965	0,652	0,014	86,1	0,730	16,638	-	1,425
RC _b	4554,4	0,972	0,657	0,016	86,0	0,772	13,763	-	1,438
BC _b	4781,4	0,975	0,639	0,002	85,9	0,779	3,362	-	-0,515
SCH _a	4475,0	0,957	0,597	0,011	86,2	1,393	-	-34,134	-