



2025 | **16-20**
GIJÓN | **JUNIO**

9º CONGRESO FORESTAL ESPAÑOL

9CFE-1569

Actas del Noveno Congreso Forestal Español
Edita: **Sociedad Española de Ciencias Forestales. 2025.**
ISBN: **978-84-941695-7-1**

Organiza





Nuevas ecuaciones generalizadas de altura-diámetro para las especies forestales españolas

VÁZQUEZ-VELOSO, A. (1), YANG, S. I. (2), BULLOCK, B. P. (2) y BRAVO, F. (1)

1. SMART Ecosystems Group. Departamento de Producción Vegetal y Recursos Forestales. Instituto Universitario de Investigación en Gestión Forestal Sostenible (iuFOR), ETS Ingenierías Agrarias, Universidad de Valladolid, Avda. de Madrid 57, 34004 Palencia, Spain
2. Warnell School of Forestry and Natural Resources, University of Georgia, Athens, GA, 30602, USA

Resumen

La modelización forestal es una herramienta esencial para predecir la evolución de los árboles individuales y las masas forestales, apoyando una gestión forestal sostenible. En este ámbito, variables como el diámetro normal y la altura de los árboles son el punto de partida para estimar otras variables de interés, como el volumen o la biomasa. Sin embargo, medir la altura de los árboles en monte puede ser una tarea difícil, que lleva tiempo y presenta desafíos en su ejecución. Este trabajo presenta nuevos modelos altura-diámetro para las principales especies forestales de España. Utilizando datos del Inventario Forestal Nacional y modelos mixtos no lineales, las parametrizaciones propuestas cubren diferentes especies, características del rodal y factores ambientales. La gran ventaja de dichos modelos radica en la accesibilidad de las variables que requieren, reduciendo la necesidad de cálculos previos o mediciones complejas en monte. Además, su integración en herramientas como el simulador SIMANFOR permite a los gestores y propietarios forestal obtener información clave para sus itinerarios selvícolas (como el volumen de madera u otros servicios ecosistémicos) con un inventario inicial menos exigente.

Palabras clave

Modelos mixtos no lineales, Inventario Forestal Nacional, modelización forestal, silvicultura, gestión forestal

1. Introducción

Las guías de silvicultura de referencia han sido y siguen siendo una herramienta de referencia para la gestión forestal en nuestro país (BRAVO, 2022; SERRADA et al., 2008). Sin embargo, las simulaciones de silvicultura se presentan como una alternativa interesante para aquellos casos en los que no existen experiencias previas en el manejo de una masa forestal, como es el caso de las masas mixtas (BRAVO & VÁZQUEZ-VELOSO, 2024). Herramientas como SIMFOR (QFORESTRY, 2024), MEDFATE (DE CÁCERES et al., 2022) o SIMANFOR (BRAVO et al., 2025b, 2025a) permiten realizar este tipo de predicciones, y se alimentan de modelos predictivos parametrizados para distintas especies y zonas de estudio (BRAVO et al., 2012; DIÉGUEZ-ARANDA et al., 2009).

Entre las herramientas fundamentales en la modelización forestal se encuentra la



relación altura-diámetro (h-d). Mientras que medir el diámetro a la altura del pecho (d) es sencillo y rápido, obtener mediciones precisas de la altura suele ser laborioso, requiriendo más tiempo y experiencia (CALAMA & MONTERO, 2004; DIÉGUEZ-ARANDA et al., 2005; YANG & BURKHART, 2020). Por estos motivos, los modelos altura-diámetro siguen siendo una herramienta valiosa, reduciendo significativamente el coste y esfuerzo invertido en la inventariación forestal. Pese a que existen distintos modelos que cubren diferentes especies y regiones de España (ver compilación de modelos en el Anejo 1 de Vázquez-Veloso et al. (2025)), todavía es necesario un mayor esfuerzo para cubrir las distintas especies y distribuciones que encontramos en este país. Además, de entre los modelos existentes, la usabilidad de algunos puede verse comprometida. Es el caso de los modelos publicados por Trasobares et al. (2022), que requieren conocer la capacidad de retención de agua del suelo; otros, requieren conocer la altura dominante de la masa (ADAME et al., 2008; GÓMEZ-GARCÍA, 2013; RODRÍGUEZ DE PRADO et al., 2022), lo que puede llevar a situaciones potenciales donde ambas variables son inestimables debido a la falta de los datos necesarios. Por otro lado, los cambios en la gestión forestal y el ambiente que afectan a la alometría del arbolado pueden haber modificado estas relaciones, dejando desfasados algunos modelos existentes (CANTERO AMIANO, 2013).

Para cubrir el hueco existente en la modelización h-d en España, este estudio tiene como objetivo desarrollar nuevas ecuaciones h-d para las especies forestales españolas más comunes. Para facilitar su uso e implementación por gestores forestales, se incluyeron en el modelo variables fáciles de registrar, utilizando una única expresión matemática y reduciendo los esfuerzos requeridos tanto para la toma de datos de inventario como para la aplicación del modelo. Además, su implementación en el simulador de gestión forestal SIMANFOR (BRAVO et al., 2025b, 2025a) y las herramientas ofrecidas en el Anejo 2 facilitan su uso.

2. Objetivos

El objetivo de este trabajo es desarrollar nuevas ecuaciones altura-diámetro para las principales especies forestales de España, promoviendo la sencillez en su uso mediante la metodología empleada y su implementación en distintas herramientas para el usuario final.

3. Metodología

Datos utilizados

Los datos utilizados en este estudio proceden de la segunda (de 1986 a 1996), tercera (de 1997 a 2007) y cuarta ediciones (en curso desde 2008) del Inventario Forestal Nacional de España (IFN) (ALBERDI et al., 2017). El IFN sigue un diseño sistemático con una cuadrícula de 1 km² para determinar la ubicación de las parcelas. Cada parcela consta de cuatro subparcelas concéntricas, de forma circular, con radios de 5, 10, 15 y 25 m, respectivamente. En cada una de ellas, se registraron el tamaño del árbol, la forma, la posición y los daños para todos los árboles con un diámetro normal (d) \geq 7,5; 12,5; 22,5 y 42,5 cm, respectivamente (ALBERDI et al., 2017). Durante la preparación de los datos, se eliminaron aquellas observaciones que (1) podían alterar el ajuste de las relaciones altura-diámetro (h-d), incluyendo formas no rectas (por ejemplo, bifurcaciones o árboles torcidos),

daños bióticos o abióticos (por ejemplo, enfermedades o árboles muertos) y peculiaridades tales como árboles descortezados (*Quercus suber*) o resinados (*Pinus pinaster*) cuyos efectos perturban su alometría; y (2) casos en los que las coordenadas de las parcelas se registraron incorrectamente, pues no es posible asignar una región climática en el análisis posterior. A partir de los 3.373.698 registros originales de la base de datos, tan solo 1.512.721 de registros pasaron el proceso de depuración para ajustar relaciones h-d, estando representadas un total de 91 especies forestales arbóreas.

Los datos de diámetro normal, altura total y especie de la base de datos originales fueron utilizados para el ajuste estadístico, a lo que se añadieron variables cualitativas de la masa forestal. Así, a cada árbol se le asignó la información de la región biogeográfica a la que pertenece (MITECO, 2024), donde se incluyen las regiones Atlántica, Mediterránea, Alpina y Macaronésica (Figura 1). El origen de la masa (natural o artificial) fue otra variable determinada a partir de la información inicial del IFN para cada parcela e incluida en el estudio. Por último, la composición específica (masas puras o mixtas) fue calculada a partir de los datos de cada parcela, considerando que una masa es mixta cuando la proporción conjunta de al menos dos especies supera el 90 % del área basimétrica de la parcela y la proporción de ambas especies es superior al 15 % de la misma. La Tabla 1 resume los datos de partida utilizados en el estudio.

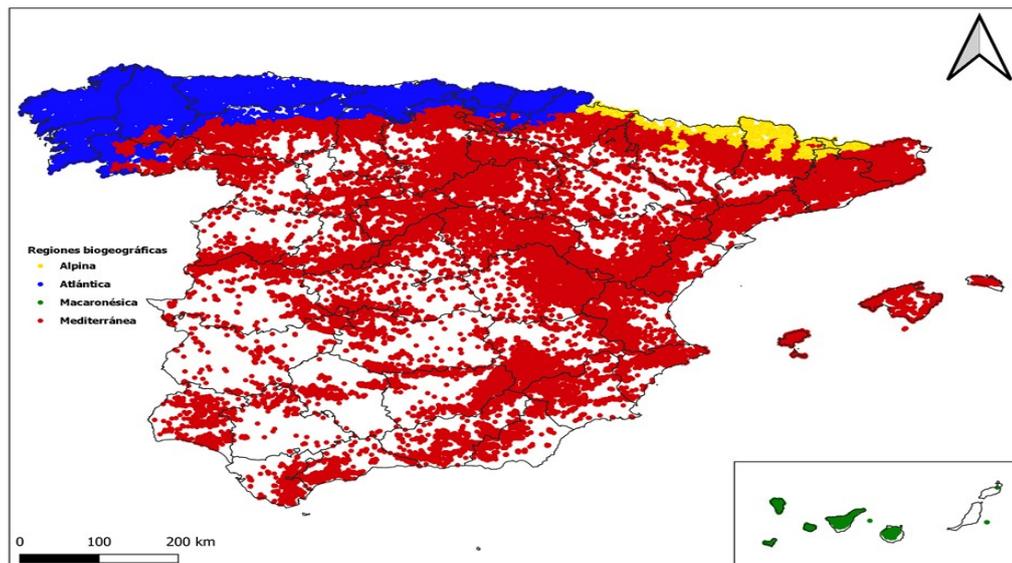


Figura 1. Distribución espacial de las parcelas del IFN empleadas en este estudio. El color de cada parcela hace referencia a la región biogeográfica donde se localiza.

Ajuste de modelos

El análisis estadístico utilizado para modelizar las relaciones h-d se desarrolló en dos pasos. El primer paso consistió en recopilar ecuaciones h-d de la literatura científica, utilizando como criterio que utilicen el d como única variable



dependiente, logrando obtener un total de 95 ecuaciones diferentes empleadas en Europa (LEBEDEV & KUZMICHEV, 2020; LEBEDEV, 2020), América del Norte (MOORE et al., 1996; TEMESGEN et al., 2007; TEMESGEN & V. GADOW, 2004) y otras partes del mundo (EL MAMOUN et al., 2013; SCARANELLO et al., 2012; WAGLE et al., 2024). Mientras que algunas de estas ecuaciones no han sido previamente utilizadas en España, si han sido consideradas en este estudio debido a la variabilidad de especies incluidas en el mismo. Estos modelos base se ajustaron para cada una de las especies estudiadas utilizando la función *nlsLM* del paquete de R *minpack.lm* (ELZHOV et al., 2023) y se evaluaron para cada especie utilizando el índice de “Akaike Criterion Information” (AIC) (AKAIKE, 1974). Utilizando la frecuencia en la que cada modelo fue elegido la mejor opción para las 91 especies estudiadas, los 5 modelos base más elegidos se utilizaron como candidatos en la siguiente fase del estudio.

El segundo paso consistió en el ajuste de modelos mixtos no lineales utilizando cada uno de los modelos base candidatos. En este análisis, la especie se incluyó en el modelo como un efecto aleatorio, mientras que las tres variables cualitativas mencionadas anteriormente (región biogeográfica, origen de la masa y composición específica) se incluyeron como un efecto fijo. Se estudiaron todas las posibles combinaciones de efectos fijos y aleatorios para cada modelo base y, aquellos capaces de converger, se ordenaron en base a su AIC, permitiendo elegir el modelo óptimo para nuestro estudio. El ajuste de modelos mixtos no lineales se ha realizado con la librería *nlme* (PINHEIRO et al., 2017) de R (R CORE TEAM, 2021), herramienta con la que se hizo la depuración y análisis de datos en este estudio. Tanto los datos como el código utilizado en el desarrollo de este trabajo pueden consultarse en el Anejo 3.

Tabla 1. Valores mínimos, máximos, medios y desviación típica del diámetro normal (cm) y altura total (m) de los árboles utilizados en el estudio para cada composición específica, origen de masa y región biogeográfica.



Región biogeográfica	Origen masa	Composición específica	Diámetro normal				Altura			
			mín	máx	med	des	mín	máx	med	des
Alpina	artificial	mixta	7,5	46,7	20,5	7,0	3,5	22,5	11,0	3,8
		pura	7,5	62,7	20,8	7,4	3,0	31,0	12,0	4,9
	natural	mixta	7,5	117,1	27,4	13,3	2,5	39,5	13,9	5,2
		pura	7,5	130,5	27,2	12,0	1,0	41,5	13,8	5,3
Atlántica	artificial	mixta	7,5	106,3	26,9	13,3	2,5	59,1	18,0	7,1
		pura	6,8	118,7	27,9	13,1	2,0	54,2	19,1	7,6
	natural	mixta	7,5	143,9	30,0	15,5	3,0	52,0	16,8	6,0
		pura	7,3	137,0	30,5	15,2	2,5	49,6	17,0	6,1
Macaronésica	artificial	mixta	8,0	91,7	34,3	13,8	4,0	39,9	17,1	6,3
		pura	7,5	85,3	28,3	10,9	2,9	34,2	16,0	5,9
	natural	mixta	7,5	123,2	32,9	19,3	3,0	37,3	16,1	6,1
		pura	6,7	178,2	35,2	17,1	2,5	50,5	15,9	6,1
Mediterránea	artificial	mixta	7,2	130,5	20,9	8,6	2,5	41,8	10,8	4,4
		pura	7,5	108,5	21,3	8,1	2,2	47,0	11,6	5,4
	natural	mixta	7,5	140,0	25,2	12,0	2,0	43,1	11,8	4,5
		pura	6,7	174,0	25,4	11,6	1,5	44,2	11,9	4,6

4. Resultados

Tras ajustar los 95 modelos iniciales para cada una de las 91 especies incluidas en este estudio, los 5 modelos con menor valor de AIC fueron seleccionados como candidatos para el modelo final (Tabla 2), descartando aquellos que no fueron capaces de compilar para alguna de las especies estudiadas.

Tabla 2. Ranking de modelos base obtenidos según los valores del "Akaike Information Criterion" (AIC) más bajos, candidatos para el ajuste de modelos mixtos no lineales. En las ecuaciones, h se corresponde con la altura total (m); d con el diámetro normal (cm); a y b son parámetros de la ecuación.

Modelo	Ecuación	AIC	Referencia
M1	$h = \frac{1}{a} \ln \left(\frac{b}{(a+b)^2} \right)$	108778,8	SCARANELLO et al. (2012)
M2	$h = \frac{1}{a} \ln \left(\frac{b}{a} \right)$	108821,1	EL MAMOUN et al. (2013)
M3	$h = \frac{1}{a} \ln \left(\frac{b}{(a+b)^2} \right)$	108912,7	EL MAMOUN et al. (2013)
M4	$h = \frac{1}{a} \ln \left(\frac{b}{(a+b)^2} \right)$	108988,5	SCARANELLO et al. (2012)
M5	$h = a + b \ln \left(\frac{b}{a} \right)$	109980,6	EL MAMOUN et al. (2013)

Los 5 modelos candidatos se utilizaron para ajustar modelos mixtos no lineales, ensayando todas las combinaciones de efectos fijos y aleatorios posibles y ordenándolas en base a su valor de AIC (Tabla 3), permitiendo así seleccionar el modelo final.

Tabla 3. Ranking de modelos mixtos no lineales obtenido según los valores del "Akaike Information Criterion" (AIC) más bajos. La columna de efectos fijos detalla la combinación de variables de minimiza el AIC, siendo "a" y "b" coeficientes del modelo y "x" los efectos fijos (x_1 = composición específica; x_2 = origen del rodal; x_3 = región biogeográfica).

Modelo	Efectos fijos	AIC
M3	$(a+b) (x_1+x_2+x_3)$	7734375
M1	$a (x_1+x_2+x_3) b (x_1+x_2)$	7753404
M5	$(a+b) (x_1+x_2+x_3)$	7756898
M2	$(a+b) (x_1+x_2+x_3)$	7757645
M4	$a (x_1+x_2) b (x_1+x_2+x_3)$	7768132

En este modelo final, los resultados indican un menor poder predictivo en los árboles de mayor altura en algunas especies (Figura 2, casos a y b), mientras que el

poder predictivo es mayor para todo el rango de alturas estudiado en otros casos (casos c, d y e). Considerando todas las especies, el rango de alturas estudiado se establece entre 1,0 y 59,1 m (caso f).

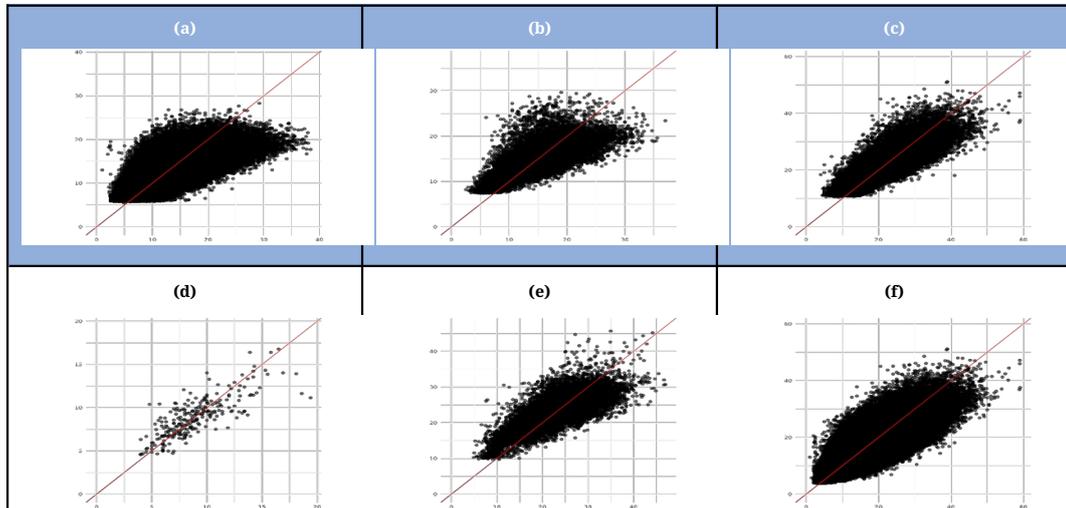
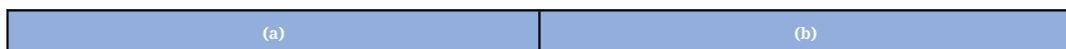


Figura 2. Comparativa de alturas observadas (eje x) y predichas (eje y) en metros para diferentes especies incluidas en el estudio: (a) Pinus sylvestris, 352.379 árboles; (b) Quercus petraea, 16.674 árboles; (c) Eucalyptus globulus, 36.271 árboles; (d) Cupressus arizonica, 247 árboles; (e) Populus x canadensis, 15.516 árboles; (f) todas las especies estudiadas, 1.512.721 árboles. La línea roja indica coincidencia perfecta entre valores observados y predichos.

Por otro lado, las tres variables cualitativas evaluadas resultaron ser significativas, mostrando diferentes tendencias del mismo modelo tal y como se resume en la Figura 3.



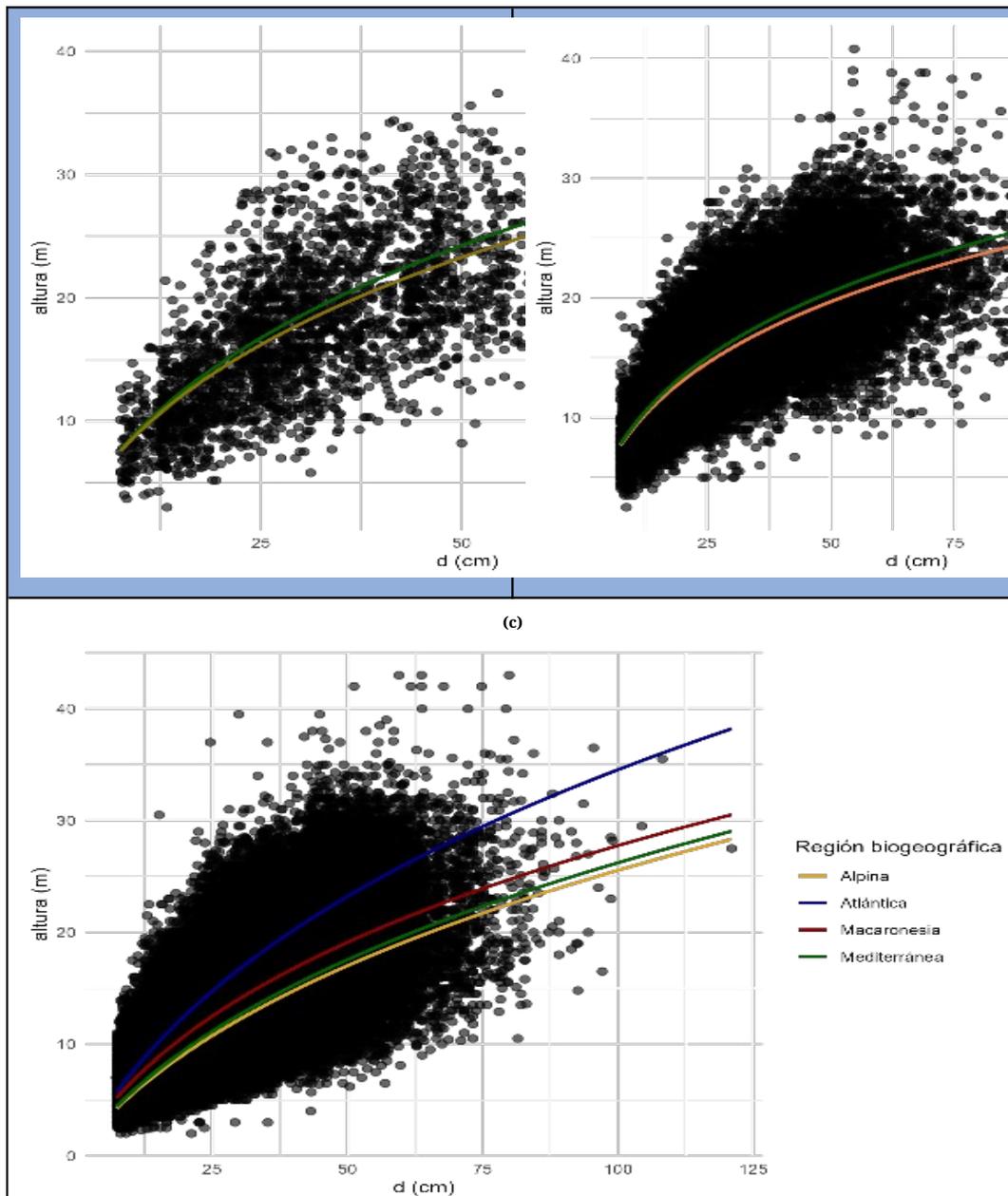


Figura 3. Comportamiento del modelo final bajo las diferentes características del rodal incluidas en el estudio. Los gráficos muestran los valores observados de diámetro a la altura del pecho (d) y altura para una determinada especie, mientras que cada línea representa el comportamiento del modelo asociado a una característica específica del rodal, manteniendo valores por defecto en las demás características. El gráfico (a) muestra los valores de *Populus alba* (2.627 árboles) para cada origen del rodal: natural (verde) y artificial (marrón). El gráfico (b) muestra los valores de *Quercus robur* (26.948 árboles) para cada mezcla de especies del rodal: puro (verde) y mixto (naranja). El gráfico (c) muestra los valores de *Pinus pinaster* (228.084 árboles) para cada región climática: Alpina (amarillo), Atlántica (azul), Macaronésica (rojo) y Mediterránea (verde).

La expresión final del modelo y los parámetros para las distintas especies y variables de masa estudiadas se resumen en el Anejo 1.



5. Discusión

Este estudio presenta un nuevo modelo altura-diámetro parametrizado para 91 de las especies forestales más comunes en España. Pese a que modelos calibrados localmente pueden lograr un mayor poder predictivo, a menudo no existen modelos disponibles para muchas regiones y especies. Así, este modelo pretende servir de herramienta base, ofreciendo predicciones de altura adaptadas a diferentes características de la masa, pero con unos requisitos mínimos en cuanto a los datos de partida.

Nuestro modelo final muestra una eficacia diferente dependiendo de la especie y características de la masa. En general, se ha encontrado que tiene un menor poder predictivo para árboles de mayores dimensiones en especies como *Pinus sylvestris* o *Quercus petraea*, situación que ya ha sido notificada en estudios previos realizados en otras especies (CALAMA & MONTERO, 2004; SÁNCHEZ-GONZÁLEZ et al., 2007) y normalmente desencadenada por una menor cantidad de observaciones de valores extremos. Alternativas como la incorporación de variables climáticas y de calidad de sitio (SÁNCHEZ-GONZÁLEZ et al., 2007), la altura dominante y el diámetro dominante (CRECENTE-CAMPO et al., 2010) han sido propuestas para resolver este tipo de situaciones, además de la calibración del modelo para cada casuística (CASTEDO-DORADO et al., 2006; VÁZQUEZ-VELOSO et al., 2023). Por otro lado, este modelo demostró ser robusto para aquellas especies que cuentan con una cantidad de datos reducida, como es el caso de *Cupressus arizonica*, llegando a cubrir un total de 91 especies.

Por otro lado, las variables cualitativas incluidas en el modelo han demostrado desempeñar un papel significativo en la mejora de la predictibilidad, como ya se ha señalado previamente por otros autores (LI et al., 2015; LÓPEZ-SÁNCHEZ et al., 2003; TEMESGEN & V. GADOW, 2004). Respecto al origen de la masa, nuestros resultados indican que, para un diámetro dado, los árboles de origen procedentes de repoblación tienden a alcanzar mayores alturas que lo que se encuentran en masas naturales, lo que coincide con los objetivos de manejo de tales rodales donde se priorizan los árboles más altos para maximizar los rendimientos maderables. Por otro lado, la mayor variabilidad en el tamaño, la distribución espacial y las clases de edad en los rodales naturales fomenta estrategias de crecimiento diversas, donde el crecimiento en altura no es necesariamente una prioridad para el árbol. En cuanto a la composición específica, los resultados muestran que los rodales puros exhiben mayores alturas para un diámetro dado que los rodales mixtos, concordando con los factores previamente mencionados de variabilidad y origen del rodal, pues los rodales mixtos introducen una capa adicional de complejidad debido a la presencia de múltiples especies. La región biogeográfica también resultó ser clave para representar la variabilidad de la masa, mostrando las diferencias más pronunciadas en la región Atlántica, la cual se caracteriza por una mayor precipitación anual y una mayor productividad respecto a la región Mediterránea. Por el contrario, la región Alpina exhibió alturas más bajas para un mismo diámetro, probablemente impulsadas por vientos más fuertes y temperaturas más frías. Se observó una tendencia similar en la región Mediterránea, donde el estrés del arbolado puede estar relacionado con la sequía estival que limita el crecimiento de los árboles (DIEGO GALVÁN et al., 2015).

Por último, la metodología empleada en este estudio se presenta como una alternativa para modelizar otras dinámicas forestales y procesos estáticos,



permitiendo cubrir amplias zonas de estudio, especies y características forestales, creando modelos de referencia para cubrir una amplia variedad de casos de estudio y que demanden un menor esfuerzo para ser empleados. Además, la promoción de su uso mediante el desarrollo herramientas sencillas que faciliten su usabilidad (ver Anejo 2) o su implementación en plataformas de simulación como SIMANFOR (BRAVO et al., 2025b, 2025a) puede contribuir a una adopción más sencilla por parte de los usuarios finales.

6. Conclusiones

Los modelos mixtos no lineales han demostrado ser un aliado poderoso para abordar situaciones con desequilibrios en los datos en el campo de la modelización forestal. En este estudio, esta técnica se aplicó al Inventario Forestal Nacional de España para desarrollar modelos altura-diámetro para las especies forestales más comunes de España, con el objetivo inicial de crear un único modelo capaz de representar diversas características del rodal. Para ello, el modelo incorporó información cualitativa del rodal, incluyendo su origen, la composición específica y la región biogeográfica, siendo parametrizado para un total de 91 especies forestales en toda España.

Pese a que modelos calibrados localmente pueden conseguir mejores predicciones, este modelo sirve como herramienta base para aquellos casos donde no hay otras alternativas disponibles para predecir la altura de los árboles. Para mejorar su adopción por parte de los gestores forestales, este modelo se proporciona como herramienta lista para utilizar en varios formatos y es accesible a través de la plataforma de simulación forestal SIMANFOR.

Agradecimientos

Este trabajo ha sido financiado por ORDEN EDU/842/2022 y por el proyecto "IMFLEX Proyecto PID2021-126275OB-C21 de investigación financiado por MCIN/AEI /10.13039/501100011033/ y por FEDER, Una manera de hacer Europa."

7. Bibliografía

- ADAME, P.; CAÑELLAS, I.; RÍO, M.; 2008. A mixed nonlinear height-diameter model for Pyrenean oak (*Quercus pyrenaica* Willd.). *Forest Ecology and Management*, 256, 88-98. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2008.04.006>
- AKAIKE, H.; 1974. A new look at the statistical model identification. *IEEE transactions on automatic control*, 19(6), 716-723.
- ALBERDI, I.; CAÑELLAS, I.; BOMBÍN, R. V.; 2017. The Spanish National Forest Inventory: history, development, challenges and perspectives. *Pesquisa Florestal Brasileira*, 37(91), Article 91. <https://doi.org/10.4336/2017.pfb.37.91.1337>
- BRAVO, F.; 2022. Bravo, F. (coord) 2022. Adaptación al cambio climático: directrices para la adaptación de la gestión del patrimonio natural y la política forestal al cambio climático en Castilla y León. Ed. Universidad de Valladolid, 507 pp.
- BRAVO, F.; ÁLVAREZ-GONZÁLEZ, J. G.; DEL RÍO, M.; BARRIO-ANTA, M.; BONET, J. A.; BRAVO-OVIEDO, A.; CALAMA, R.; CASTEDO-DORADO, F.; CRECENTE-CAMPO, F.; CONDÉS, S.; DIÉGUEZ-ARANDA, U.; GONZÁLEZ-MARTÍNEZ, S. C.; LIZARRALDE, I.; NANOS, N.; MADRIGAL, A.; MARTÍNEZ-MILLÁN, J.; MONTERO, G.; ORDÓÑEZ, C.; PALAHÍ, M.; ... VÁZQUEZ-PIQUÉ, J.; 2012. Growth and yield models in Spain:



- historical overview, contemporary examples and perspectives. Instituto Universitario de Investigación en Gestión Forestal sostenible (Universidad de Valladolid-INIA) y Unidad de Gestión Forestal sostenible (Universidad de Santiago de Compostela).
http://sostenible.palencia.uva.es/document/gfs/publicaciones/libros/2011_Growthyield_spain.pdf
- BRAVO, F.; ORDÓÑEZ, C.; VÁZQUEZ-VELOSO, A.; MICHALAKOPOULOS, S.; 2025a. SIMANFOR cloud Decision Support System: Structure, content, and applications. *Ecological Modelling*, 499, 110912. <https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2024.110912>
- BRAVO, F.; ORDÓÑEZ, C.; VÁZQUEZ-VELOSO, A.; MICHALAKOPOULOS, S.; 2025b. SIMANFOR: herramienta renovada para la toma de decisiones forestales en el siglo XXI [oral communication]. *9o Congreso Forestal Español. Gijón, España*. 9o Congreso Forestal Español. Gijón, España.
- BRAVO, F.; VÁZQUEZ-VELOSO, A.; 2024. Mixed forest model parameterization and integration into simulation platforms as a tool for decision-making processes [poster]. Scientific symposium: Promoting diversity in plant-based ecosystems as a tool for Ecosystem Services provision, Palencia, Spain.
<http://dx.doi.org/10.13140/RG.2.2.27865.94564>
- CALAMA, R.; MONTERO, G.; 2004. Interregional nonlinear height-diameter model with random coefficients for stone pine in Spain. *Canadian Journal of Forest Research*, 34, 150-163. <https://doi.org/10.1139/x03-199>
- CANTERO AMIANO, A.; 2013. Variación de la relación altura - diámetro a lo largo del tiempo en un macizo forestal. *Actas 6º Congreso Forestal Español. Sociedad Española de Ciencias Forestales, Vitoria-Gasteiz*.
https://secforestales.org/publicaciones/index.php/congresos_forestales/article/view/14800/14643
- CASTEDO-DORADO, F.; BARRIO ANTA, M.; DIÉGUEZ-ARANDA, U.; GADOW, K. v.; SÁNCHEZ RODRÍGUEZ, M.; 2006. A generalized height-diameter model including random components for radiata pine plantations in northwestern Spain. *Forest Ecology and Management*, 229, 202-213.
<http://dx.doi.org/10.1016/j.foreco.2006.04.028>
- CRECENTE-CAMPO, F.; DIÉGUEZ-ARANDA, U.; SOARES, P.; TOMÉ, M.; 2010. A generalized nonlinear mixed-effects height-diameter model for *Eucalyptus globulus* L. in northwestern Spain. *Forest Ecology and Management*, 259, 943-952. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2009.11.036>
- DE CÁCERES, M.; MOLOWNY-HORAS, R.; CABON, A.; MARTÍNEZ-VILALTA, J.; MENCUCCINI, M.; GARCÍA-VALDÉS, R.; NADAL-SALA, D.; SABATÉ, S.; MARTIN-STPAUL, N.; MORIN, X.; OTHERS.; 2022. MEDFATE 2.8. 1: A trait-enabled model to simulate Mediterranean forest function and dynamics at regional scales. *Geoscientific Model Development Discussions*, 2022, 1-52.
- DIEGO GALVÁN, J.; BÜNTGEN, U.; GINZLER, C.; GRUDD, H.; GUTIÉRREZ, E.; LABUHN, I.; JULIO CAMARERO, J.; 2015. Drought-induced weakening of growth-temperature associations in high-elevation Iberian pines. *Global and Planetary Change*, 124, 95-106. <https://doi.org/10.1016/j.gloplacha.2014.11.011>
- DIÉGUEZ-ARANDA, U.; ÁLVAREZ GONZÁLEZ, J. G.; BALBOA-MURIAS, M. A.; BARRIO-ANTA, M.; CASTEDO-DORADO, F.; CRECENTE-CAMPO, F.; GONZÁLEZ GONZÁLEZ, J. M.; GORGOSO VARELA, J. J.; LÓPEZ-SÁNCHEZ, C. A.; PÉREZ-CRUZADO, C.; RODRÍGUEZ SOALLEIRO, R.; ROJO ALBORECA, A.; SÁNCHEZ RODRÍGUEZ, F.; 2009. Herramientas selvícolas para la gestión forestal sostenible en Galicia. Consellería do Medio Rural, Xunta de Galicia.
- DIÉGUEZ-ARANDA, U.; BARRIO ANTA, M.; CASTEDO DORADO, F.; 2005. Relación



- altura-diámetro generalizada para masas de *Pinus sylvestris* L. procedentes de repoblación en el noroeste de España. *Investigación Agraria: Sistemas y Recursos Forestales*, 14, 229-241.
- EL MAMOUN, H. O.; EL ZEIN, A. I.; EL MUGIRA, M. I.; 2013. Modelling height-diameter relationships of selected economically important natural forests species. *Journal of forest products & industries*, 2, 34-42.
- ELZHOV, T. V.; MULLEN, K. M.; SPIESS, A.-N.; BOLKER, B.; 2023. minpack.lm: R Interface to the Levenberg-Marquardt Nonlinear Least-Squares Algorithm Found in MINPACK, Plus Support for Bounds (Versión 1.2-4) [Software]. <https://cran.r-project.org/web/packages/minpack.lm/index.html>
- GÓMEZ-GARCÍA, E.; 2013. Relación altura-diámetro generalizada para rodales regulares de *Quercus robur* L. en Galicia. *Actas del 6o Congreso Forestal Español, Vitoria-Gasteiz*. <https://www.congresoforestal.es/fichero.php?t=41725&i=4868&m=2185>
- LEBEDEV, A.; KUZMICHEV, V.; 2020. Verification of two-and three-parameter simple height-diameter models for birch in the European part of Russia. <https://jfs.agriculturejournals.cz/pdfs/jfs/2020/09/04.pdf>
- LEBEDEV, A. V.; 2020. New generalised height-diameter models for the birch stands in European Russia. *Baltic Forestry*, 26(2), 1-7.
- LI, Y.; DENG, X.; HUANG, Z.; XIANG, W.; YAN, W.; LEI, P.; ZHOU, X.; PENG, C.; 2015. Development and Evaluation of Models for the Relationship between Tree Height and Diameter at Breast Height for Chinese-Fir Plantations in Subtropical China. *PLOS ONE*, 10(4), e0125118. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0125118>
- LÓPEZ-SÁNCHEZ, C. A.; ÁLVAREZ GONZÁLEZ, J. G.; CASTEDO, F.; GORGOSO, J. J.; RODRÍGUEZ, R.; ROJO, A.; SÁNCHEZ, F.; 2003. A height-diameter model for *Pinus radiata* D. Don in Galicia (Northwest Spain). *Annals of Forest Science*, 60, 237-245. <https://doi.org/10.1051/forest:2003015>
- MITECO.; 2024. *Regiones Biogeográficas. Estatal*. Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico. <https://www.miteco.gob.es/es/cartografia-y-sig/ide/descargas/biodiversidad/regiones-biogeograficas.html>
- MOORE, J. A.; ZHANG, L.; STUCK, D.; 1996. Height-diameter equations for ten tree species in the Inland Northwest. *Western Journal of Applied Forestry*, 11(4), 132-137.
- PINHEIRO, J.; BATES, D.; DEBROY, S.; SARKAR, D.; HEISTERKAMP, S.; VAN WILLIGEN, B.; MAINTAINER, R.; 2017. Package 'nlme'. *Linear and nonlinear mixed effects models, version*, 3(1), 274.
- QFORESTRY.; 2024. SIMFOR. <https://qforestry.com/apps/SIMFOR/>
- R CORE TEAM.; 2021. R: A Language and Environment for Statistical Computing. R Foundation for Statistical Computing. <https://www.R-project.org/>
- RODRÍGUEZ DE PRADO, D.; RIOFRÍO, J.; ALDEA, J.; MCDERMOTT, J.; BRAVO, F.; HERRERO DE AZA, C.; 2022. Species Mixing Proportion and Aridity Influence in the Height-Diameter Relationship for Different Species Mixtures in Mediterranean Forests. *Forests*, 13(1), 119. <https://doi.org/10.3390/f13010119>
- SÁNCHEZ-GONZÁLEZ, M.; CAÑELLAS, I.; MONTERO, G.; 2007. Generalized height-diameter and crown diameter prediction models for cork oak forests in Spain. *Forest Systems*, 16(1), Article 1. <https://doi.org/10.5424/srf/2007161-00999>
- SCARANELLO, M. A. da S.; ALVES, L. F.; VIEIRA, S. A.; CAMARGO, P. B. de; JOLY, C. A.; MARTINELLI, L. A.; 2012. Height-diameter relationships of tropical Atlantic moist forest trees in southeastern Brazil. *Scientia Agricola*, 69, 26-37. <https://doi.org/10.1590/S0103-90162012000100005>



- SERRADA, R.; MONTERO, G.; REQUE, J. A.; 2008. Compendio de silvicultura aplicada en España. *Instituto Nacional de Investigación y Tecnología Agraria y Alimentaria, Madrid (España) Ministerio de Educación y Ciencia, Madrid (España)*.
- TEMESGEN, H.; HANN, D. W.; MONLEON, V. J.; 2007. Regional Height–Diameter Equations for Major Tree Species of Southwest Oregon. *Western Journal of Applied Forestry*, 22(3), 213-219. <https://doi.org/10.1093/wjaf/22.3.213>
- TEMESGEN, H.; V. GADOW, K.; 2004. Generalized height–diameter models—an application for major tree species in complex stands of interior British Columbia. *European Journal of Forest Research*, 123(1), 45-51. <https://doi.org/10.1007/s10342-004-0020-z>
- TRASOBARES, A.; MOLA-YUDEGO, B.; AQUILUÉ, N.; RAMÓN GONZÁLEZ-OLABARRIA, J.; GARCIA-GONZALO, J.; GARCÍA-VALDÉS, R.; DE CÁCERES, M.; 2022. Nationwide climate-sensitive models for stand dynamics and forest scenario simulation. *Forest Ecology and Management*, 505, 119909. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2021.119909>
- VÁZQUEZ-VELOSO, A.; PANDO, V.; ORDÓÑEZ, C.; BRAVO, F.; 2023. Evaluation and validation of forest models: Insight from Mediterranean and Scots pine models in Spain. *Ecological Informatics*, 77, 102246. <https://doi.org/10.1016/j.ecoinf.2023.102246>
- VÁZQUEZ-VELOSO, A.; YANG, S. I.; BULLOCK, B. P.; BRAVO, F.; 2025. One model to rule them all: new height-diameter equations for Spanish forest species. *Manuscript in preparation*.
- WAGLE, S.; YANG, S.; BULLOCK, B. P.; 2024. Characterizing height-diameter relationships in the PMRC Culture x Density trials using a mixed-effects modeling approach for loblolly pine. 2024 PMRC Annual Advisory Committee Meeting July 17-18, 2024, Athens, GA.
- YANG, S.-I.; BURKHART, H. E.; 2020. Evaluation of total tree height subsampling strategies for estimating volume in loblolly pine plantations. *Forest Ecology and Management*, 461, 117878. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2020.117878>

Anejo 1: expresión del modelo final y parámetros

En este apéndice se resumen los parámetros finales obtenidos para cada especie y rodal estudio, clasificados por origen del rodal, mezcla de especies y región biogeográfica. También se ofrecen ejemplos de selección de estos parámetros para casos de estudio específicos.

Tabla 4. Parámetros específicos del modelo para cada especie estudiada. La primera línea (“todas las especies”) muestra los parámetros de referencia obtenidos del ajuste. Dos subespecies de Quercus ilex incluidas en los datos originales (Q. ilex subsp. ilex y Q. ilex subsp. ballota) fueron agrupados y se muestran como una única especie. Los parámetros mostrados en esta tabla se modifican utilizando los valores de las variables de masa, detallados en la tabla mostrada a continuación.

Nombre de la especie	a	b	Nombre de la especie	a	b
Todas las especies	1,4096	1,9796	Otros eucaliptos	2,4987	1,7726
Abies alba	1,1366	2,1740	Persea indica	1,4195	2,1216
Abies pinsapo	0,7492	2,2473	Phillyrea latifolia	0,5520	2,5915
Acacia dealbata	2,1608	1,5970	Phoenix canariensis	0,2130	2,4763



Nombre de la especie	a	b	Nombre de la especie	a	b
<i>Acacia melanoxylon</i>	1,9355	1,7323	<i>Picea abies</i>	1,0362	2,2474
<i>Acacia spp,</i>	1,8026	1,8226	<i>Pinus canariensis</i>	0,5233	2,6123
<i>Acer campestre</i>	1,7616	1,6914	<i>Pinus halepensis</i>	0,7265	2,2035
<i>Acer monspessulanum</i>	1,1888	1,8690	<i>Pinus nigra</i>	0,6446	2,3866
<i>Acer opalus</i>	1,6435	1,7919	<i>Pinus pinaster</i>	0,4175	2,6739
<i>Acer pseudoplatanus</i>	1,8522	1,8021	<i>Pinus pinea</i>	0,4202	2,5149
<i>Alnus glutinosa</i>	2,6924	1,5144	<i>Pinus radiata</i>	0,7319	2,5026
<i>Arbutus unedo</i>	0,7651	2,1509	<i>Pinus sylvestris</i>	0,8367	2,2280
<i>Betula alba</i>	2,3561	1,6016	<i>Pinus uncinata</i>	0,9915	2,0068
<i>Betula pendula</i>	1,7063	1,7864	<i>Platanus hispanica</i>	3,1925	1,5527
<i>Betula spp,</i>	1,7115	1,8044	<i>Populus alba</i>	1,2932	2,0692
<i>Castanea sativa</i>	2,7979	1,3714	<i>Populus nigra</i>	2,8203	1,5904
<i>Cedrus atlantica</i>	0,7911	2,5338	<i>Populus tremula</i>	1,8455	1,8542
<i>Cedrus libani</i>	0,5738	2,8225	<i>Populus x canadensis</i>	1,8645	2,0016
<i>Celtis australis</i>	1,1838	1,7945	<i>Prunus avium</i>	1,8394	1,7406
<i>Chamaecyparis lawsoniana</i>	0,6169	2,4285	<i>Prunus spp,</i>	1,5915	1,8239
<i>Corylus avellana</i>	1,4310	1,8888	<i>Pseudotsuga menziesii</i>	1,1679	2,2269
<i>Crataegus monogyna</i>	1,6069	1,5428	<i>Quercus canariensis</i>	2,8176	1,2163
<i>Cupressus arizonica</i>	0,5528	2,3303	<i>Quercus faginea</i>	0,8145	2,1413
<i>Cupressus sempervirens</i>	0,4883	2,5918	<i>Quercus ilex ssp, ballota</i>	0,7619	2,1685
<i>Eucalyptus camaldulensis</i>	0,8677	2,4037	<i>Quercus petraea</i>	1,5636	1,8103
<i>Eucalyptus globulus</i>	1,8654	2,0775	<i>Quercus pubescens</i>	1,0817	2,0460
<i>Eucalyptus gomphocephalus</i>	1,8514	2,0575	<i>Quercus pyrenaica</i>	1,2960	1,8879
<i>Eucalyptus nitens</i>	1,1353	2,3594	<i>Quercus robur</i>	1,6668	1,7846
<i>Eucalyptus robusta</i>	0,5793	2,7154	<i>Quercus rubra</i>	0,4224	2,8062
<i>Eucalyptus viminalis</i>	1,6765	2,1241	<i>Quercus suber</i>	0,8569	1,9365
<i>Fagus sylvatica</i>	2,0574	1,7410	<i>Robinia pseudoacacia</i>	1,9458	1,8848
<i>Fraxinus angustifolia</i>	1,9123	1,6951	<i>Salix alba</i>	1,9885	1,7010
<i>Fraxinus excelsior</i>	2,2735	1,6765	<i>Salix atrocinerea</i>	1,6780	1,7496
<i>Ilex aquifolium</i>	1,1730	1,7063	<i>Salix caprea</i>	1,9986	1,5904
<i>Ilex canariensis</i>	1,4151	2,0474	<i>Salix fragilis</i>	1,1765	1,9707
<i>Juglans regia</i>	1,0477	2,0664	<i>Salix spp,</i>	1,5529	1,8850
<i>Juniperus communis</i>	0,6801	1,8963	<i>Sorbus aria</i>	1,6284	1,6628
<i>Juniperus oxycedrus</i>	0,6498	1,9532	<i>Sorbus aucuparia</i>	1,9941	1,5821
<i>Juniperus phoenicea</i>	0,4187	2,3312	<i>Sorbus spp,</i>	1,6791	1,6506
<i>Juniperus thurifera</i>	0,7496	1,8276	<i>Sorbus torminalis</i>	1,1096	2,1401
<i>Larix decidua</i>	1,2949	2,1902	<i>Taxus baccata</i>	2,0992	1,0524
<i>Larix spp,</i>	1,2865	2,1948	<i>Tilia cordata</i>	2,0286	1,6194
<i>Laurus azorica</i>	1,4435	2,1390	<i>Tilia platyphyllos</i>	2,1670	1,5628
<i>Laurus nobilis</i>	1,6164	1,7968	<i>Tilia spp,</i>	1,7229	1,7623

Nombre de la especie	a	b	Nombre de la especie	a	b
<i>Myrica faya</i>	1,6666	1,8770	<i>Ulmus glabra</i>	1,9905	1,7464
<i>Olea europaea</i>	0,7253	2,0581	<i>Ulmus minor</i>	1,7178	1,7606

Tabla 5. Ajustes de los parámetros del modelo según los efectos fijos de las distintas variables de rodal. Los valores “por defecto” se refieren a los parámetros sin la modificación debida al efecto de la especie. Las modificaciones que toman valor 0 en cada variable son los valores por defecto. Composición específica (P=pura, M=mixta); Origen del rodal (N=natural, A=artificial); Región biogeográfica (Me=mediterránea, At=atlántica, Al=alpina, Ma=macaronésica).

	Por defecto	Composición específica		Origen del rodal		Región biogeográfica			
		P	M	N	A	Me	At	Al	Ma
a	1,4096	0	0,0180	0	-0,0120	0	0,2015	-0,0324	0,1838
b	1,9796	0	-0,0390	0	0,0382	0	-0,0691	0,0348	-0,1995

A continuación, se presentan cuatro casos de estudio para ilustrar cómo seleccionar los parámetros adecuados para estimar la altura de árboles en diferentes condiciones.

Caso 1: Estimación de la altura de un árbol de la especie *Pinus pinaster* en un rodal puro de regeneración natural en la región Mediterránea

Pasos para seleccionar los parámetros adecuados:

- Seleccionar los parámetros específicos de la especie:
para *Pinus pinaster*, $a = 0,4175$ y $b = 2,6739$
- Ajustes de parámetros para rodales puros: $a = 0$ y $b = 0$
- Ajustes de parámetros para rodales naturales: $a = 0$ y $b = 0$
- Ajustes de parámetros para la región Mediterránea: $a = 0$ y $b = 0$
- Construcción de la ecuación final utilizando los parámetros previamente seleccionados:

$$h = 1,3 + a \cdot (\log(1+d))^b$$

$$h = 1,3 + (0,4175 + 0 + 0 + 0) \cdot (\log(1+d))^{(2,6739 + 0 + 0 + 0)}$$

$$h = 1,3 + 0,4175 \cdot (\log(1+d))^{2,6739}$$

Caso 2: Estimación de la altura de un árbol de la especie *Quercus robur* en un rodal mixto de regeneración natural en la región Atlántica

Pasos para seleccionar los parámetros adecuados:

- Seleccionar los parámetros específicos de la especie:
para *Quercus robur*, $a = 1,6668$ y $b = 1,7846$
- Ajustes de parámetros para rodales mixtos: $a = 0,0180$ y $b = -0,0390$
- Ajustes de parámetros para rodales naturales: $a = 0$ y $b = 0$
- Ajustes de parámetros para la región Atlántica: $a = 0,2016$ y $b = -0,0691$
- Construcción de la ecuación final utilizando los parámetros previamente seleccionados:

$$h = 1,3 + a \cdot (\log(1+d))^b$$

$$h = 1,3 + (1,6668 + 0,0180 + 0 + 0,2016) \cdot (\log(1+d))^{(2,6739 - 0,0390 + 0 - 0,0691)}$$

$$h = 1,3 + 1,8863 \cdot (\log(1+d))^{1,6765}$$

Caso 3: Estimación de la altura de un árbol de la especie *Pinus sylvestris* en un rodal mixto de plantación en la región Alpina

Pasos para seleccionar los parámetros adecuados:

- Seleccionar los parámetros específicos de la especie:



para *Pinus sylvestris*, $a = 0,8367$ y $b = 2,2280$

b. Ajustes de parámetros para rodales mixtos: $a = 0,0180$ y $b = -0,0390$

c. Ajustes de parámetros para rodales de plantación: $a = -0,0120$ y $b = 0,0382$

d. Ajustes de parámetros para la región Alpina: $a = -0,0324$ y $b = 0,0348$

e. Construcción de la ecuación final utilizando los parámetros previamente seleccionados:

$$h = 1,3 + a \cdot (\log(1+d))^b$$

$$h = 1,3 + (0,8367 + 0,0180 - 0,0120 - 0,0324) \cdot (\log(1+d))^{(2,2280 - 0,0390 + 0,0382 + 0,0348)}$$

$$h = 1,3 + 0,8103 \cdot (\log(1+d))^{2,2620}$$

Caso 4: Estimación de la altura de una especie no listada en un rodal puro de regeneración natural en la región Macaronésica

Pasos para seleccionar los parámetros adecuados:

a. Seleccionar los parámetros específicos de la especie:

valores de referencia obtenidos de todas las especies, $a = 1,4096$ y $b = 1,9796$

b. Ajustes de parámetros para rodales puros: $a = 0$ y $b = 0$

c. Ajustes de parámetros para rodales naturales: $a = 0$ y $b = 0$

d. Ajustes de parámetros para la región Macaronésica: $a = 0,1838$ y $b = -0,1995$

e. Construcción de la ecuación final utilizando los parámetros previamente seleccionados:

$$h = 1,3 + a \cdot (\log(1+d))^b$$

$$h = 1,3 + (1,4096 + 0 + 0 + 0,1838) \cdot (\log(1+d))^{(1,9796 + 0 + 0 - 0,1995)}$$

$$h = 1,3 + 1,5934 \cdot (\log(1+d))^{1,7801}$$

Anejo 2: herramientas desarrolladas para el uso del modelo

Con el objetivo de facilitar el uso del modelo desarrollado con las distintas parametrizaciones que toma por especie y características de la masa, se han desarrollado distintas herramientas a las que se puede acceder en este repositorio o en el siguiente enlace:

https://github.com/aitorvv/height-diameter_models_Spain/tree/main/tools

- **EXCEL autorrellenable**, disponible tanto en español como en inglés, donde introduciendo el valor de diámetro normal (cm) y seleccionando la especie y características de la masa se estima la altura total del árbol (m). Puedes encontrarlo en el siguiente enlace:

https://github.com/aitorvv/height-diameter_models_Spain/blob/main/tools/calculadora_de_alturas_para_Espana-espanol.xlsx

- **Código R y Python** con las funciones previamente programadas para poder utilizar el modelo, haciendo una selección automática de los parámetros necesarios para estimar la altura total del árbol. Ambos incluyen un archivo de código adicional donde se muestra un ejemplo de uso. Puedes encontrarlos en el siguiente enlace, deberás descargar los dos archivos y la carpeta de datos:

https://github.com/aitorvv/height-diameter_models_Spain/tree/main/tools

- Implementación del modelo en la plataforma **SIMANFOR** para ser utilizado bien de manera independiente o bien integrado en los modelos disponibles de cada una de las especies. Puedes encontrarlo en el siguiente enlace:

<https://www.simanfor.es/>



Anejo 3: acceso a datos y código

El código y los datos utilizados para desarrollar este trabajo pueden consultarse en

https://github.com/aitorvv/height-diameter_models_Spain