



**2025** | **16-20**  
**GIJÓN** | **JUNIO**

**9º CONGRESO FORESTAL ESPAÑOL**

**9CFE-1633**

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

Organiza





## Un simulador estocástico con base climática para predecir la clase resistente de madera estructural a partir de árboles en pie

MANSO GONZÁLEZ, R. (1), HEVIA CABAL, A. (2, 3), SÁNCHEZ SALGUERO, R. (3), ASH, A. (1)

(1) Forest Research, the research agency of the Forestry Commission (UK)

(2) Universidad de Sevilla

(3) Laboratorio DendrOlavide, Universidad Pablo de Olavide de Sevilla

### Resumen

El incremento en la demanda de madera de uso estructural a nivel europeo supone un reto de planificación tanto selvícola como industrial. Este reto es aún mayor en el contexto del cambio climático que, además de sus efectos en la supervivencia, salud y crecimiento de los árboles, puede afectar a las propiedades de la madera, con el consecuente impacto en la clase resistente de la madera estructural. Para responder a estos desafíos, presentamos un simulador estocástico sensible al clima, desarrollado inicialmente para Gran Bretaña, que permite predecir la clase resistente a partir de árboles en pie. Consta de un módulo dinámico (incremento diametral) y dos módulos estáticos (propiedades de la madera y clase resistente). El resultado de cada simulación es una población de piezas de madera para las que se predice su módulo de elasticidad (MOE), que determina la clase resistente, al ser normalmente esta la propiedad limitante en Gran Bretaña. El modo estocástico del simulador permite además estimar la probabilidad de que las piezas pertenezcan a cada clase resistente. Se muestran aquí los resultados del caso de estudio de *Picea sitchensis* en Gran Bretaña y se discute su próxima aplicación en montes productivos de coníferas en la Península Ibérica.

### Palabras clave

Propiedades de la madera, resiliencia, simulaciones, escenarios climáticos

### 1. Introducción

La demanda de madera de uso estructural se ha venido incrementado notablemente en los últimos años en Europa (YIAPANIS et al. 2024) y, como consecuencia de las políticas de mitigación del cambio climático, que incluyen la sustitución de materiales de construcción de altas emisiones, se prevé que esta tendencia se mantenga en el futuro (FAO, 2021). En el Reino Unido, por ejemplo, se está implementado la *Timber in construction roadmap* (DEFRA, 2024), que apunta exactamente en esa dirección.

Para responder a esa demanda, no sólo se reconoce la necesidad de incrementar la superficie de plantaciones comerciales y de gestionar los montes productores existentes, sino también determinar y, en la medida de lo posible, aumentar la calidad del recurso maderero de uso estructural (MCEWAN et al., 2020). La calidad importa desde el punto de vista de la optimización del recurso, puesto que se necesita menos producto para un mismo uso estructural cuando las propiedades físicas y mecánicas de la madera son mejores.

En el Reino Unido, se tomó plena conciencia de estos retos según el grueso del esfuerzo repoblador de uso comercial del siglo XX, principalmente con píceas de Sitka (*Picea sitchensis*), se acercaba al turno (35-45 años) (MOORE, 2011). Con vistas a entender las características de estos recursos, la agencia de investigación del servicio forestal británico (*Forest Research*) creó en la década de los 90 un equipo



dedicado exclusivamente a esta materia. El objetivo entonces era estudiar los rangos de las propiedades que determinan el grado estructural de la madera de las especies comerciales más relevantes, así como los factores ambientales, climáticos y selvícolas que las afectan. El foco se puso en la píce de Sitka, que supone actualmente un 60% de la producción anual de Gran Bretaña (circa 5 millones de m<sup>3</sup> apeados al año) (FOREST RESEARCH, 2024). Con el tiempo, el trabajo se fue centrando en el material genéticamente mejorado de la especie, que se planta masivamente desde el comienzo de este siglo y que irá entrando en turno en la próxima década.

Este esfuerzo de toda una generación de científicos ha dado como fruto bases de datos invaluable y un sinfín de modelos exploratorios y contribuciones científicas, de las que se citan las más destacadas más adelante. La ambición de usar más madera estructural hace, sin embargo, necesaria una planificación selvícola e industrial integral que evalúe la cadena de valor. Para su implementación, sería esencial la creación de una herramienta predictiva que permita estimar el grado estructural de la madera que se procesará en el futuro, según diferentes alternativas de gestión y bajo diferentes escenarios de cambio climático. El principal objetivo del presente trabajo es introducir una primera versión de esta herramienta, un simulador que reúne, pone en contexto y explota el conocimiento acumulado sobre la madera de la píce de Sitka en Gran Bretaña en las últimas tres décadas.

La clasificación de lotes de madera estructural se realiza actualmente en aserradero mediante la asignación de una clase resistente a los mismos según los estándares correspondientes. Estas se denominan, de menor a mayor calidad, C14, C16, C18, etc. La determinación de la clase resistente implica medir o estimar, para cada pieza del lote, las propiedades que definen el grado estructural: densidad, módulo de elasticidad (MOE) y módulo de ruptura (MOR), obteniéndose así una distribución empírica para las tres. A continuación, de la distribución de MOE se calcula su media, mientras que de las distribuciones de densidad y MOR se calcula el 5º percentil. Este trío de valores se denomina “valores característicos”. Cada uno de estos valores característicos se compara entonces de forma independiente con los umbrales que definen las clases resistentes, asignándose al lote de madera aquella que resulte más desfavorable. Ver RIDLEY-ELLIS et al. (2016) para una descripción más detallada.

Nuestro simulador persigue emular este proceso por primera vez a partir de árboles en pie. Mediante los diferentes modelos integrados en el mismo, el simulador (i) predice el incremento anual en diámetro de un grupo de árboles hasta la edad de corta deseada, (ii) predice las propiedades que determinan el grado estructural a nivel del anillo para cada árbol (sólo MOE en esta versión), (iii) extrae una población de piezas de madera (lote), establece la distribución empírica de las tres propiedades y calcula sus valores característicos, y (iv) determina la clase resistente. Como consecuencia de la propagación de errores en las simulaciones, una salida determinista (i.e. única) resultaría en una información incompleta. Para solventar esto, el simulador puede realizar estas tareas en modo estocástico, lo que permite predecir la probabilidad de que se le asigne al lote cada una de las clases resistentes.

En esta contribución se introducen los datos históricos usados para ajustar los modelos necesarios, se presentan dichos modelos, se detalla el funcionamiento del simulador y se describe un caso de estudio para testar la herramienta. Se discuten

posteriormente los resultados de este ejercicio de prueba, las limitaciones del simulador, las perspectivas de mejora y, finalmente, su posible aplicación a los montes productivos españoles.

## 2. Objetivos

Los objetivos de este trabajo son (i) introducir un simulador estocástico sensible al clima para predecir la clase resistente de la madera a partir de árboles en pie y (ii) presentar el caso de estudio de píceas de Sitka en Gran Bretaña para testar dicho simulador.

## 3. Metodología

### Bases de datos y sitios experimentales

Los diferentes modelos empíricos que interactúan en el simulador se ajustaron usando datos obtenidos en el pasado a partir de (i) cinco ensayos de progenies de la píceas de Sitka (primer ciclo de mejora), que incluyen un control (i.e. sin mejora genética; procedencia Haida Gwaii/QCI) – Brecon, Kintyre, Radnor, Spadeadam y Kershope –, (ii) un ensayo de crecimiento – Birkley – y (iii) una red parcelas de calidad de la madera de la especie (sin mejora genética) en montes comerciales – red “Benchmarking” (BM) –. Todos los experimentos están gestionados por *Forest Research*. La gestión de los ensayos de progenies y de las parcelas de la red BM son idénticos entre sí y comparables a la gestión comercial de estas masas. Las características geográficas y climáticas de cada ensayo de progenies y crecimiento más un resumen de los rangos cubiertos por la red parcelas experimentales BM se pueden encontrar en la Tabla 1. Las localizaciones se muestran en contexto en el mapa de la Figura 1.

*Tabla 1. Coordinadas y medias climáticas anuales de cada sitio. AT5 es la temperatura acumulada por encima de 5°C, MD es el déficit de humedad (evapotranspiración máxima - precipitación) y DAMS es un índice de exposición al viento (Detailed Aspect Method Scoring)*

Sitio	Tipo	Lat	Long	Alt (m)	AT5 (°C)	MD (mm)	DAMS
Brecon	Progenies	51°53' N	3°20' O	375	1141	70	14
Kintyre	Progenies	55°22' N	5°38' O	60	1477	114	14
Radnor	Progenies	52°07' N	3°08' O	360	1329	99	11
Spadead.	Progenies	55°03' N	2°30' O	251	1176	107	16
Kershope	Progenies	55°05' N	2°50' O	190	1277	115	16
Birkley	Crecimiento	55°13' N	2°21' O	230	1213	112	13
BM	Calidad de la madera	50°37' N - 58°17' N	0°38' O - 5°36' O	73-558	743-1740	10.3-150.6	8-21

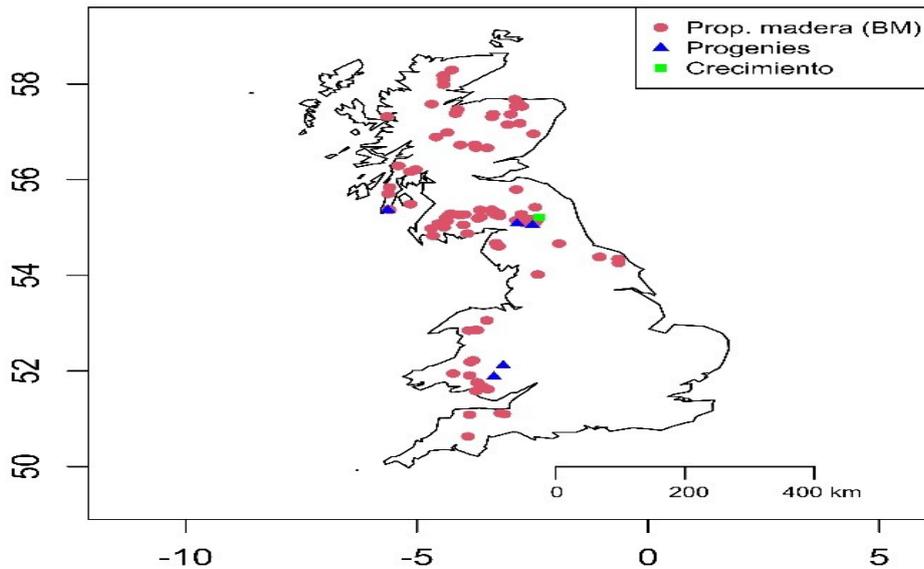


Figura 1. Localización de los ensayos usados en las diferentes fases del presente trabajo

A continuación, se resume el tipo de datos, su relación con cada uno de estos experimentos y los trabajos donde se puede encontrar más información al respecto

- Incremento radial: medidos a partir de tablillas extraídas de discos a 1,30 m (Radnor, 308 árboles; Spadeadam, 291 árboles; Brecon, 683 árboles; Kintyre, 667 árboles). Ver MACDONALD (2019) y MANSO et al. (2022).
- Módulo de elasticidad radial (MOE): obtenidos mediante tests de esfuerzo en probetas extraídas de discos a 1,30 m (Kershope, 35 árboles; Brecon, 645 árboles; Kintyre, 648 árboles; Birkley, 29 árboles). Ver MCLEAN (2008) y MOORE et al. (2012). Los datos de Brecon y Kintyre se presentan por primera vez en esta contribución.
- Módulo de elasticidad dinámico de madera en pie ( $MOE_{dyn}$ ): medido en la red de parcelas BM en un total de 1005 árboles mediante técnicas acústicas. Ver MOORE et al. (2009) y VIHERRA (2010).
- Módulo de elasticidad de madera estructural: obtenido mediante tests de esfuerzo en 636 piezas de madera estructural extraídas de 12 parcelas de la red BM en un total de 120 árboles. Ver MOORE et al. (2013).

### Modelos utilizados

**Modelo de incremento en diámetro.** Este modelo de árbol individual está basado en MANSO et al. (2022), donde se utilizaron los datos de Brecon y Kintyre. La adaptación que aquí se presenta radica principalmente en la extensión de la base de datos utilizada para el ajuste, que ahora incluye Radnor y Spadeadam. Asimismo, se optó por truncar las edades de manera que la edad mínima sea 10 años. Esto evita tener que trabajar con trayectorias de crecimiento inicial a menudo erráticas, de gran complejidad desde el punto de vista de la modelización y que pueden tener un gran impacto en la parametrización del modelo. El modelo es sensible al clima, a la silvicultura y no depende de la edad.

Si se definen los subíndices  $i$ ,  $j$ ,  $k$  y  $l$  para el árbol, el sitio, el intervalo de crecimiento (i.e. año) y la familia genética, respectivamente, el modelo se puede expresar como:

$$\log(\Delta DBH_{ijkl} + 1) = \beta_{0,br} Br_j + \beta_{0,ki} Ki_j + \beta_{0,ra} Ra_j + \beta_{0,sp} Sp_j + \beta_1 DBH_{ijk} + \beta_2 dg_{jk} + \beta_3 T_{med_{jk}} + \beta_4 T_{med_{jk}}^2 + \beta_5 T_{minPr_{jk}} + \beta_6 S_{ij} + (\beta_7 + u_i) S_{ij-1} + \epsilon_{ijkl}$$

(1)

Donde  $Br$ ,  $Ki$ ,  $Ra$  y  $Sp$  son variables booleanas que adoptan el valor 1 cuando el sitio es Brecon, Kintyre, Radnor y Spadeadam, respectivamente, y 0 en caso contrario;  $DBH$  es el diámetro a 1,30 m;  $dg$  es el diámetro cuadrático medio de los pies de un sitio concreto,  $T_{med}$  es la temperatura media del intervalo,  $T_{minPr}$  es la temperatura mínima de primavera en el intervalo y  $S$  es un índice de sequía básico para el intervalo que se construye como el producto del balance hídrico mínimo y el número de meses de balance hídrico negativo.  $\beta$  es el vector de los parámetros a estimar,  $u$  es un efecto aleatorio a nivel de familia genética tal que  $u \sim N(0, \sigma_{u,d}^2)$ , con  $\sigma_{u,d}^2$  la varianza del efecto aleatorio y  $\epsilon$  es el error residual. El vector de errores  $\epsilon$  se distribuye tal que  $\epsilon \sim N(0, \mathbf{R})$ , con  $\mathbf{R}$  una matriz de varianza-covarianza tal que  $\mathbf{R} = \sigma_{\epsilon,d}^2 \mathbf{C}$ , donde  $\mathbf{C}$  es una matriz de correlación en bloque (a nivel del árbol individual) y cada elemento se define como  $\phi \Delta t$ , siendo  $\phi$  un parámetro a estimar y  $\Delta t$  el intervalo de tiempo entre dos observaciones del mismo árbol.  $\sigma_{\epsilon,d}^2$  es la varianza residual.

Naturalmente, la elección de truncar las edades tiene la desventaja de que, para inicializar el simulador, es necesario aportar una lista de árboles de, al menos, esa edad en lugar de generarlos desde cero. Esto implica que los incrementos previos son desconocidos y que, consecuentemente, no se podría estimar el peso de dichos anillos a la hora de predecir el MOE medio de la sección (ver **Simulador: modo determinista** bajo estas líneas). Para solventar este problema e inferir  $DBH$  a edades inferiores a 10 años, usamos la siguiente aproximación estática para cada árbol:

$$DBH_{ijkl} | k < 10 = \beta'_o e^{\beta'_1 \text{anillo}_{ijkl}}$$

(2)

donde  $\beta'$  es un vector de parámetros específicos para cada árbol y predecibles si se asumen unas condiciones de contorno, i.e. dos edades dadas y su  $DBH$  asociado, lo que da lugar a un sistema de dos ecuaciones y dos incógnitas. Estas edades son (i) la edad inicial de cada árbol de la lista que se usa para inicializar el simulador, típicamente 10 años, y (ii) 3 años, que suele ser la primera edad visible a 1,30 m. El diámetro a 10 años es conocido por medio de la lista de árboles y el de 3 años se fija heurísticamente en 0.5 cm. Para cada árbol, se puede despejar entonces  $\beta'$ , calcular los diámetros y extraer de ellos los incrementos que faltaban.

**Modelo de MOE<sub>dyn</sub> (madera en pie).** Este modelo, aún sin publicar (MANSO et al., en prep) se ajustó a los datos de la red BM y permite predecir el MOE de la parte externa de árboles en pie. La respuesta depende del crecimiento medio del pie en cuestión y es sensible al clima medio del sitio. Usando los mismos subíndices que antes:

$$(MOE_{dyn,ij})^2 = \gamma_0 + \gamma_1 \overline{\Delta DBH}_{ij} + \gamma_2 AT5_j + \gamma_3 \overline{SPEI}_{.3_j} + u_{ij} + v_j + \epsilon_{ij}$$

(3)

donde es el incremento medio en diámetro,  $AT5$  es la temperatura media anual acumulada por encima de 5°C, es el *standardised precipitation evapotranspiration index* medio anual (ventana de tres meses) (VICENTE-SERRANO et al., 2010).  $\gamma$  es el vector de los parámetros a estimar,  $u$  y  $v$  son efectos aleatorios a nivel de árbol (nótese que existen medidas repetidas) y de la parcela, respectivamente, tal que  $u \sim$



$N(0, \sigma^2_{u,md})$  y  $v = N(0, \sigma^2_{v,md})$ , con  $\sigma^2_{u,md}$  y  $\sigma^2_{v,md}$  las varianzas de dichos efectos, que se asumen independientes.

**Modelo de MOE radial.** Este modelo, también sin publicar y desarrollado para esta comunicación, se usaron datos de probetas de madera (cuatro sitios). Mediante un método desarrollado en GIL-MORENO et al. (2024), se convirtió la información de las probetas en datos a nivel de anillo, sobre los que se ajustó el modelo. La respuesta depende únicamente del número del anillo. Si se interpreta ahora el subíndice  $k$  como el del anillo de crecimiento:

$$MOE_{ijk} = \frac{\theta_0 + u_j}{(1 + e^{\theta_1 / \text{anillo}_{ijk}})} + \theta_2 + v_{ij} + \epsilon_{ij}$$

(4)

donde *anillo* es el número de anillo desde la médula a 1,30 m (i.e. edad - 3).  $\theta$  es el vector de los parámetros a estimar,  $u$  y  $v$  son efectos aleatorios a nivel de árbol y del sitio, respectivamente, tal que  $u \sim N(0, \sigma^2_{u,m})$  y  $v = N(0, \sigma^2_{v,m})$ , con  $\sigma^2_{u,m}$  y  $\sigma^2_{v,m}$  las varianzas de dichos efectos, que se asumen independientes.

**Modelo generador de piezas de madera.** Se trata de un modelo que permite predecir, a partir del diámetro, el número de piezas de madera que pueden obtenerse de la troza basal y se ha desarrollado específicamente para esta contribución usando los datos de MOE de madera estructural. Si se asume que estos datos siguen una distribución de Poisson y usando el logaritmo como función de enlace el número medio de piezas en una troza basal dada se puede estimar como

$$\log(nPiezas) = \lambda_0 + \lambda_1 DBH$$

(5)

donde  $nPiezas$  es el número de piezas,  $DBH$  es el diámetro a 1,30 m y el vector  $\lambda$  son parámetros a estimar.

Las estimaciones de todos los parámetros se han incluido en la Tabla 2.

Tabla 2. Estimaciones de los parámetros de los diferentes modelos usados en el simulador y sus errores estándar

Respuesta	Parámetro	Estimación	Error estándar
$\log(\Delta DBH+1)$	$\beta_{0,br}$	-0.5597	0.0773
	$\beta_{0,ki}$	-0.6954	0.0762
	$\beta_{0,ra}$	-0.5131	0.0776
	$\beta_{0,sp}$	-0.6441	0.0774
	$\beta_1$	0.0247	0.0006
	$\beta_2$	-0.0686	0.0008
	$\beta_3$	0.4318	0.0187
	$\beta_4$	-0.0252	0.0011

$\beta_5$		0.0074		0.0004	
$\beta_6$		0.0002		<0.0001	
$\beta_7$		0.0001		<0.0001	
$\sigma$	<sup>2</sup>		$\epsilon_d$	0.0184	-
$\sigma$	<sup>2</sup>		$u_d$	<0.0001	-
$\varphi$		0.6948		-	
MOEdyn2		$\gamma_0$	2.7760		0.1263
$\gamma_1$		-0.3922		0.0340	
$\gamma_2$		0.0004		0.0001	
$\gamma_3$		-46.7701		14.6105	
$\sigma$	<sup>2</sup>		$\epsilon_{md}$	0.01472	-
$\sigma$	<sup>2</sup>		$u_{md}$	0.0206	-
$\sigma$	<sup>2</sup>		$v_{md}$	0.0273	-
MOE		$\theta_0$	9.0189		0.7221
$\theta_1$		13.2613		1.0724	
$\theta_2$		5.3002		0.1023	
$\sigma$	<sup>2</sup>		$\epsilon_m$	26.6963	-
$\sigma$	<sup>2</sup>		$u_m$	<0.0001	-
$\sigma$	<sup>2</sup>		$v_m$	1.4296	-
log(nPiezas)		$\lambda_0$	-0.7871		0.2135
$\lambda_1$		0.0661		0.0073	

### Simulador: modo determinista

El simulador consta de un módulo dinámico centrado en el modelo de incremento en diámetro y los módulos estáticos de propiedades de la madera y de clase resistente (aunque existen también los módulos estáticos de volumen, resiliencia y rentabilidad, no se consideran en el presente trabajo). Esto quiere decir que, dadas unas condiciones iniciales (e.g. lista de árboles con sus diámetros), un horizonte de simulación y un clima, es posible proyectar el diámetro en el tiempo, para después utilizar estas predicciones como entrada en los módulos estáticos. Se detallan los pasos específicos a continuación.

#### Datos de entrada:



- Lista de árboles con su diámetro inicial
- Datos climáticos hasta el horizonte de simulación
- Horizonte de simulación (e.g. intervalo de años de simulación)

#### Módulo de incremento en diámetro

1. Importar datos climáticos
2. Predecir el incremento en diámetro de cada árbol ( $\Delta DBH^{\wedge}$ ; ecuación 1)
3. Actualizar el diámetro ( $DBH^{\wedge}$ ) y  $dg$
4. Si no se ha alcanzado el año final de la simulación, volver al paso 1. En caso contrario, terminar algoritmo

#### Módulo de propiedades de la madera (sólo se presenta el submódulo de MOE)

1. Importar  $\Delta DBH^{\wedge}$  y  $DBH^{\wedge}$
2. Importar datos climáticos
3. Predecir  $MOE_{dyn}^{\wedge}$  para cada árbol ( $MOE_{dyn}^{\wedge}$ ; ecuación 3)
4. Usar  $MOE_{dyn}^{\wedge}$  para predecir los efectos aleatorios (BLUPs – Best Linear Unbiased Predictors) del modelo de MOE radial (ecuación 4)
5. Producir predicciones condicionales de MOE radial (i.e. usando los BLUPs) para cada árbol ( $MOE^{\wedge} | (u^{\wedge}, v^{\wedge})$ ; ecuación 4) – se trata de una forma de calibrar el modelo de MOE radial para cada parcela y cada árbol aprovechando que tenemos una idea del MOE de la parte externa del árbol
6. Calcular los pesos  $w$  de cada anillo por área dentro de la sección transversal del tronco
7. Calcular la media de  $MOE^{\wedge} | (u^{\wedge}, v^{\wedge})$  ponderada por los pesos:

$$\overline{MOE} | (\hat{u}, \hat{v}) = \sum_k^{Años} w_{ijk} \overline{MOE} | (\hat{u}, \hat{v})_{ijk}$$

(6)

#### Módulo de clase resistente

1. Predecir el número de piezas de madera por cada troza basal (ecuación 5)
2. Obtener el valor de MOE para cada árbol (troza basal) tomando valores aleatorios de una distribución normal de media  $MOE^{\wedge} | (u^{\wedge}, v^{\wedge})$  y desviación típica 0.44 (valor obtenido empíricamente a partir de los datos de MOORE et al. (2012))
3. Crear así una distribución empírica de MOE de piezas de madera para el presente lote
4. Calcular la media del MOE de todas las piezas y compararla con los valores nominales del estándar correspondiente (ver MOORE et al. (2012)). Asumiendo que el MOE es la característica limitante (MOORE, 2011), asignar la clase resistente correspondiente al lote de madera
5. Determinar la pérdida de rendimiento para alcanzar una clase dada retirando la proporción necesaria de piezas de la cola inferior de la distribución y recalculando la media de la misma

En modo determinista, todos los términos de error se fijan en su esperanza matemática (cero). Nótese que esto genera un sesgo en las predicciones de incremento en diámetro y  $MOE_{dyn}$ , al haberse modelizado transformaciones no lineales de las mismas. Este sesgo se corrige analíticamente de forma automática en los pasos correspondientes.

Se resume el funcionamiento del simulador de forma esquemática en la Figura 2.

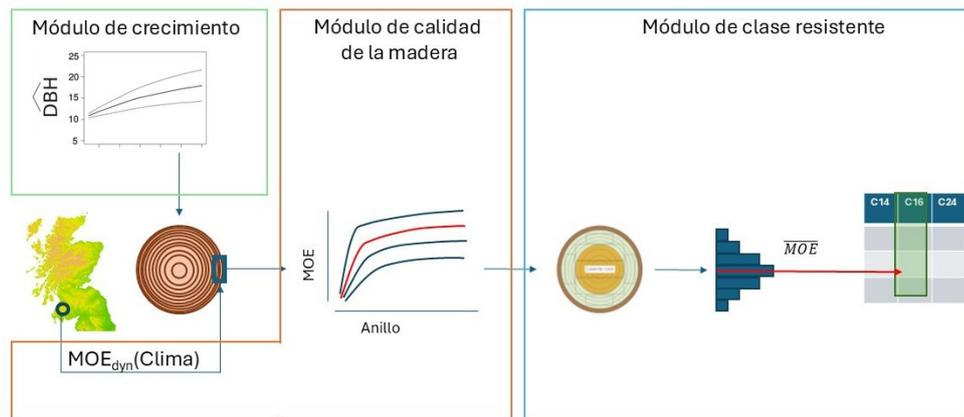


Figura 2. Funcionamiento esquemático y simplificado del simulador

### Simulador: modo estocástico

En la sección anterior se mostraba el modo de funcionamiento del simulador sin considerar la incertidumbre de los diferentes modelos. El simulador puede sin embargo trabajar en modo estocástico mediante simulaciones de Monte Carlo. Las fuentes de incertidumbre son los errores residuales, los efectos aleatorios que no se predicen y las estimaciones de los parámetros de los modelos. Dado que se dispone de una estimación de las matrices de varianza-covarianza de estos términos de error a partir del ajuste de los modelos, es posible producir realizaciones aleatorias de los errores bajo la hipótesis de que éstos se distribuyen de forma normal. El resultado, cuando se realizan un número importante de simulaciones de este tipo, es una distribución de clases resistentes, lo que permite estimar la probabilidad de que un lote de madera pertenezca a las diferentes clases.

### Caso de estudio

Para testar el simulador se proyectó el crecimiento en diámetro de los árboles de los cuatro ensayos de progenies usados para ajustar el modelo de la ecuación 1 (Radnor, Spadeadam, Brecon y Kintyre), a partir de una edad de 10 años y los diámetros iniciales (i.e. conocidos). Para estos sitios, se obtuvieron series históricas climáticas hasta 2017 a partir de las bases de datos del *Environmental Information Data Centre of the UK Centre for Ecology and Hydrology* (ROBINSON et al., 2023, 2020). El horizonte de simulación se situó en 2017 y el año de partida se fijó en 1987, lo que permitió predecir incrementos en diámetro hasta los 40 años de edad, que es normalmente la edad del turno para la especie. Para cada proyección, se predijo la clase resistente siguiendo el procedimiento descrito anteriormente. Este ejercicio se realizó en modo estocástico a partir de 100 simulaciones por sitio.

Dado que los ensayos de progenies incluyen árboles control (sin mejora genética), se realizaron dos ejercicios de simulación: uno para familias mejoradas y otro para la picea de Sitka no mejorada. En este último caso, las estimaciones de los parámetros del modelo de incremento en diámetro varían ligeramente con respecto a las de la Tabla 2 (datos no mostrados). Todos los otros modelos son comunes a las dos tipologías.

### 4. Resultados



Los resultados de las simulaciones del caso de estudio se muestran en la Figura 3 (proyección de diámetros) y Figura 4 (clases resistentes) asumiendo un rendimiento del 100%. En general se observa que todos los lotes de madera virtuales (i.e. simulaciones) tienden a concentrarse en unas pocas clases resistentes y que el material mejorado genéticamente tiende a ser inferior al material original en todos los sitios. La clase resistente más frecuente en ambos casos tiende a ser C14. En material no mejorado, no obstante, el porcentaje de simulaciones que asignan C16 es relativamente alto, variando del 60% en Brecon al 15% de Kintyre.

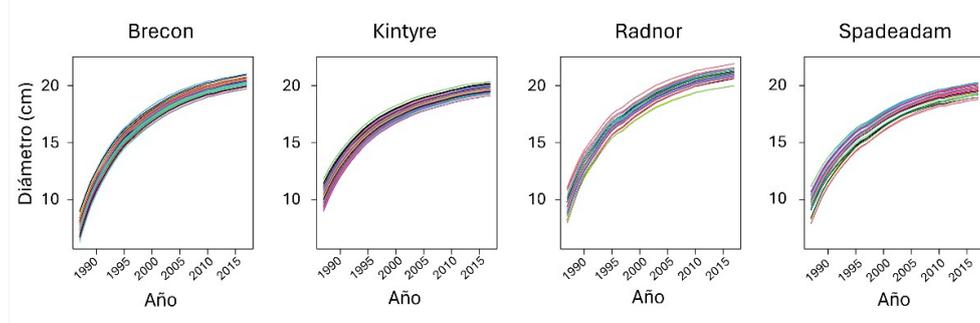


Figura 3. Proyecciones de diámetro para cada sitio de ensayo. Cada línea representa la media de 100 simulaciones para una familia genética (i.e. progenie)

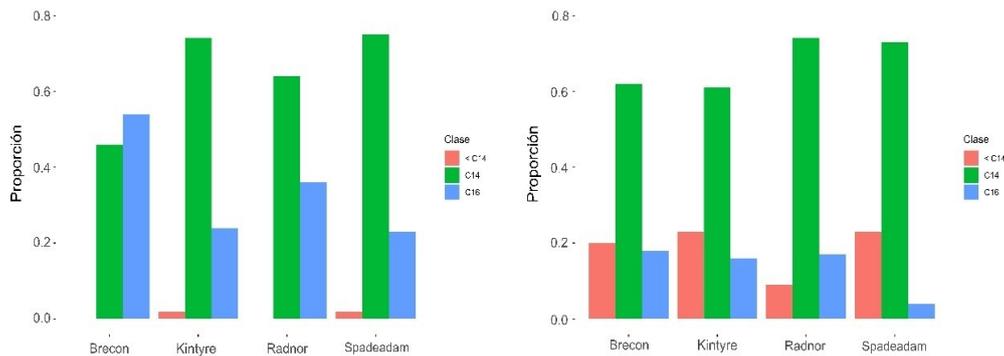


Figura 4. Proporción de simulaciones (de un total de 100) que terminan asignando una u otra clase resistente para cada sitio de ensayo asumiendo un rendimiento del 100%. Izquierda: material no mejorado. Derecha: material mejorado

Si se compara entre sitios, las localizaciones galesas (Brecon y Radnor) tienden a ser mejores desde el punto de vista del grado estructural que los sitios más meridionales (Spadeadam y Kintyre). Además, parece existir una cierta coherencia en los resultados para material mejorado y no mejorado entre sitios. En este sentido, los dos sitios de Gales son los que muestran una mayor proporción de simulaciones que asignan C16 y una menor proporción de <C14 en ambas tipologías. Dicho esto, Radnor aparece como marginalmente superior en material mejorado mientras que Brecon es claramente mejor en material no mejorado. En el otro extremo, Kintyre se comporta marginalmente mejor que Spadeadam en material mejorado pero los dos arrojan resultados muy similares para material no mejorado.

En cuanto al rendimiento, alcanzar C16 en todas las simulaciones implicaría bajar a rendimientos del 90-95% en material original y a ~ 85% en material mejorado. Llegar a C18 supondría disminuir el rendimiento hasta el 70-75% y el 66% en píceas

de Sitka original y mejorada, respectivamente (Tabla 3).

*Tabla 3. Rendimiento para alcanzar C16 y C18 en píceas de Sitka no mejorada y mejorada para cada sitio, basado en 100 simulaciones*

Sitio	Haida Gwaii/QCI (no mejorada)		Píceas de Sitka mejorada			
	Rendimiento (%) (C16)	Rendimiento (%)	(C18)	Rendimiento (%) (C16)	Rendimiento (%)	(C18)
Brecon	95.65	74.55	84.70		66.25	
Kintyre	90.25	70.96	84.50		67.40	
Radnor	93.00	71.05	86.35		67.85	
Spadeadeadam	91.20	71.25	81.85		65.10	

## 5. Discusión

En esta contribución se presenta una primera versión de un simulador de clase resistente para madera en pie. Hasta donde sabemos, éste es el primer simulador que permite proyectar la clase resistente esperada para cualquier turno, usando como datos de entrada una localización y un inventario de diámetros a una edad dada. Dos aspectos contribuyen, a mayores, a la originalidad del trabajo: la sensibilidad climática del simulador, que permitirá utilizar diferentes escenarios climáticos, y la posibilidad de trabajar en modo estocástico, que posibilita una interpretación probabilística de los resultados.

En esta primera versión, se ha usado únicamente el MOE para definir la clase resistente, pudiendo considerarse una buena aproximación para el presente caso de estudio, ya que ésta suele ser la propiedad limitante en Gran Bretaña, al menos en píceas de Sitka (MOORE, 2011). Los resultados que se obtuvieron fueron los esperados con respecto a la mejor calidad en términos de clase resistente de la píceas de Sitka de procedencia Haida Gwaii/QCI sobre el material mejorado genéticamente. Esto se debe principalmente al efecto de los mayores incrementos diametrales a edades tempranas en píceas mejoradas, lo que lleva a una mayor proporción de madera juvenil en esta última (MOORE, 2011). Se trata de uno de los principales retos del sector en Gran Bretaña puesto que la gran mayoría de las masas que entrarán en turno a partir de 2030-40 proceden de diferentes grados de mejora y existe un riesgo real de producir madera de una clase inferior o, alternativamente, de reducir el rendimiento, especialmente ante la perspectiva de acortar los turnos (MACDONALD, 2019).

El simulador sin embargo parece subestimar la clase resistente en general y, por tanto, estas simulaciones no deben considerarse, por el momento, para confirmar la pérdida de clase resistente (o de rendimiento) que se menciona arriba. Si usamos como referencia la píceas de Sitka no mejorada, para la que existe gran disponibilidad de datos, es ampliamente aceptado que este material es capaz de producir C16 sin pérdida de rendimiento en aserradero (MOORE et al., 2012). Según nuestros cálculos, alcanzar C16 en todas nuestras simulaciones llevaría a rendimientos medios del 90-95%, que son por el contrario los que se espera para llegar C18 en la realidad. En la misma línea, para llegar a C18 en nuestras simulaciones, necesitamos bajar el rendimiento medio al 75% aproximadamente, que es lo que se necesita en la realidad para alcanzar C20. En conclusión, el



simulador parece ir una clase por debajo de lo esperado con píceas no mejoradas. Cabe suponer un resultado similar con material mejorado. Se espera que una versión actualizada de la herramienta con las mejoras que se indican a continuación podrá responder de forma más precisa a la cuestión de la pérdida de calidad en material mejorado.

La subestimación que se menciona arriba puede obedecer a diferentes causas. En nuestra opinión, la más probable es la falta de un módulo de mortalidad, en el que se está trabajando actualmente. Si bien es cierto que estas masas son raramente aclaradas y que la mortalidad es limitada (MOORE, 2011), la asunción de que todos los pies sobreviven hasta el final del turno es obviamente poco realista. El impacto en las predicciones de MOE a nivel del árbol es que, en una masa de tan alta espesura, los incrementos diametrales predichos hacia la edad del turno son ínfimos y el peso de los últimos anillos, prácticamente despreciable. Siendo esos anillos precisamente los que presentan un mayor MOE, es muy probable que su bajo peso lleve a una subestimación del MOE medio y, por tanto, de la clase resistente en estos resultados preliminares.

Otra posibilidad es que el modelo de incremento en diámetro tienda a subestimar el crecimiento a edades próximas al turno independientemente de la espesura. El modelo se ajustó con datos de crecimiento hasta edades inferiores a 30 años, por lo que las proyecciones generadas aquí suponen una extrapolación y no es posible determinar con certeza si se ha incurrido en un sesgo. Dicho esto, el modelo no depende realmente de la edad sino del diámetro cuadrático medio de los árboles, lo que sugiere que debería ser capaz de predecir crecimientos razonablemente bien más allá de los márgenes de los datos de calibración.

Aún otro problema potencial, también relacionado con la calibración de modelos, sería el hecho de que el modelo de  $MOE_{dyn}$  esté ajustado únicamente con material no mejorado. Creemos sin embargo que el impacto debe ser muy limitado, puesto que la clase resistente se subestima también en las simulaciones con material no mejorado. Además, este modelo trata de explicar el  $MOE_{dyn}$  a partir de proxies prácticamente mecanicistas, como el crecimiento o el clima, lo que los debería hacer relativamente independiente de la genética.

Una causa adicional, más realista, es que nuestro simulador trabaja, de momento, con la troza basal únicamente. Según MOORE et al. (2012), el MOE mejora en las trozas siguientes, al menos en material no mejorado. En ausencia de datos suficientes de trozas superiores para su modelización, sería posible establecer un factor de corrección heurístico basado en las correlaciones empíricas entre trozas de MOORE et al. (2012).

A pesar de la subestimación que se discute arriba y de las limitaciones y mejoras necesarias que se indican más abajo, creemos que los resultados son por lo general lógicos de cara a los procesos que determinan el MOE. Para llegar a esta conclusión, podemos comparar los diferentes sitios de ensayo. El sitio al que se le asignan, de media, clases resistentes más bajas es Spadeadam. Esta es la localización con temperatura acumulada más baja de los sitios estudiados (excepto Brecon, ver abajo), mientras que tiene el índice de exposición al viento más alto (DAMS = 16). Es conocido que esta combinación de factores tiene un impacto negativo en el MOE (MOORE et al., 2009). El efecto de la temperatura suele relacionarse con los ciclos fenológicos, que afecta a la proporción madera temprana/madera tardía. El efecto del viento se observa sobre todo en una mayor asignación de biomasa al crecimiento en diámetro, lo que lleva a anillos más



anchos de madera menos densa y menos rígida. El siguiente sitio en orden creciente de calidad sería Kintyre, con una temperatura acumulada mayor pero aun moderadamente expuesto al viento (DAMS = 14), y el siguiente es Radnor, con temperatura comparable a Kintyre pero de exposición relativamente baja (DAMS = 11). Finalmente, Brecon, sin duda el mejor sitio desde el punto de vista de la madera, no parece seguir esta lógica: la temperatura acumulada es relativamente baja y la exposición al viento relativamente alta. Creemos que este comportamiento se puede explicar por el hecho de que el crecimiento aquí fue muy modesto antes de que se cerrasen copas, quizá como resultado de un establecimiento deficiente (MANSO et al., 2022). Esto pudo haber llevado a una menor proporción de madera juvenil en los fustes y, por tanto, a mayores clases resistentes.

Una vez estudiados y solventados los sesgos que se mencionaban más arriba, el objetivo a medio plazo en el contexto británico es hacer este simulador accesible a propietarios, productores, industria y gobierno, además del entorno académico y científico. Esto permitiría tomar decisiones de gestión teniendo en consideración la calidad de la madera, incluso bajo diferentes escenarios de cambio climático. Para ello, se plantea su integración en el sistema de apoyo a las decisiones en línea de Forest Research (<http://www.forestdss.org.uk/geoforestdss/>), donde ya existen otros modelos de interés en el ámbito forestal, incluido un módulo de calidad de la madera que está en curso de ser actualizado. De esta manera, un usuario tendría únicamente que seleccionar una localización y proporcionar una lista de árboles a una edad dada para obtener la distribución predicha de clase resistentes. Desde nuestro punto de vista, este enfoque probabilista tiene gran interés por dos motivos. En primer lugar, por una cuestión de transparencia, puesto que las predicciones deterministas dan una idea de falsa precisión: corresponden únicamente al valor más probable. En segundo lugar, el usuario puede usar estas probabilidades para realizar un análisis de riesgos en su inversión. La ambición a largo plazo sería continuar añadiendo módulos estáticos relacionados con la madera, tarea factible dada la arquitectura centrada en el módulo dinámico de crecimiento. Dos buenos candidatos para esta expansión serían el modelo de distribución y tamaño de ramas para la misma especie de ACHIM et al. (2006), que depende del diámetro, y el modelo de geometría y tamaño de nudos de MANSO et al. (2020), que depende del tamaño de las ramas.

Antes de llegar a este punto, sin embargo, son necesarias algunas mejoras y extensiones, además de las mencionadas antes enfocadas a la corrección de sesgos en las predicciones. Continuando con la píceas de Sitka, aunque el MOE sea su factor limitante en Gran Bretaña, aún se necesita completar el módulo de calidad de la madera con un modelo de densidad radial y otro de MOR radial, ambos en construcción. Un reto en este sentido es que, siendo todas estas variables interdependientes, los datos de MOE y densidad suelen provenir de fuentes distintas, con lo que es imposible determinar su matriz de covarianza. Así, es de entrada necesario comprobar si existe un impacto en las predicciones estocásticas por este motivo. Pensemos, por ejemplo, en un árbol de bajo MOE: aunque se esperaría que también fuera poco denso, esta correlación no se podría forzar a priori con los datos típicamente disponibles. Una simulación estocástica donde estas variables se traten como independientes podría llevar, por azar, a un MOE bajo pero una densidad alta, lo que podría falsear la predicción de clase resistente.

Otra mejora importante sería la generalización del modelo de incremento en diámetro a cualquier punto del país donde la especie sea viable. Para ello, es



necesario actualizar este modelo de forma que el sitio sea un efecto aleatorio, a predecir si se conocen algunos incrementos en la masa cuya evolución se quiere proyectar. Asimismo, sería útil crear un módulo de inicialización que constaría de un modelo para predecir la distribución diamétrica a los 10 años a partir de variables edáficas y climáticas, para casos donde el usuario no disponga de un inventario de diámetros (i.e. lista de árboles). A nivel de interfaz, sería interesante permitir al usuario introducir diferentes itinerarios de gestión (e.g. cuándo realizar una clara y de qué tipo y peso). Finalmente, es necesario realizar un ejercicio de validación basado en datos de aserraderos.

Más allá de la píce de Sitka, se dispone de datos en Gran Bretaña para realizar un ejercicio similar en pino silvestre (*Pinus sylvestris*), la segunda especie comercial británica. Es necesario sin embargo trabajar en la toma de datos de otras especies importantes (e.g. abeto Douglas (*Pseudotsuga menziesii*) o píce europea (*Picea abies*) y otras alternativas que se barajan en la actualidad para diversificar el panorama forestal británico (e.g. *Abies grandis*, *Abies procera*, *Thuja plicata* o *Tsuga heterophylla*) (GIL-MORENO et al., 2023).

Esta expansión nos lleva a intentar trasladar la experiencia al ámbito forestal español, donde la aplicación de este simulador depende en gran parte de la disponibilidad de modelos comparables a los presentados aquí. En este sentido, se dispone de modelos de crecimiento de árbol individual para varias especies importantes (BRAVO et al., 2007; CALAMA and MONTERO, 2005; CRECENTE-CAMPO, 2008; PALAHÍ et al., 2003; TRASOBARES et al., 2004) y así como de datos de  $MOE_{dyn}$  para *Pinus pinaster* (MERLO et al., 2014) y de MOE en madera aserrada de *Pinus nigra* (FERNÁNDEZ-GOLFÍN SECO et al., 2004) y *Pinus sylvestris* (HERMOSO PRIETO et al., 2003), además de otras bases de datos que varios de los autores de este trabajo están recopilando. No parece existir, sin embargo, información suficiente de MOE, MOR o densidad a nivel radial. Dado que esto requeriría un esfuerzo considerable y a largo plazo, y dado que sí se dispone o va disponer de  $MOE_{dyn}$ , una línea de investigación prioritaria sería establecer la correlación entre esta variable y el MOR y densidad de los anillos externos. Esto permitiría inferir, al menos aproximadamente, el resto del perfil radial, puesto que las tres variables suelen mostrar un patrón radial similar en pinos (LACHENBRUCH et al., 2011). Con esta información se posría comenzar a trabajar en la predicción de las clases resistentes de madera estructural a partir de árboles en pie en las principales especies maderables de la Península Ibérica, tal y como se plantea en este trabajo.

## 6. Conclusiones

Este trabajo demuestra que es posible predecir la clase resistente de lotes de madera a partir de árboles en pie mediante el ensamblaje de modelos empíricos sensibles al clima. El modo estocástico le da asimismo una noción probabilista y más realista al usuario. Este tipo de simuladores, que ya existen para otras variables de interés forestal (e.g. crecimiento, frutos), permitirá por tanto una toma de decisiones de gestión basada en la calidad de la madera. Aunque en España no se dispone actualmente de todas las bases de datos necesarias, el mantenimiento de las líneas de trabajo existentes y colaboración entre instituciones harán posible la implementación de este simulador en el futuro.

## 7. Agradecimientos

Los autores quieren agradecer a todos los miembros, presentes y pasados, del equipo de *Tree and Wood Properties* de *Forest Research* por su dedicación, rigor y esfuerzo de treinta años, que culmina, por ahora, con el trabajo que aquí se



presenta.

AHC y RSS: proyecto Revierte, apoyo por la Fundación Biodiversidad del MITECO, Plan de Recuperación, Transformación y Resiliencia, financiado por la Unión Europea – NextGenerationEU .

AHC: MICIU/AEI/10.13039/501100011033 y FSE+ (RyC2022-037832-I).

### 8. Bibliografía

ACHIM, A., GARDINER, B., LEBAN, J., DAQUITAINE, R., 2006. Predicting the branching properties of Sitka spruce grown in Great Britain. *N. Z. J. For. Sci.* 36, 246–264.

BRAVO, F., LIZARRALDE, Í., RODRÍGUEZ, E., BRAVO-OVIEDO, A., ORDÓÑEZ, C., HERRERO, C., PANDO, V., DEL PESO, C., JUEZ, L., GUERRA, B., 2007. Modeling Forest Dynamics with an Empirical Approach to Support Stand Management: The Case Study of Mediterranean *Pinus pinaster* in Central Spain, in: *Scientific Tools and Research Needs for Multifunctional Mediterranean Forest Ecosystem Management*. EFI.

CALAMA, R., MONTERO, G., 2005. Multilevel linear mixed model for tree diameter increment in stone pine (*Pinus pinea*): a calibrating approach. *Silva Fenn.* 39. <https://doi.org/10.14214/sf.394>

CRECENTE-CAMPO, F., 2008. Modelo de crecimiento de árbol individual para *Pinus radiata* D. Don en Galicia (PhD). Universidade de Santiago de Compostela

DEFRA, 2024. Timber in construction roadmap. DEFRA. <https://www.gov.uk/government/publications/timber-in-construction-roadmap/timber-in-construction-roadmap>

FAO, 2021. Forest products in the global bioeconomy. FAO. <https://doi.org/10.4060/cb7274en>

FERNÁNDEZ-GOLFÍN SECO, J.I., DÍEZ BARRRA, M.R., HERMOSO PRIETO, E., CONDE GARCÍA, M., 2004. Mechanical characterization of timber from Spanish provenances of laricio pine according to European standards. *Wood Sci. Technol.* 38, 25–34. <https://doi.org/10.1007/s00226-003-0215-3>

FOREST RESEARCH, 2024. Forestry Statistics 2024. Forest Research, Edinburgh.

GIL-MORENO, D., MANSO, R., O'CEALLAIGH, C., HARTE, A., 2024. The influence of age on the timber properties and grading of Scots pine and larch in Ireland. *For. Int. J. For. Res.* 97, 133–146. <https://doi.org/10.1093/forestry/cpad027>

GIL-MORENO, D., MCLEAN, J., RIDLEY-ELLIS, D., 2023. Models to predict the radial variation of stiffness, strength, and density in planted noble fir, Norway spruce, western hemlock, and western red cedar in Great Britain. *Ann. For. Sci.* 80, 48. <https://doi.org/10.1186/s13595-023-01214-7>

HERMOSO PRIETO, E., FERNÁNDEZ-GOLFÍN SECO, J.I., DÍEZ BARRRA, M.R., 2003. Mechanical characterization of timber according to European standards from Spanish provenances of Scots Pine. *Invest. Agrar.: Sist. Recur. For.* 12(3):103-110. DOI:10.5424/1082

LACHENBRUCH, B., MOORE, J., EVANS, R., 2011. Radial variation in wood structure and function in woody plants, and hypotheses for its occurrence, in: *Size- and Age-Related Changes in Tree Structure and Function*. Springer.

MACDONALD, E., 2019. Genetic Selection in Sitka Spruce: Balancing Wood Properties and Improved Growth (PhD). University of Aberdeen.

MANSO, R., BEAUCHAMP, K., GARDINER, B., ADAMS, S., ASH, A., MOORE, J., MACDONALD, E., en prep. Outerwood stiffness models for Sitka spruce and Scots pine in Great Britain.

MANSO, R., DAVIDSON, R., MCLEAN, J., 2022. Diameter, height and volume



- increment single tree models for improved Sitka spruce in Great Britain. *For. Int. J. For. Res.* 95, 391–404. <https://doi.org/10.1093/forestry/cpab049>
- MANSO, R., MCLEAN, J., ASH, A., ACHIM, A., 2020. Estimation of individual knot volumes by mixed-effects modelling. *Can. J. For. Res.* 50, 81–88. <https://doi.org/10.1139/cjfr-2019-0038>
- MCEWAN, A., MARCHI, E., SPINELLI, R., BRINK, M., 2020. Past, present and future of industrial plantation forestry and implication on future timber harvesting technology. *J. For. Res.* 31, 339–351. <https://doi.org/10.1007/s11676-019-01019-3>
- MCLEAN, J., 2008. Wood Properties of four genotypes of Sitka spruce (PhD). University of Glasgow.
- MERLO, E., ÁLVAREZ, J., SANTA CLARA, O., RIESCO, G., 2014. Modelling modulus of elasticity of *Pinus pinaster* Ait. in northwestern Spain with standing tree acoustic measurements, tree, stand and site variables. *For. Syst.* 23, 153–166. <https://doi.org/10.5424/fs/2014231-04706>
- MOORE, J., 2011. Wood properties and uses of Sitka spruce in Britain (Forestry Commission Research Report No. i–iv). Forestry Commission, Edinburgh.
- MOORE, J., LYON, A., LEHNEKE, S., 2012. Effects of rotation length on the grade recovery and wood properties of Sitka spruce structural timber grown in Great Britain. *Ann. For. Sci.* 69, 353–362. <https://doi.org/10.1007/s13595-011-0168-x>
- MOORE, J., LYON, A., SEARLES, G., LEHNEKE, S., RIDLEY-ELLIS, D., 2013. Within- and between-stand variation in selected properties of Sitka spruce sawn timber in the UK: implications for segregation and grade recovery. *Ann. For. Sci.* 70, 403–415. <https://doi.org/10.1007/s13595-013-0275-y>
- MOORE, J., LYON, A., SEARLES, G., VIHARMAA, L., 2009. The effects of site and stand factors on the tree and wood quality of Sitka spruce growing in the United Kingdom. *Silva Fenn.* 43. <https://doi.org/10.14214/sf.195>
- PALAHÍ, M., PUKKALA, T., MIINA, J., MONTERO, G., 2003. Individual-tree growth and mortality models for Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) in north-east Spain. *Ann. For. Sci.* 60, 1–10.
- RIDLEY-ELLIS, D., STAPEL, P., BAÑO, V., 2016. Strength grading of sawn timber in Europe: an explanation for engineers and researchers. *Eur. J. Wood Wood Prod.* 74, 291–306. <https://doi.org/10.1007/s00107-016-1034-1>
- ROBINSON, E.L., BLYTH, E.M., CLARK, D.B., COMYN-PLATT, E., RUDD, A.C., 2020. Climate hydrology and ecology research support system potential evapotranspiration dataset for Great Britain (1961-2017) [CHESS-PE]. <https://doi.org/10.5285/9116E565-2C0A-455B-9C68-558FDD9179AD>
- ROBINSON, E.L., BLYTH, E.M., CLARK, D.B., COMYN-PLATT, E., RUDD, A.C., WIGGINS, M., 2023. Climate hydrology and ecology research support system meteorology dataset for Great Britain (1961-2019) [CHESS-met]. <https://doi.org/10.5285/835A50DF-E74F-4BFB-B593-804FD61D5EAB>
- TRASOBARES, A., PUKKALA, T., MIINA, J., 2004. Growth and yield model for uneven-aged mixtures of *Pinus sylvestris* L. and *Pinus nigra* Arn. in Catalonia, north-east Spain. *Ann. For. Sci.* 61, 9–24. <https://doi.org/10.1051/forest:2003080>
- VICENTE-SERRANO, S., BERGUERÍA, S., LÓPEZ-MORENO, J., 2010. A Multiscalar Drought Index Sensitive to Global Warming: The Standardized Precipitation Evapotranspiration Index. *J. Clim.* 23, 1696–1718. <https://doi.org/10.1175/2009jcli2909.1>
- VIHARMAA, L., 2010. Influence of site factors and climate on timber properties of Sitka spruce (*Picea sitchensis* (Bong.) Carr.) (PhD). University of Glasgow.
- YIAPANIS, A. & GEHRING, R., 2024. Towards a comprehensive strategy for the EU wood industry. EESC opinion paper. CCM/213-EESC-2023