



2025 | **16-20**
GIJÓN | **JUNIO**

9º CONGRESO FORESTAL ESPAÑOL

9CFE-1470

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

Organiza





Modelos de productividad de *Eucalyptus globulus* en el norte de España usando variables ambientales espacialmente continuas como predictores

TEIJIDO-MURIAS, I. (1), LÓPEZ-SÁNCHEZ, C.A. (1), GARCÍA-MANTECA, P. (2), GARCÍA VILLABRILLE, J.D. (3), ROJO-ALBORECA, A. (4), RUIZ FERNÁNDEZ, F. (5) y BARRIO-ANTA, M (1)

(1) Grupo de Investigación SMartForest. Departamento de Biología de Organismos y Sistemas, Escuela Politécnica de Mieres, Universidad de Oviedo, Campus Universitario de Mieres, C/Gonzalo Gutiérrez Quirós S/N, 33600 Mieres (España).

(2) Instituto de Recursos Naturales y Ordenación del Territorio (INDUROT), Campus of Mieres, Universidad de Oviedo, Campus Universitario de Mieres, C/Gonzalo Gutiérrez Quirós S/N, 33600 Mieres (España).

(3) CERNA Ingeniería y Asesoría Medioambiental, SL, Rúa Illas Cíes nº 52-54-56, Bajo, 27003 Lugo (España)

(4) Unidade de Xestión Ambiental e Forestal Sostible (UXAFORES), Departamento de Enxeñaría Agroforestal, Escola Politécnica Superior de Enxeñaría, Universidade de Santiago de Compostela, R/ Benigno Ledo s/n, Campus Terra, 27002 Lugo (España)

(5) Ence Energía y Celulosa. Centro de I+D Forestal, Ctra. A-5000 km 7.5, 21007 Huelva (España)

Resumen

Eucalyptus globulus Labill. es la especie forestal comercial más importante del norte de España, representando el 62% de la madera cortada anualmente. No obstante, se prevé que la relevancia de los eucaliptos aumente todavía más en las próximas décadas. El conocimiento de la productividad del territorio para la especie permitirá concentrar los esfuerzos de gestión en áreas de alta productividad, posibilitando mayor producción sin necesidad de incrementar la superficie plantada. El pequeño tamaño de la propiedad forestal exige desarrollar modelos de alta resolución espacial. En este estudio utilizamos la información ambiental ráster disponible, y datos geolocalizados de índice de sitio de 1.102 parcelas, para ajustar modelos *Random Forest* de productividad a dos escalas espaciales diferentes: paisaje (250 m píxel⁻¹) y parcela (10, 25, 50 y 100 m píxel⁻¹). La variabilidad explicada por los modelos rondó el 50% y la altitud y las variables climáticas fueron las variables predictoras más importantes, encontrándose disminuciones medias de productividad de entre 1-1,3 m³ha⁻¹año⁻¹ por cada 100 m de aumento en altitud y de 3 m³ha⁻¹año⁻¹ por cada grado Celsius de descenso en la temperatura media anual. Se espera un aumento en las próximas décadas del IS de entre un 1,8 y 2,5% y entre un 1,7 y 3,4%, para los escenarios moderado y pesimista respectivamente. Los mapas de productividad son una importante herramienta táctica de apoyo a la planificación, pero también operativa para que los gestores y propietarios seleccionen los mejores lugares para la plantación y obtengan una estimación más precisa de sus producciones.



Palabras clave

Site index, eucalipto, cartografía, ráster, random forest

1. Introducción

En España, las plantaciones de *E. globulus* se extienden principalmente por las áreas costeras de las cuatro comunidades autónomas cantábricas (Galicia, Asturias, Cantabria y País Vasco), donde ocupa una superficie de 389.025 ha (el 15,82% de su superficie arbolada) (MAPA, 2019). La especie crece en masas coetáneas o regulares procedentes de plantación o monte bajo, y han sido gestionadas tradicionalmente para la producción de pasta de papel. Las plantaciones se han realizado con densidades que oscilan entre 1.000 y 1.600 árboles ha⁻¹ (RUIZ et al., 2008), alcanzando incrementos anuales máximos en el volumen de corteza de hasta 32-36 m³ha⁻¹año⁻¹ en las mejores estaciones, con turnos de corta de 12-16 años (GARCÍA-VILLABRILLE, 2015), replantándose gran parte de las masas después de tres turnos de monte bajo (TOMÉ et al., 2021). Su alta productividad, unida a la baja inversión realizada por gran parte de los propietarios, las convierten en una de las plantaciones forestales de mayor rentabilidad del país (RIESCO, 2004) y representan una de las mejores formas para que los propietarios obtengan beneficios de sus pequeños predios forestales (DÍAZ-BALTEIRO et al., 2009). Todo ello hace que hoy en día sea la especie forestal de crecimiento rápido con mayor importancia comercial del país, con un volumen anual promedio aprovechado en el periodo 2005-2022 de 4.933.298 m³, que supuso el 45,0% del volumen cortado anualmente en el Norte de España y el 32,0% de las cortas del país en el mismo período (MITECO, 2023).

Aunque *E. globulus* sigue siendo la especie de eucalipto dominante, durante los últimos años está siendo rápidamente reemplazado por *E. nitens* en algunas zonas, como consecuencia de su mayor crecimiento (DIÉGUEZ-ARANDA et al., 2012), su mayor tolerancia a las bajas temperaturas y su menor sensibilidad a plagas y enfermedades (MARTÍN GIL et al., 2018; GONÇALVES et al., 2019). La creciente demanda como materia prima para nuevos usos, como la producción de energía o la obtención de bioproductos (p. ej., fibra textil o compuestos bioactivos para la industria farmacéutica), y su notable capacidad para secuestrar carbono (TOMÉ et al., 2021) va a hacer que esta especie, junto con *E. nitens*, continúe siendo muy relevante en las próximas décadas en el norte de España. Para mantener o incrementar la productividad de las plantaciones, la estrategia promovida durante décadas por las empresas de celulosa ha sido el fomento del uso de clones de alta productividad, el uso de densidades de plantación adecuadas y la aplicación de cuidados culturales adecuados (RUIZ et al., 2008). Sin embargo, el conocimiento de la distribución espacial de la capacidad intrínseca del terreno para el crecimiento de la especie es otra vía que debe ser abordada. Esta capacidad inherente del terreno para sostener el crecimiento de una determinada especie se denomina calidad de estación y es un indicador de productividad forestal (producción de volumen o biomasa esperada bajo un régimen de gestión específico), que tradicionalmente se ha cuantificado mediante el índice de sitio (IS) (SKOVSGAARD & VANCLAY, 2008). Este se define como la altura promedio de una porción de árboles dominantes y codominantes (altura dominante) a una edad de referencia



específica, y su cálculo requiere la existencia de una ecuación de índice de sitio previa. A pesar de la gran utilidad del IS, el crecimiento medio máximo en volumen por hectárea (CMM_{máx}) se considera una medida más apropiada de la productividad forestal porque está directamente relacionada con el volumen de madera que se puede obtener en una estación determinada (SKOVSGAARD & VANCLAY, 2008; 2013; LATTA et al., 2009).

Una vez que se conoce el IS, se puede relacionar con múltiples variables ambientales para desarrollar modelos de regresión que permiten determinar la calidad de estación de un terreno, aunque no esté poblado por la especie a estudiar (CLUTTER et al., 1983). Además, la disponibilidad actual de capas de información ambiental de alta resolución espacial permite predecir el IS sin necesidad de trabajo de campo, además de permitir su mapeo sobre el territorio (BONTEMPS & BOURIAUD, 2014). En este sentido, las variables climáticas suelen ser muy relevantes para determinar la productividad forestal y, por lo tanto, se espera que los cambios en esas variables afecten a ésta. Así, los modelos de productividad que incluyen esas variables pueden predecir cambios futuros de productividad y proporcionar información útil que ayudará a los planificadores y gestores a implementar las decisiones más apropiadas ante un escenario de cambio global (BARRIO-ANTA et al., 2020).

El conocimiento de la distribución espacial de la calidad de estación permitiría también identificar los terrenos con mayor potencial productivo, centrando los esfuerzos de gestión en esos lugares y reduciendo así la superficie necesaria de plantaciones de eucalipto. Alternativamente, los terrenos menos productivos ocupados actualmente por *E. globulus* podrían volver a sus usos de tierra previos (TOMÉ et al., 2021). Sin embargo ¿cuál es la resolución espacial más adecuada para mapear el IS?. La respuesta no es fácil, ya que depende del tipo de masa forestal (no gestionada vs. gestionada intensivamente), del objetivo de la planificación (estratégico, táctico u operativo) y de la precisión de las estimaciones de IS en relación con su coste de mapeo (SKOVSGAARD & VANCLAY, 2013). En general, se precisan resoluciones espaciales más altas para masas gestionadas intensivamente y para un nivel de planificación operativa. Para la cartografía de la calidad de estación destinada a los niveles de planificación estratégica y táctica (escala de paisaje) suelen ser suficientes resoluciones inferiores a 100 m píxel⁻¹, que sirven para que las administraciones públicas redacten o actualicen Planes de Ordenación de Recursos Forestales (PORF) a nivel de comarca, y también Planes Forestales autonómicos para todo su territorio. Estas resoluciones también son de utilidad cuando se trata de planificar masas de gran extensión y/o baja intensidad de gestión o incluso con ausencia de la misma. Sin embargo, a nivel planificación operativa casi siempre se requiere información de alta resolución espacial, que oscila entre varios metros y 100 m píxel⁻¹, para desarrollar prescripciones de planificación muy concretas o predecir el crecimiento y la producción a escala de parcela forestal.

2. Objetivos

El objetivo principal de este estudio fue desarrollar modelos de calidad de



estación ráster a diferentes escalas espaciales para predecir la productividad del territorio para *E. globulus* en el norte de España. Se establecieron los siguientes objetivos específicos: i) desarrollar modelos de productividad de la estación y mapas espacialmente continuos basados en las variables ambientales a dos escalas espaciales (paisaje y parcela forestal), y ii) explicar los factores ambientales que determinan la productividad actual de la estación y encontrar los patrones ocultos entre la productividad y esos factores.

3. Metodología

3.1. Área de estudio

Las plantaciones de *E. globulus* se localizan principalmente en altitudes inferiores a 600-700 m en la región biogeográfica eurosiberiana, que se extiende a lo largo del litoral del norte de España. Por ello, el área de estudio abarcó cuatro comunidades autónomas: Galicia, Asturias, Cantabria y País Vasco. La geomorfología del área de estudio es compleja, y las diferentes combinaciones de variables topográficas y formas de relieve condicionan mucho el tipo y vigor de las comunidades de vegetación presentes. El clima se caracteriza generalmente por temperaturas suaves (valores medios anuales entre 11,5-14,5 °C) y precipitaciones a menudo superiores a los 1.000 mm por año (NICOLÁS e IGLESIAS, 2012) y que presentan un mínimo estival pero no muy acusado. Geológicamente, la zona oriental está dominada por rocas mesocenoicas (esquistos, areniscas, calizas, dolomitas y rocas volcánicas), la zona central por alternancia de rocas carbonatadas, filitas, areniscas y capas de carbón y la zona occidental por alternancia de rocas ígneas o metaigneas ácidas (granitos, granodiritas, gneis y ortogneis) y sedimentarias y metamórficas (cuarcitas, cuarzoarenitas, areniscas, pizarras y esquistos) (IGME, 2015).

3.2. Datos usados

Los datos del índice de sitio se obtuvieron de una red de 1.102 parcelas de inventario establecidas en rodales de monte alto. Las parcelas se distribuyeron por toda el área de distribución de la especie en el norte de España, cubriendo el mayor rango posible de condiciones ambientales. Dado que algunas parcelas estaban en el mismo monte, se usaron aquellas cuya distancia era mayor que la resolución de escala espacial de los mapas (100 y 250 m pixel⁻¹, respectivamente). En cada parcela se midió el diámetro a la altura del pecho y la altura total de todos los árboles y se obtuvo la edad del rodal a partir de la fecha de plantación. La altura dominante se determinó como la altura promedio de los 100 árboles más gruesos por hectárea. El índice de sitio (altura dominante a una edad de referencia de 7 años) se estimó a partir de la ecuación en forma de diferencias algebraicas desarrollada para *E. globulus* por GARCÍA-VILLABRILLE (2015). En la Tabla 1 se presentan los estadísticos de las principales variables de rodal de las parcelas usadas.

Tabla 1. Estadísticos de las principales variables del rodal de las parcelas utilizadas para desarrollar los modelos de calidad de estación.

	Escala paisaje (678 parcelas)				Escala parcela forestal (1.102 parcelas)			
	Med.	Min.	Max.	Std. Dev.	Med.	Min.	Max.	Std. Dev.
<i>N</i>	1.167,0	450,0	2.400,0	292,2	1.166,3	300,0	3.000,0	301,1
<i>G</i>	15,3	0,3	42,3	7,1	15,6	0,3	42,3	7,1
<i>H0</i>	16,6	5,1	35,1	5,07	16,7	4,7	35,1	4,9
<i>t</i>	10,0	3,3	25,0	3,55	10,5	2,9	25,0	3,5
<i>IS</i>	13,8	5,6	24,0	3,24	13,5	4,0	24,0	3,2

Donde: *N* es el número de árboles por hectárea (pies ha^{-1}), *G* el área basimétrica ($\text{m}^2 \text{ha}^{-1}$), *H0* la altura dominante (media aritmética de los 100 árboles más gruesos por hectárea) en m, *t* la edad del rodal (años), e *IS* el índice de sitio (altura dominante a una edad de referencia de 7 años) en m.

Como posibles variables independientes de los modelos de productividad se utilizaron variables ambientales espacialmente continuas de cuatro tipos: terreno, climáticas, suelo y litología. Las variables del terreno se obtuvieron a partir del modelo digital del terreno con una resolución espacial de 5 m, elaborado por el Centro Nacional de Información Geográfica de España (CNIG). Se obtuvieron 10 variables topográficas, 3 variables de radiación solar potencial (radiación solar topográfica) y una variable relacionada con la distancia a las redes hidrográficas. Se consideraron dos fuentes diferentes de variables climáticas: i) 65 variables climáticas extraídas del Atlas Climático Digital de la Península Ibérica (NINYEROLA et al., 2005) con una resolución espacial de 200 m pixel^{-1} , y ii) 19 variables bioclimáticas obtenidas del WorldClim (HIJMANS et al., 2005) con una resolución espacial de 30 segundos de arco (aproximadamente 800 m pixel^{-1}). Además, se consideraron 5 variables de suelo compiladas a partir de SoilGrids250m (HENGL et al., 2017) y 16 variables (relacionadas con las propiedades físicas y químicas del suelo) obtenidas de mapas ráster con una resolución espacial de 500 m elaborados por BALLABIO et al. (2016) y la base de datos LUCAS 2009 TOPSOIL del Centro Europeo de Datos de Suelos (ESDAC) (PANAGOS et al., 2012). Para valorar la litología, se utilizó un mapa específico de clases litológicas reclasificadas elaborado por el Instituto de Recursos Naturales y Ordenación del Territorio de Asturias (INDUROT) (GARCÍA-MANTECA et al., 2023). Por otra parte, para predecir los efectos del cambio climático se emplearon los Modelos de Clima Global (GCM) para 2050 y 2070 basados en el modelo CMIP5 del quinto Informe de Evaluación del IPCC (<http://www.worldclim.org/CMIP5>).

3.3. Desarrollo de los modelos

Para mapear la productividad de *E. globulus* se analizaron dos escalas espaciales diferentes, paisaje y parcela forestal. En este sentido, las variables predictoras consideradas inicialmente fueron usadas o no en cada tipo de escala espacial dependiendo de: i) su resolución espacial original, ii) la utilidad de su remuestreo y



iii) la escala espacial final de los modelos a ajustar. Así, el modelo de productividad a escala de paisaje se abordó con una resolución espacial de 250 m píxel⁻¹. Este modelo será útil a nivel de planificación táctica y estratégica, así como para analizar el efecto del cambio climático en la productividad forestal. Como variables independientes candidatas, este modelo utilizó variables de terreno, litológicas, climáticas (de WorldClim) y variables de suelo de LUCAS y SoilGrid, que fueron remuestreadas a 250 m píxel⁻¹ cuando su resolución original era diferente. Se ajustaron dos versiones del modelo a escala paisaje, incluyendo la altitud como variable independiente (en adelante, SI250_ALT) y sin incluir altitud (en adelante, SI250). El modelo sin altitud se utilizó para predecir el efecto del cambio climático sobre la productividad, ya que la altitud está bastante correlacionada con variables climáticas y enmascararía el efecto del cambio climático sobre la productividad. Los datos de proyección climática futura (del modelo CMIP5), disponibles como variables WorldClim con una resolución espacial de 30 segundos de arco, también se remuestrearon a 250 m píxel⁻¹. Por otro lado, los modelos a escala de parcela forestal son útiles a nivel de planificación operativa y en este trabajo se probaron modelos a cuatro resoluciones espaciales diferentes: 10, 25, 50 y 100 m píxel⁻¹ (en adelante, SI10, SI25, SI50 y SI100). A esta escala espacial se utilizaron los datos del Atlas Climático Digital de la Península Ibérica (NINYEROLA et al., 2005) ya que proporciona los datos climáticos actuales con la mayor resolución espacial disponible (200 m píxel⁻¹). Posteriormente se volvieron a muestrear las variables del terreno y la información litológica a las diferentes resoluciones espaciales probadas. Las capas ráster sobre parámetros físicos y químicos del suelo (variables Soilgrid y LUCAS) se descartaron a esta escala ya que se elaboraron con resoluciones espaciales de 250 y 500 m píxel⁻¹ respectivamente, y considerando la alta variabilidad espacial habitual de los parámetros de suelo (MCKENNEY & PEDLAR, 2003), su remuestreo a una escala mayor no parecía recomendable.

3.4. Ajuste y evaluación de modelos

Para obtener los modelos de productividad forestal se utilizó el algoritmo *Random Forest* (RF) (BREIMAN, 2001), ampliamente usado para este tipo de estudios (P.ej., CASTAÑO-SANTAMARÍA et al., 2019; PARK et al., 2023; GAO et al., 2023). Para la evaluación de los modelos se usó el método de validación cruzada de 10 carpetas y 10 repeticiones. A partir de las predicciones obtenidas se obtuvieron el coeficiente de determinación, los valores absoluto y relativo del error medio absoluto (EMA y EMA%) y de la raíz del error medio cuadrático (REMC y REMC%), que se emplearon para evaluar los modelos. Para seleccionar las variables predictoras del modelo, se utilizó la medida de importancia de la variable (VIM) como medida para ordenar las variables por su poder predictivo. Para ello se utilizó la minimización del error medio cuadrático (EMC) en cada uno de los nodos del modelo del árbol de regresión. Para una mejor comparación, se expresaron los valores de VIM en términos relativos (VIM_R), siendo $VIM_R = [(VIM/\sum VIM) \times 100]$. Por otro lado, para analizar la relación funcional subyacente entre el IS y cada variable independiente se inspeccionaron los gráficos de respuesta marginal, que permitieron explorar las relaciones entre la variable dependiente y las variables predictivas más importantes (CHOUDHURY et al., 2021).



3.5. Conversión del índice de sitio a crecimiento medio máximo en volumen

Para convertir el índice de sitio (IS) en crecimiento medio máximo en volumen (CMmáx) se utilizó el método propuesto por MOLINA-VALERO et al. (2019). Para llevarlo a cabo fue necesario determinar previamente la edad óptima de corta (EO) para cada parcela, o edad en la que se alcanza el CMmáx, utilizando para ello el modelo de crecimiento y producción desarrollado por GARCÍA-VILLABRILLE (2015) para *E. globulus* en el norte de España. A continuación, se comparó la EO con la edad actual de la masa (EA), descartando aquellas parcelas con discrepancias mayores de 2 años entre esas dos edades. De esta forma, al final de este proceso sólo estuvieron disponibles para construir la relación entre el CMmáx-IS un total de 399 parcelas de las 1.102 de partida.

3.6. Predicciones de productividad futuras

El modelo seleccionado a escala paisaje (IS250) se aplicó sobre proyecciones futuras de datos climáticos bajo dos escenarios de cambio (moderado y pesimista) para los años 2050 y 2070. El escenario moderado (RCP 4.5) asume que las políticas climáticas limitarán las emisiones relacionadas con el efecto invernadero, alcanzándose una concentración de CO₂ de 650 ppm y un aumento de 1,0 a 2,6 °C de temperatura en 2100 (THOMSON et al., 2011). Por su parte, el escenario pesimista (RCP 8.5) supone un aumento continuo en los gases de efecto invernadero (manteniéndose la tendencia actual), alcanzando una concentración de CO₂ de 1.350 ppm y un incremento de 2,6–4,8 °C de temperatura para 2100 (IPCC, 2013; HARRIS et al., 2014).

4. Resultados

4.1. Capacidad predictiva de los modelos, importancia de variables y patrones observados

La capacidad predictiva de los modelos de índice de sitio explicó un porcentaje de variabilidad del 48-50%, sin tendencias de subestimación o sobreestimación (Tabla 2).

Puesto que los modelos a escala de parcela forestal presentaron una precisión muy similar, se eligió el modelo con mayor resolución espacial (SI10) para mapear la productividad a nivel operacional. Todos los modelos a escala de parcela forestal (SI10, SI25, SI50 y SI100) presentaron un patrón de selección de variables regresoras similar, seleccionando 12-18 de 77 como tamaño de subconjunto óptimo, correspondiendo el menor número al modelo con mayor resolución espacial (Tabla 3).

Tabla 2. Valores de los estadísticos de evaluación de los modelos (resultado de procedimiento de validación cruzada de 10 carpetas repetido 10 veces).

Modelo	R2	REMC	REMC%	EMA	EMA%
SI10	0,48	2,31	17,08	1,87	13,80
SI25	0,48	2,30	17,04	1,87	13,86
SI50	0,48	2,31	17,08	1,87	13,80
SI100	0,48	2,31	17,08	1,86	13,78
SI250	0,48	2,36	17,05	1,90	13,76
SI250_ALT	0,50	2,30	16,67	1,88	13,58

La altitud fue la variable ambiental individual más importante, disminuyendo el IS a medida que la altitud aumenta, y acelerándose el descenso con altitudes superiores a los 125 m. También se observó que las características del terreno tienen mayor importancia a medida que la resolución espacial aumenta desde 250 a 10 m pixel⁻¹.

Globalmente, las variables climáticas fueron las que más contribuyeron a explicar la variabilidad del IS, con importancia relativas acumuladas del 58,29%, 61,27%, 66,81% y 65,46% (para SI10, SI25, SI50 y SI100, respectivamente), presentando las variables térmicas entre 1,4 a 2,6 veces más importancia que las pluviométricas y siendo la diferencia mayor con el aumento de la resolución espacial. Analizando los datos por las distintas estaciones y meses del año, las variables climáticas invernales acumularon el 32,9% del VIMR del modelo, mientras que las variables estivales contribuyeron con un 17,1% (Tabla 3). De hecho, la temperatura máxima mensual media de enero es la segunda variable más importante en todos los modelos. También se constató una notable contribución de otras variables de temperatura mínima y media de otros meses invernales, presentando curvas de respuesta marginal crecientes y casi lineales. La temperatura media anual fue la quinta variable más importante, mostrando una relación lineal positiva con la productividad. Así, en el rango de temperatura media anual de 7,5°C a 15°C, el IS mostró un incremento medio de 2,2 m por cada °C de incremento de la temperatura. Estas temperaturas medias anuales o mensuales más altas se alcanzan en las zonas costeras, en las cuencas de los principales ríos y en las zonas interiores con baja altitud.

En cuanto a las variables de precipitación, la precipitación mensual de diciembre entró en todos los modelos como una de las variables con más peso, mostrando una curva de respuesta marginal con un pico de 15,5 m de IS a los 130 mm y una ligera disminución para precipitaciones más altas. Con respecto a las variables climáticas estivales, todos los modelos incluyeron una temperatura máxima y/o media y una precipitación para al menos un mes de verano (Tabla 3). De manera similar al invierno, las variables relacionadas con la temperatura de verano presentaron curvas de respuesta marginal crecientes y, por el contrario, la precipitación mostró curvas ligeramente decrecientes. La radiación topográfica acumulada mensual de octubre fue la tercera variable con más peso en todos los modelos a escala parcela. La forma funcional de la gráfica de respuesta marginal muestra un aumento gradual en el IS a medida que aumenta la radiación solar, alcanzando un pico de índice de sitio de 16 m a 1.500 10kJ m² mes⁻¹, valores de radiación más altos implican una disminución rápida en el SI hasta valores de 11,5



a 2.000 10kJ m² mes⁻¹.

Tabla 3. Variables incluidas en los modelos de productividad, incluyendo su tipo, la relación funcional con el índice de sitio, su importancia relativa (VIMR) y los valores resumidos en su área de distribución óptima.

Modelo		Variable		VIMR	Relación SI-	Valores resumen en el hábitat óptimo				
Denominación	Escala/Resol.	Tipo	Nombre		variable	Media	Min.	Max.	D.s.	
SI10	Parcela (10 m pixel ⁻¹)	Terreno	ELV	16,51	LC	355,72	3,67	696,13	137,21	
		Clima	TM1	10,89	LD	11,38	8,90	14,30	0,85	
		Terreno	R10	10,23	UM	1.523,3	957,0	1.884,0	143,14	
		Clima	P12	9,15	SD	214,70	99,60	321,80	56,81	
		TA	8,35	LC	12,36	10,10	14,50	0,79		
		Tm2	8,31	LC	3,63	1,00	6,20	0,83		
		Terreno	HL	7,99	UM	0,75	0,54	0,87	0,05	
		Clima	P7	6,98	SD	45,20	17,80	121,20	12,08	
		Terreno	R7	6,98	UM	3.129,2	2.816,0	3.198,0	53,58	
		Clima	TM8	5,64	LC	23,87	21,20	28,00	1,38	
		T12	4,51	LC	8,20	5,80	10,50	0,85		
		T6	4,46	LC	15,97	13,40	18,90	0,92		
	SI250	Paisaje (250 m pixel ⁻¹)	Clima	BIO6	17,03	LC	4,72	2,00	7,20	0,99
				BIO12	13,24	SD	1190	773	1600	230,2
Terreno			SLP	13,21	SD	9,23	0,35	26,24	5,19	
Suelo			Sand	12,02	SD	51,50	20,90	77,00	12,02	
R			11,36	SD	18,21	5,00	36,00	5,38		
		Clima	BIO13	10,18	SD	169,65	106,00	264,00	45,06	
		BIO5	9,41	UM	23,49	21,90	27,00	0,84		
		BIO2	7,20	SD	7,56	6,00	9,40	0,75		
		BIO15	6,34	SD	39,57	22,00	52,00	6,98		
SI250_AL T		Paisaje (250 m pixel ⁻¹)	Terreno	ELV	20,94	LD	344,5	0,07	680,9	136,5
	Clima		BIO6	9,05	LC	4,72	2,00	7,20	0,99	
	BIO12		8,10	SD	1,190	773	1,600	230,3		
	Terreno		SLP	7,31	SD	9,23	0,35	26,24	5,19	
	Terreno		ASP	6,94	SD	193,19	0,12	359,66	107,4	
	Suelo		Sand	6,87	SD	51,50	20,90	77,00	12,02	
	Clima		BIO13	6,79	SD	169,65	106,00	264,00	45,06	
			BIO4	6,48	LD	387,14	318,90	479,00	28,48	
		BIO5	6,00	UM	23,49	21,90	27,00	0,84		
		BIO17	4,81	SD	136,36	103,00	252,00	14,78		
		BIO15	4,72	SD	39,57	22,00	52,00	6,98		
		BIO2	4,71	LD	7,56	6,00	9,40	0,75		
		BIO18	3,98	SD	154,44	107,00	270,00	15,83		
		Litología	EDA_P	3,30	-	-	-	-	-	

Donde: ELV = altitud sobre el nivel del mar (m); TM1= temperatura media mensual



máxima de enero (°C); TA=temperatura media anual (°C); T6= temperatura media mensual de junio (°C); T12= temperatura media mensual de diciembre (°C); TM8= temperatura media mensual máxima de agosto (°C); Tm2= temperatura media mensual mínima de febrero (°C); P7= precipitación mensual de julio (mm); P12= precipitación mensual de diciembre (mm); R7= radiación acumulada mensual de julio ($10\text{kJ m}^2 \text{mes}^{-1}$); R10= radiación acumulada mensual de octubre ($10\text{kJ m}^2 \text{mes}^{-1}$); HL = carga térmica (kW); BIO2 = rango medio diurno (media mensual (temp. máx. – temp. mín.)) (°C); BIO4= estacionalidad de la temperatura (D.s.x100); BIO5= Temperatura máxima del mes más cálido (°C); BIO6= temperatura mínima del mes más frío (°C); BIO12= precipitación anual (mm); BIO13= precipitación del mes más húmedo (mm); BIO15= estacionalidad de la precipitación (coef. de variación); BIO17= precipitación del trimestre más seco (mm); BIO18= precipitación del trimestre más cálido (mm); R = probabilidad de ocurrencia del horizonte R dentro de 200 cm (%); Sand = porcentaje de arena en el suelo (%); ASPECT = Orientación (°); SLP = Pendiente (%). Relación funcional entre el IS y cada variable: LC= lineal creciente; LD= lineal decreciente; SD = suave decreciente; UM= curva unimodal con máximo.

Respecto al modelo de paisaje (SI250_ALT), el proceso de reducción de variables en *Random Forest* seleccionó 14 de las 59 variables existentes como subconjunto óptimo para predecir el índice de sitio. De manera similar a los modelos a escala de parcela, se observó una mayor contribución de las variables climáticas (54,63% de VIMR), seguidas de las variables del terreno (35,20%) y una contribución muy baja de las variables del suelo (6,87 % del VIMR) y de litología (3,30%) (Tabla 3). Inspeccionando las formas de las curvas de respuesta marginal, se observó que las temperaturas mínimas más altas del mes más frío estaban relacionadas con índices de sitio más altos. Por el contrario, se observaron curvas decrecientes para dos variables, pendiente y porcentaje de arena en el suelo. Las variables de precipitación mostraron una tendencia gráfica similar, con valores más altos del IS para valores más bajos de precipitación. La forma funcional del gráfico de respuesta marginal para la temperatura máxima del mes más cálido fue una relación unimodal con un IS máximo a 25 °C y una caída drástica a temperaturas más altas. Tras inspeccionar la curva de respuesta marginal del índice de sitio vs. altitud y considerando la relación entre CMmax-IS de la Figura 2, los resultados mostraron una disminución media de la productividad de aproximadamente $1 \text{ m}^3\text{ha}^{-1}\text{año}^{-1}$ por cada 100 m de ascenso entre el nivel del mar y los 175 m de altitud y alrededor de $1,3 \text{ m}^3\text{ha}^{-1}\text{año}^{-1}$ por cada 100 m de ascenso entre los 175 y los 750 m de altitud. Finalmente, la litología contribuyó poco a explicar la variabilidad del IS, aunque se detectaron diferencias. Así, las mayores productividades se localizan en suelos aluviales, depósitos indiferenciados y suelos mixtos; por el contrario, las menores productividades se asocian a suelos ácidos (lutitas, cuarcitas, cuarzosanditas, granitos y granidioritas).

Como resultado se obtuvieron mapas de índice de sitio con resoluciones espaciales de 10 m pixel^{-1} (IS10) y de 250 m pixel^{-1} (IS250) respectivamente (Figura 1)

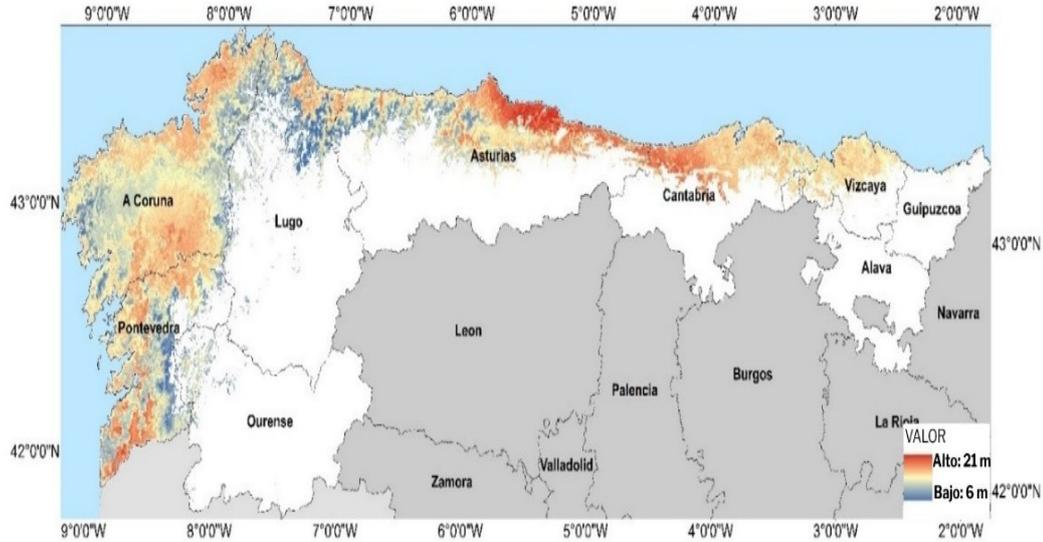


Figura 1. Mapa de calidad de estación actual (IS) para *Eucalyptus globulus* en su área de distribución óptima en el norte de España

4.2. Conversión del índice del sitio a crecimiento medio máximo en volumen

La conversión del índice de sitio a crecimiento medio máximo en volumen siguiendo el enfoque propuesto por MOLINA-VALERO et al. (2019) arrojó como resultado una relación robusta e insesgada entre ambas variables, con un coeficiente de determinación de 0,79 y con los dos parámetros significativos a un nivel de confianza del 95% (Figura 2). Los valores de CM_{max} observados oscilaron entre 1,33 y 33,84 $m^3ha^{-1}año^{-1}$ con un valor medio de la edad óptima de corta de 9,83 años y una desviación típica de 5,25 años, mostrando una gran variabilidad y una prevalencia de valores bajos.

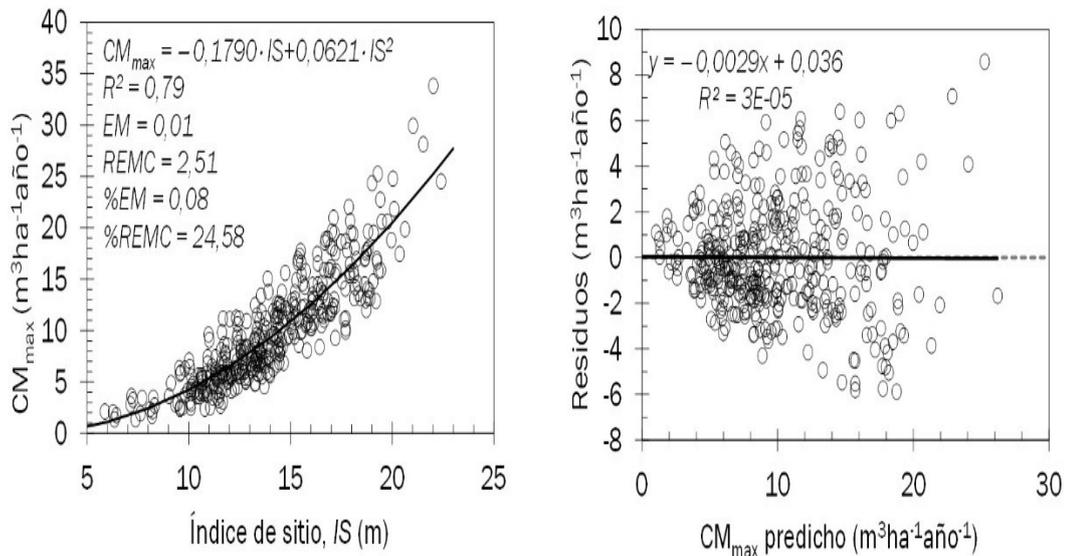


Figura 2. Gráficos que muestran la relación funcional entre los valores del CMmax y el IS (izquierda) y los residuos frente a los valores de CMmax predichos (derecha).

4.3. Efectos del cambio climático en la productividad

Para determinar el efecto del cambio climático sobre la productividad ejecutamos el modelo SI250 (sin incluir la altitud como variable explicativa), con datos climáticos futuros obtenidos del modelo CMIP5 para 2050 y 2070 bajo los escenarios de cambio climático RCP 4.5 y 8.5. Los resultados de las proyecciones del modelo de productividad bajo esos dos escenarios revelaron que el IS medio y el CMmax aumentarán entre 1,7% y 3,4%, respectivamente, en relación con los valores medios actuales (14,4 m y $10,5 \text{ m}^3\text{ha}^{-1}\text{año}^{-1}$, respectivamente). Además, dicho incremento se producirá principalmente en terrenos de calidades de estación medias (IS entre 13 y 17 m) en todos los escenarios de cambio climático (Figura 3), lo que implicará un aumento de la superficie de esas clases de IS de entre 325.000 y 453.000 ha para 2050 (incrementos del 20,4% y 28,4% respecto a las superficies actuales), para los escenarios RCP 4.5 y RCP 8.5, respectivamente. El mapa de la variación prevista en el IS debido al cambio climático se muestra en la figura 4.

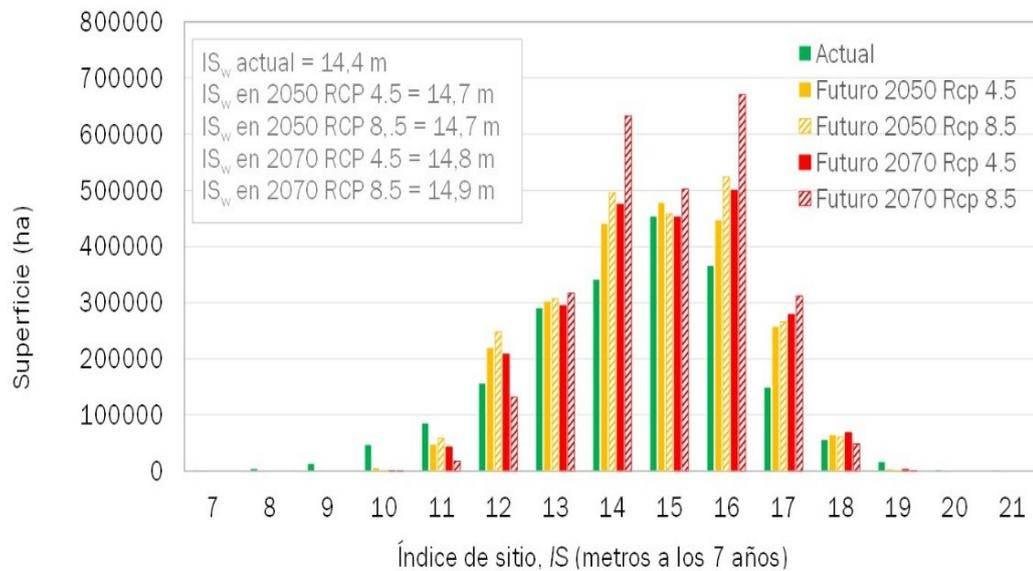


Figura 3. Distribución de superficies actuales y futuras por clases de índice de sitio en el hábitat óptimo de la especie bajo dos escenarios de cambio climático diferentes (RCP 4.5 y RCP 8.5). IS_w = Índice de sitio (m) ponderado por la superficie ocupada.

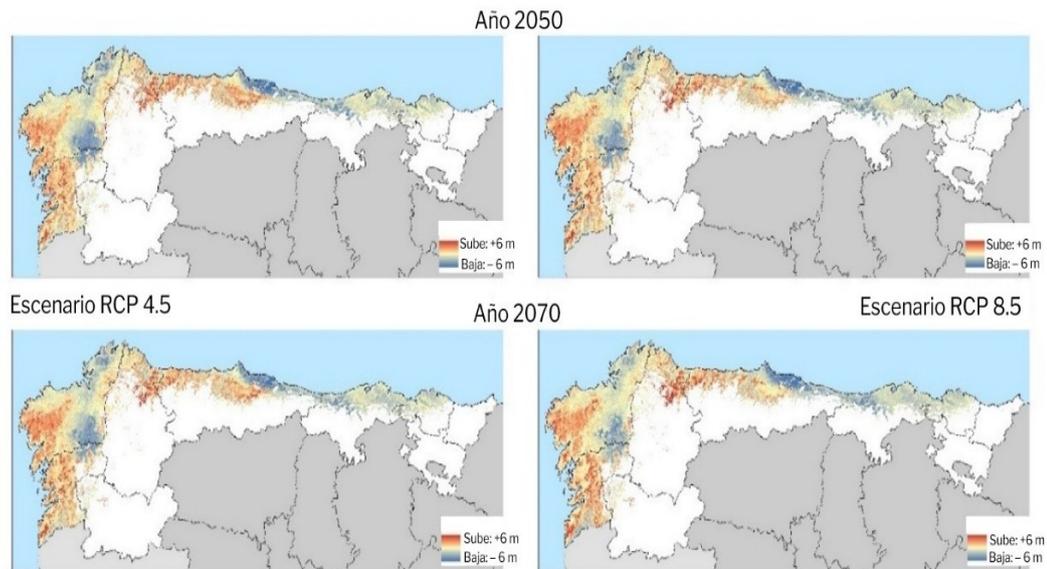


Figura 4. Mapa de predicciones futuras de cambio en la productividad de la especie (IS) dentro del hábitat óptimo actual para dos escenarios de cambio climático.

5. Discusión

5.1. Capacidad de ajuste de los modelos a diferentes escalas e importancia de las variables ambientales

La varianza total explicada por los modelos de IS ajustados a partir de variables ambientales (alrededor del 50%) puede considerarse intermedia en este tipo de trabajos (MCKENNEY & PEDLAR, 2003; AERTSEN et al., 2010; BONTEMPS & BOURIAUD, 2014). La mayoría de los estudios que presentan modelos de IS con mejores ajustes han incluido algunas variables de suelo muestreadas en campo que son costosas de obtener (P.ej., FONTES et al., 2003; BJELANOVIC et al., 2018), lo que limita su aplicación práctica. Con respecto a *E. globulus*, algunas investigaciones anteriores han obtenido resultados menos precisos que en este estudio (P. ej., MERINO et al., 2003, ALEGRIA et al., 2020, PHUONG, 2021).

Después de ajustar modelos que utilizan la misma base de datos (SI10, SI25, SI50 y SI100), se observó que las variables ambientales contribuyeron o no a explicar la variabilidad del IS dependiendo de la resolución espacial del modelo considerado. Parece, por tanto, que la contribución de las variables ambientales depende de dos factores: i) la variabilidad geográfica del fenómeno estudiado y su captura por parte de los datos de campo, y ii) la variabilidad espacial natural de las variables usadas como predictoras. Por otro lado, el MDT de alta resolución espacial de los modelos a escala parcela permitió una caracterización fina de las condiciones microtopográficas. Este estudio mostró que la importancia de la radiación solar incidente potencial de ciertos meses aumenta cuando la resolución espacial también aumenta, llegando a representar hasta un 40% de la contribución de las variables del terreno en el modelo SI10. Esta variable integra información



topográfica (principalmente pendiente y orientación) que influye en la temperatura del aire y la precipitación, y establece patrones en la formación de nieblas, nubes y circulación local del viento (NINYEROLA et al., 2005). Por lo tanto, nuestros resultados mostraron que, a resoluciones espaciales altas, las variables del terreno juegan un papel más importante a través de su influencia en la radiación solar incidente. La radiación solar anual ha mostrado correlación positiva en el clima oceánico de Escocia (XENAKIS et al., 2011) y negativa en climas mediterráneos, donde la abundante radiación solar y la escasa precipitación durante los meses calurosos de verano conducen a una disponibilidad de agua muy limitada (FONTES et al., 2003). Con respecto a *E. globulus*, la radiación solar anual se correlacionó negativamente con IS en Portugal (PHUONG, 2021) y en los Andes del norte de Perú (BASELLY-VILLANUEVA et al., 2024), donde ocurren períodos de marcada sequía. Sin embargo, la radiación solar anual se correlacionó positivamente con la productividad en plantaciones de eucalipto en Brasil en un clima templado lluvioso-mesotérmico (BRAGA et al., 1999; SCOLFORO et al., 2015). Por lo tanto, el significado de la radiación solar sobre la productividad depende de su efecto combinado con la disponibilidad de agua, que está directamente relacionada con el tipo de clima y el valor de radiación solar calculado (mensual o anual).

A nivel global, las variables climáticas fueron las más relevantes para explicar productividad (VIMR acumuladas entre 55 y 67%), lo que concuerda con los resultados obtenidos por ALEGRIA et al (2020) para *E. globulus* en Portugal. Sin embargo, en este estudio obtuvimos mayor relevancia para las variables climáticas invernales (2,6 veces mayor que las variables de verano), mientras que en Portugal la estacionalidad de la temperatura o la temperatura media y máxima del trimestre más cálido fueron las variables más importantes. La razón de tales diferencias puede estar relacionada con la existencia de un importante período de sequía estival en Portugal, a diferencia del norte de España, donde es mucho menor e incluso inexistente. En climas mediterráneos, a excepción de los suelos aluviales, la existencia de períodos de sequía condiciona en gran medida la disponibilidad de agua en el suelo, que se considera el factor más importante que controla la productividad de las plantaciones de eucalipto (PACHECO et al., 1997; DONOSO y RUIZ, 2001). Así, mientras que en los climas mediterráneos las temperaturas estivales y la disponibilidad de agua se convierten en los factores limitantes, en los climas atlánticos las cosas parecen funcionar al revés, ya que las temperaturas invernales y el exceso de lluvia parecen ser los factores limitantes. En especies de hoja perenne como los eucaliptos, las temperaturas suaves y las precipitaciones elevadas y bien distribuidas a lo largo del año propician actividad vegetativa durante todo el año en las zonas costeras del norte de España, por lo que los resultados del modelo indican que a mayor temperatura en esos meses mayor es la actividad fotosintética y, por tanto, la productividad forestal esperada. Por el contrario, una mayor precipitación anual o invernal parece reducir el crecimiento, lo que puede deberse a la lixiviación de nutrientes con las altas precipitaciones y a que las temperaturas invernales no son capaces de sostener la suficiente actividad fotosintética para aprovechar la humedad disponible en el suelo.

Las temperaturas medias de los meses de verano muestran una correlación



positiva con IS, al igual que para los meses de invierno y solamente las temperaturas máximas del mes más cálido mostraron una curva de respuesta unimodal. Este fenómeno se evidenció claramente en las áreas tropicales de Brasil con temperaturas medias promedio de 23,5-23,6 °C y precipitación media de 1.237-1.598 mm (SCOLFORO et al., 2015). En esas condiciones, la transpiración es muy alta durante todo el año y la productividad de la especie está correlacionada positivamente con las variables de precipitación y negativamente correlacionada con las variables de temperatura media o máxima. Por tanto, y de manera similar a lo que ocurre con la radiación solar, el mantenimiento de una alta tasa de crecimiento parece dependiente del efecto combinado de la temperatura y la disponibilidad de agua.

Por otra parte, se ha encontrado que la altitud es un factor muy importante que afecta las tasas de crecimiento de los árboles de las especies forestales cuando el gradiente altitudinal es significativo (p. ej., DAVEL & ORTEGA, 2003; ROMANYÁ & VALLEJO, 2004; PARK et al., 2023) y, de hecho, es la variable individual más condicionante de la productividad del eucalipto en el norte de España, con un efecto de disminución más pronunciado a altitudes superiores a 125-150 m. Estudios previos también han observado un efecto negativo de la altitud en la productividad de la estación de eucalipto en la Península Ibérica (MERINO et al., 2003; PHUONG; 2021). Es bien sabido que la productividad disminuye con la altitud debido a su influencia en la reducción de la temperatura, la humedad del aire y del suelo (menor disponibilidad de agua), la mineralización de los nutrientes del suelo (menor disponibilidad de nutrientes), la duración de la temporada de crecimiento (menor actividad fotosintética) y, al final, una menor productividad (WORREL, 1987).

Algunos autores han encontrado que la productividad de eucalipto presenta una fuerte correlación positiva con la profundidad del suelo (p. ej., DOMINGO-SANTOS et al., 2005; BASELLY-VILLANUEVA et al., 2024) y también una correlación positiva con el contenido en arena del suelo (DOMINGO-SANTOS et al., 2009; DELGADO-CABALLERO et al., 2009), que se ha relacionado con una mejora en el régimen de aireación de los suelos de *E. globulus*, aspecto importante ya que se trata de una especie con una baja tolerancia a los suelos mal drenados (JACOBS, 1981). Sin embargo, en este trabajo observamos una ligera correlación negativa, principalmente para porcentajes de arena superiores al 50%, que puede relacionarse con la baja disponibilidad de nutrientes subyacente de los suelos arenosos y ácidos del norte de España (MERINO et al., 2003) y a la buena aireación del suelo con esos porcentajes tan altos de arena. En cuanto a la litología, el valor medio más alto del índice de sitio se observó en suelos aluviales, otros depósitos indiferenciados y suelos mixtos; por el contrario, el más bajo se localizó en suelos ácidos (lutitas, cuarcitas, cuarzosanditas, granitos y granodioritas). Estos resultados son similares a los obtenidos para el sur de España (DOMINGO-SANTOS et al., 2009) y Portugal (PHUONG, 2021).

Generalmente, a escala de parcela forestal, las variables edáficas suelen ser las más relevantes para la productividad (DOMINGO-SANTOS et al., 2009), como indican las correlaciones altamente significativas encontradas entre la productividad de *E.*



globulus y las concentraciones de nutrientes del suelo (p. ej. MERINO et al., 2003; FABRES et al., 2004). Ello sugiere que la disponibilidad de capas ráster de propiedades físicas (principalmente la profundidad del suelo) y químicas a una escala más fina probablemente mejoraría la precisión en las estimaciones de productividad.

5.2. Efecto previsto del cambio climático en la productividad

De manera similar al aumento del hábitat óptimo pronosticado para la especie para los escenarios RCP 4.5 y 8.5 (LÓPEZ-SÁNCHEZ et al., 2021), este trabajo también predice un aumento en la productividad para los mismos escenarios. Se sugieren dos explicaciones para ello: i) hay hasta seis variables climáticas en el modelo SI250 (sin considerar la altitud como variable explicativa) relacionadas con la productividad del eucalipto, y ii) su contribución conjunta es alta, representando el 63,41% de la importancia relativa total. Al analizar los efectos del cambio climático desde un punto de vista espacial, se puede observar que no se producen ganancias de productividad en lugares donde la especie ya crece cerca de sus temperaturas óptimas en ausencia de períodos de sequía (BOOTH, 2013), o incluso se observan pérdidas significativas, ya que los impactos del cambio climático sobre la productividad son muy específicos de cada estación y dependerán en parte del equilibrio entre los efectos combinados del aumento de las temperaturas y la disminución de las precipitaciones (ALMEIDA et al., 2009).

5.3. Limitaciones y mejoras futuras

Existen numerosos factores que impiden obtener estimaciones más precisas de la productividad. Según su origen, las hemos clasificado en tres grupos: i) factores de gestión; ii) factores operativos; y iii) factores naturales. El primer grupo se refiere a aspectos de gestión como la mejora genética, la coexistencia de rodales gestionados y no gestionados y entre masas procedentes de brinzal y de chirpial. Así, las altas tasas de crecimiento y los bajos turnos de corta han permitido la rápida introducción de nuevos clones o brinzales mejorados genéticamente que han contribuido a incrementar la productividad hasta en un 60% en las últimas décadas (TOMÉ et al., 2021), y las altas intensidades de gestión también aumentan significativamente la productividad (p. ej., FABRES et al., 2004; VIERA et al., 2016; RIBAS-COSTA et al., 2024). Por otro lado, las masas procedentes de chirpial y de brinzal presentan diferentes patrones de crecimiento, observándose en *E. globulus* un crecimiento en el segundo turno (primera corta después del rebrote) un 25% mayor que el primero, y en el tercero un crecimiento similar al primero (DÍAZ-BALTEIRO et al., 2005; TOMÉ et al., 2021). Por lo tanto, considerando que nuestros modelos de productividad se refieren solamente a masas de monte alto (primer turno), la coexistencia de los dos métodos de establecimiento de las masas aumenta la inexactitud y el sesgo de las predicciones cuando se mapea la productividad en zonas ya pobladas por plantaciones de eucalipto.

Recientemente, RIBAS-COSTA et al. (2024) han demostrado que el conocimiento de factores de gestión (por ejemplo, material genéticamente mejorado o fertilización)



es clave para mejorar la precisión en la estimación de la productividad forestal en masas de *Pinus taeda* en los EE. UU. Sin embargo, a gran escala, el uso espaciotemporal del material de reproducción, las técnicas de preparación del terreno, la fertilización u otras operaciones culturales suelen ser desconocidas y están embebidas en los datos, lo que añade más incertidumbre a la estimación de la productividad. Este tema representa un desafío muy difícil de superar y afecta a los modelos de tres maneras diferentes: i) aumentando la variabilidad no relacionada con la estación y, por lo tanto, disminuyendo la precisión en el ajuste de los modelos; ii) aumentando los errores esperados de las predicciones de los modelos cuando se aplican a nuevas plantaciones con material genético aún no utilizado; y iii) reduciendo la vida útil de los modelos construidos, lo que hace necesario ajustar nuevos modelos después de no más de uno o dos turnos.

Una de las principales limitaciones operativas se refiere a la disponibilidad de datos ambientales. Así, la resolución espacial de las capas disponibles actualmente sobre variables edáficas sigue siendo insuficiente para desarrollar modelos de productividad de alta resolución espacial.

En cuanto a los factores naturales, la disminución en la productividad de algunas masas debido al efecto pasado de plagas y/o enfermedades está encapsulada en los datos. Este hecho aumenta artificialmente la variabilidad del IS, reduciendo su precisión. Este factor no debe subestimarse, ya que los episodios de daños severos por hongos foliares *Mycosphaerella* sp. (p. ej., PÉREZ et al., 2016) y/o insectos defoliadores como *Gonipterus platensis* (p. ej., ADAME et al., 2022) son bastante comunes en la región de estudio y, además, la salud de las plantaciones se considera uno de los factores más importantes para explicar la productividad actual del eucalipto en España (VIERA et al., 2016).

Como mejora futura, se tratará de desarrollar capas ráster de variables edáficas con resoluciones espaciales superiores a 100 m píxel⁻¹ para su uso como variables independientes en los modelos. Para ese propósito, hemos recopilado durante los últimos años más de 1.500 muestras de suelo geolocalizadas procedentes de diferentes fuentes en el norte de España.

6. Conclusiones

En este estudio, hemos utilizado la información ambiental espacialmente continua disponible para explorar la construcción de modelos de productividad para plantaciones de eucalipto. Nuestros hallazgos han demostrado que, con las capas ráster de variables del terreno, climáticas y litológicas actualmente disponibles, es posible su escalamiento ascendente (agregación) o descendente (desagregación), permitiendo obtener estimaciones de productividad razonablemente precisas e insesgadas a resoluciones espaciales de 10 a 250 m píxel⁻¹. El grupo de variables climáticas, en particular las temperaturas de los meses de invierno, fueron las que más peso tuvieron a la hora de explicar la productividad. Dentro de las características del terreno, la altitud fue el factor más influyente. Las productividades más altas se producen principalmente en zonas de



baja altitud con temperaturas más altas y radiación solar otoñal media (que permiten una mayor actividad fotosintética) y una menor precipitación anual o invernal que causa una menor lixiviación de nutrientes en el suelo. Se encontraron fuertes relaciones lineales entre altitud, temperaturas y productividad con disminuciones de entre 1-1,3 m³ha⁻¹año⁻¹ por cada 100 m de ascenso en altitud y alrededor de 3 m³ha⁻¹año⁻¹ por cada grado Celsius de descenso en la temperatura media. Se espera que el cambio climático produzca a un aumento en la productividad de las plantaciones de *E. globulus* para 2050 y 2070. Los mapas de productividad construidos en este estudio son herramientas valiosas en diferentes niveles de gestión y planificación. Así, el mapa de alta resolución espacial es una herramienta operativa a escala de parcela forestal que permitirá a los gestores y propietarios forestales predecir el crecimiento y la producción con una precisión razonable, lo que les permitirá seleccionar las mejores estaciones para la plantación. Además, también puede servir como una capa de entrada de información para cualquier otro estudio ecológico o forestal. Por otra parte, a escala del paisaje, los mapas proporcionarán apoyo a los planificadores territoriales y/o políticos para la toma de decisiones a nivel estratégico o táctico sobre la planificación sostenible de los recursos forestales en el contexto del cambio climático. La disponibilidad futura de información ambiental espacialmente continua más detallada permitirá obtener estimaciones de productividad más precisas, aunque la comentada dificultad de superar los factores no relacionados con la estación que afectan a la productividad limitará enormemente el margen de mejora.

7. Agradecimientos

Esta investigación ha sido posible gracias al proyecto de investigación PID2020-112839RB-I00 financiado por la Agencia Estatal de Investigación (AEI) del Ministerio de Ciencia e Innovación (MCIN/AEI/10.13039/501100011033). Mientras realizaba el presente estudio, el primer autor disfrutó de un contrato Severo Ochoa del Gobierno de del Principado de Asturias-FICYT (código BP21-125). Los autores desean agradecer el apoyo de la compañía ENCE Energía & Celulosa por proporcionar una base de datos muy relevante con valores de índice de sitio.

8. Bibliografía

ADAME, P.; ALBERDI, I.; CAÑELLAS, I.; HERNÁNDEZ, L.; AGUIRRE, A.; RUANO, A.; MORENO-FERNÁNDEZ, D.; GONZÁLEZ, A.I.; TORRES, M.B.; MONTES, F.; 2022. Drivers and spread of non-native pests in forests: The case of *Gonipterus platensis* in Spanish *Eucalyptus* plantations. For. Ecol. Manage. 510, 120104.

AERTSEN, W.; KINT, V.; VAN ORSHOVEN, J.; ÖZKAN, K.; MUYS, B.; 2010. Comparison and ranking of different modelling techniques for prediction of site index in Mediterranean mountain forests. Ecol. Mod. 221, 1119–1130.

ALEGRIA, C.; ROQUE, N.; ALBUQUERQUE, T.; GERASSIS, S.; FERNANDEZ, P.;



RIBEIRO, M.M.; 2020. Species ecological envelopes under climate change scenarios: A case Study for the main two wood-production forest species in Portugal. *Forest* 11(8), 880.

ALMEIDA, A.C.; SANDS, P.J.; BRUCE, J.; SIGGINS, A.W.; LERICHE, A.; BATTAGLIA, M.; BATISTA, T.R.; 2009. Use of a spatial process-based model to quantify forest plantation productivity and water use efficiency under climate change scenarios. In: 1st World IMACS/MODSIM Congress, Cairns, Australia, 13–17 July, 2009.

BALLABIO, C.; PANAGOS, P.; MONTANARELLA, L.; 2016. Mapping topsoil physical properties at European scale using the LUCAS database. *Geoderma* 261, 110–123.

BARRIO-ANTA, M.; CASTEDO-DORADO, F.; CÁMARA-OBREGÓN, A.; LÓPEZ-SÁNCHEZ, C.A.; 2020. Predicting current and future suitable habitat and productivity for Atlantic populations of maritime pine (*Pinus pinaster* Aiton) in Spain. *Ann. For. Sci.* 77, 41.

BASELLY-VILLANUEVA, J.R.; MARCELO BAZÁN, F.E.; GOYCOCHEA CASAS, G.; LOZANO LOZANO, A.I.; CASTEDO-DORADO, F.; ALVAREZ-ÁLVAREZ, P.; 2024. Relación de los factores ambientales con la productividad de *Eucalyptus globulus* en los Andes norperuanos. *Bosque* 45(1), 103–118.

BJELANOVIC, I.; COMEAU, P.G.; WHITE, B.; 2018. High resolution site index prediction in boreal forests using topographic and wet areas mapping attributes. *Forests* 9, 113.

BOOTH, T.H.; 2013. Eucalypt plantations and climate change. *For. Ecol. Manage.* 301, 28–34.

BONTEMPS, J.D.; BOURIAUD, O.; 2014. Predictive approaches to forest site productivity: recent trends, challenges and future perspectives. *Forestry* 87(1), 109–128.

BRAGA, F.A.; BARROS, N.F.; SOUZA, A.L.; COSTA, M.L.; 1999. Características ambientais determinantes da capacidade produtiva de sítios cultivados com eucalipto. *R. Bras. Ci. Solo* 23, 291–298.

BREIMAN, L.; 2001. Random forests. *Mach. Learn.* 45 (1), 5–32.

CASTAÑO-SANTAMARÍA, J.; LÓPEZ-SÁNCHEZ, C.A.; OBESO, J.R.; BARRIO-ANTA, M.; 2019. Modelling and mapping beech forest distribution and site productivity under different climate change scenarios in the Cantabrian Range (North-western Spain). *For. Ecol. Manag.* 450, 117488.



CHOUNDHURY, P.; ALLEN, R.T.; ENDRES, M.G.; 2020. Machine learning for pattern discovery in management research. *Strat. Magmt. J.*, 42: 30–57.

CLUTTER, J.; FORTSON, J.; PIENAAR, L.; BRISTER, H.; BAYLEY, R.; 1983. *Timber management: a quantitative approach*. Wiley, New York

DAVEL, M.; ORTEGA, A.; 2003. Predicting site index from environmental variables in Douglas-fir plantations in the Patagonian Andes, Argentina. *Bosque*, 24(1): 55–69.

DELGADO-CABALLERO, C.E.; GÓMEZ-GUERREO, A.; VALDEZ-LAZALDE, J.R.; SANTOS-POSADAS, H.; FIERROS-GONZÁLEZ, A.M.; HORWATH, W.R.; 2009. Site index and soil properties in young plantations of *Eucalyptus grandis* and *E. urophylla* in Southeastern Mexico. *Agrociencia*, 43 (1): 61–72.

DÍAZ-BALTEIRO, L.; RODRÍGUEZ, L.C.E.; 2005. Análisis dinámico del turno óptimo en eucaliptares. Aplicación a plantaciones de España y Brasil. En: *Actas del IV Congreso Forestal Español*, Zaragoza, España, 26–30 septiembre 2005.

DÍAZ-BALTEIRO, L.; BERTOMEU, M.; BERTOMEU, M.; 2009. Optimal harvest scheduling in *Eucalyptus* plantations: A case study in Galicia (Spain). *Forest Policy Econ.* 11, 548–554.

DIÉGUEZ-ARANDA, U.; ROJO ALBORECA, A.; CASTEDO-DORADO, F.; ÁLVAREZ GONZÁLEZ, J.G.; BARRIO-ANTA, M.; CRECENTE-CAMPO, F.; GONZÁLEZ GONZÁLEZ, J.M.; PÉREZ-CRUZADO, C.; RODRÍGUEZ SOALLEIRO, R.; LÓPEZ-SÁNCHEZ, C.A.; BALBOA-MURIAS, M.A. GORGOSO VARELA, J.J.; SÁNCHEZ RODRÍGUEZ, F.; 2012. Herramientas selvícolas para la gestión forestal sostenible en Galicia. Actualización de modelos disponibles a fecha de 29/10/2012. Xunta de Galicia.

DOMINGO-SANTOS, J.M.; LÓPEZ-HERNÁNDEZ, A.V.; CORRAL PAZOS DE PROVENS, E.; SEVILLA SÁNCHEZ, J.; RUIZ FERNÁNDEZ, F.; LAGO MACÍA, J.; 2009. Calidad de estación de eucalipto y factores edafoclimáticos en la provincia de Huelva. 5º Congreso Forestal Español, Ávila 21 al 25 de septiembre de 2009.

DONOSO, S.; RUIZ, F.; 2001. Potencial hídrico y crecimiento de *Eucalyptus globulus* plantado a diferentes espaciamientos en la Provincia de Huelva, España. *Bosque* 22(1), 37–44.

FABRES, A.S.; RAFAEL, J.; BORRALHO, N.; FERREIRA, D.; BARROCAS, H.; 2004. Soil fertility evaluation for *Eucalyptus globulus* in Portugal: Establishment and maintenance critical levels of phosphorus, potassium, calcium and magnesium. En: Borralho, N. et al.; 2004. *Eucalyptus in a changing world*. Proceedings of IUFRO



Conference, Aveiro, pp. 551-559

FONTES, L.; TOMÉ, M.; THOMPSON, F.; YEOMANS, A.; SALES, J.; SAVILL, P.; 2003. Modelling the Douglas-fir (*Pseudotsuga menziesii* (Mirb.) Franco) site index from site factors in Portugal. *Forestry* 76, 491–507.

GAO, W.; DONG, C.; GONG, Y.; MA, S.; SHEN, J.; LIN, S.; 2023. Site quality evaluation model of Chinese fir plantations for machine learning and site factors. *Sustainability*, 15, 15587.

GARCÍA-MANTECA, P.; MARQUÍNEZ, J.; MENÉNDEZ-DUARTE, S.; LÓPEZ-SÁNCHEZ, C.; BARRIO-ANTA, M.; 2023. Aproximación a un mapa de clases litológicas de interés forestal en Galicia y la Cornisa Cantábrica. Instituto de Recursos Naturales y Ordenación del Territorio de Asturias, Universidad de Oviedo.

GARCÍA-VILLABRILLE, J.D.; 2015. Modelización del crecimiento y la producción de plantaciones de *Eucalyptus globulus* Labill. en el noroeste de España. Doctoral Thesis. University of Santiago de Compostela.

GONÇALVES, C.I.; VILAS-BOAS, L.; BRANCO, M.; REZENDE, G.D.; VALENTE, C.; 2019. Host susceptibility to *Gonipterus platensis* (Coleoptera: Curculionidae) of Eucalyptus species. *Ann. For. Sci.* 76, 63.

HARRIS, R.M.B.; GROSE, M.R.; LEE, G.; BINDOFF, N.L.; PORFIRIO, L.L.; FOX-HUGHES, P.; 2014. Climate projections for ecologists. *Wiley Interdiscip. Rev. Clim. Change* 5, 621–637.

HENGL, T.; MENDES DE JESUS, J.; HEUVELINK, G.B.M.; RUIPEREZ GONZALEZ, M.; KILIBARDA, M.; BLAGOTIC, A.; SHANGGUAN, W.; WRIGHT, M.N.; GENG, X.; BAUER-MARSCHALLINGER, B.; GUEVARA, M.A.; VARGAS, R.; MACMILLAN, R.A.; BATJES, N.H.; LEENARS, J.G.B.; RIBEIRO, E.; WHEELER, I.; MANTEL, S.; KEMPEN, B.; 2017. SoilGrids250m: global gridded soil information based on machine learning. *PloS ONE* 12 (2), e0169748.

HIJMANS, R.J.; CAMERON, S.E.; PARRA, J.L.; JONES, P.; JARVIS, A.; 2005. Very high resolution interpolated climate surfaces for global land areas. *Int. J. Climatol.* 25, 1965–1978.

IGME, 2015. Mapa Geológico de España a escala 1:200000. Instituto Geológico y Minero de España, Ministerio de Ciencia, Innovación y Universidades. Madrid.

IPCC, 2013. Climate Change 2013: The physical science basis. Contribution of working group I to the fifth assessment report of the Intergovernmental Panel of



Climate Change. Cambridge University Press. Cambridge, New York.

JACOBS, M.R.; 1981. *Eucalyptus globulus* Labill. ssp. *globulus*. In: *Eucalypts for planting*. Segunda Edición, Pp. 412-419, FAO forestry series 11. Roma.

LATTA, G.; TEMESGEN, H.; BARRETT, T.M.; 2009. Mapping and imputing potential productivity of Pacific northwest forests using climate variables. *Can. J. For. Res.* 39, 1197–1207.

LÓPEZ-SÁNCHEZ, C.A.; CASTEDO-DORADO, F.; CÁMARA-OBREGÓN, A.; BARRIO-ANTA, M.; 2021. Distribution of *Eucalyptus globulus* Labill. in northern Spain: contemporary cover, suitable habitat and potential expansion under climate change. *For. Ecol. Manag.* 481, 118723.

MCKENNEY, D.W.; PEDLAR, J.H.; 2003. Spatial models of site index based on climate and soil properties for two boreal tree species in Ontario, Canada. *For. Ecol. Manage.* 175, 497–507.

MAPA, 2019. Actualización del cuarto inventario forestal español. Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación. Gobierno de España (Disponible para investigadores bajo solicitud).

MARTÍN GIL, A.; MANSILLA VÁZQUEZ, J.P.; PÉREZ OTERO, R.; 2018. Guía de gestión integrada de plagas de eucalipto. Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación, 83 pp., Madrid.

MERINO, A.; RODRÍGUEZ LÓPEZ, A.; BRAÑAS, J.; RODRÍGUEZ-SOALLEIRO, R.; 2003. Nutrition and growth in newly established plantations of *Eucalyptus globulus* in northwestern Spain. *Ann. For. Sci.* 60, 509–517.

MITECO, 2023. Anuario de estadística Forestal. Gobierno de España. Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico.

MOLINA-VALERO, J.A.; DIÉGUEZ-ARANDA, U.; ÁLVAREZ-GONZÁLEZ, J.G.; CASTEDO-DORADO, F.; PÉREZ-CRUZADO, C.; 2019. Assessing site form as an indicator of site quality in even-aged *Pinus radiata* D. Don stands in north-western Spain. *Ann. For. Sci.* 76, 113.

NICOLÁS, J.L.; IGLESIAS, S.; 2012. Normativa de comercialización de los materiales forestales de reproducción. En: PEMÁN, J.; NAVARRO, R.M.; NICOLÁS, J.L.; PRADA, M.A.; SERRADA, R. (Coord.). Producción y manejo de semillas y plantas forestales. Tomo I. Organismo Autónomo de Parque Nacionales. Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente, Pp. 3-41.



NINYEROLA, M.; PONS, X.; ROURE, J.M.; 2005. Atlas Climático Digital de la Península Ibérica. Metodología y Aplicaciones en Bioclimatología y Geobotánica, Universidad Autónoma de Barcelona: Bellaterra, España.

PACHECO, C.A.; TOMÉ, M.; DELGADO, J.; SILVA, P.O.; TOMÉ, J.; 1997. Pattern of water extraction, water availability and growth in young *E. globulus* planted with different spacing. Proceedings of the IUFRO Conference on Silviculture and Improvement of *Eucalyptus*. Salvador, Brazil. Vol 4, 188–195.

PANAGOS, P.; VAN LIEDEKERKE, M.; JONES, A.; MONTANARELLA, L.; 2012. European Soil Data Centre: response to European policy support and public data requirements. Land Use Policy 29, 329–338.

PARK, S.; YANG, A-R.; KIM, E-H.; LIM, J.; 2023. Model development to estimate site index values for six major tree species in North Korea. J. For. Res. 34, 387–400.

PÉREZ, S.; RENEDO, C.; ORTIZ, A.; ORTIZ, F.; TEJEDOR, C.; 2016. Strategies to combat *Mycosphaerella* leaf disease in *Eucalyptus globulus* plantations in northern Spain. Forests 7(9), 190.

PHUONG, N.T.; 2021. Estimation of site index from environmental variables for eucalypt stands in Portugal. Lisboa: ISA-Universidade de Lisboa, Dissertação de Mestrado.

RIESCO, G.; 2004. Forest management in *Eucalyptus* stands: The Spanish case. In International IUFRO Meeting of the WP4.04.06 on planning and economics of fast-growing plantation forests. The economics and management of high productivity plantations, Lugo, Galicia (Spain), 27–30 September 2004. Editado por ÁLVAREZ GOZÁLEZ, J.G.; GOULDING, C.; ROJO, A.; RODRÍGUEZ, R.; ZORALIOGLU, T.; RUIZ, A.D.; Universidad de Santiago de Compostela, España.

RIBAS-COSTA, V.A.; GASTÓN, A.; BLOSZIES, S.A.; HENDERSON, J.D.; TRLICA, A.; CARTER, D.R.; RUBILAR, R.; ALBAUGH, T.J.; COOK, R.L.; 2024. Nature vs. nurture: drivers of site productivity in loblolly pine (*Pinus taeda* L.) forests in the southeastern US. For. Ecol. Manage. 572, 122334.

ROMANYÀ, J.; VALLEJO, V.R.; 2004. Productivity of *Pinus radiata* plantation in Spain in response to climate and soil. For. Ecol. Manage. 195, 177–189.

RUIZ, F.; LÓPEZ, G.; TOVAL, G.; ALEJANO, R.; 2008. Selvicultura de *Eucalyptus globulus* Labill. En: SERRADA, R.; MONTERO, G.; REQUE, J.A.; (eds). Compendio de selvicultura aplicada en España. INIA, Madrid, España, pp., 117–154



SCOLFORO, H.F.; NETO, F.C.; SCOLFORO, J.R.S.; BURKHART, H.; McTAGUE, J.P.; RAIMUNDO, M.R.; LOOS, R.A.; FONSECA, S.; SARTÓRIO, R.C.; 2015. Modeling dominant height growth of eucalyptus plantations with parameters conditioned to climatic variations. *For. Ecol. Manage.* 380, 182–195.

SKOVSGAARD, J.P.; VANCLAY, J.K.; 2008. Forest site productivity: a review of the evolution of dendrometric concepts for even-aged stands. *Forestry* 81, 13–31.

SKOVSGAARD, J.P.; VANCLAY, J.K.; 2013. Forest site productivity: a review of spatial and temporal variability in natural site conditions. *Forestry* 86, 305–315.

TOMÉ, M.; ALMEIDA, M.H.; BARREIRO, S.; BRANCO, M.R.; DEUS, E.; PINTO, G.; SILVA, J.S.; SOARES, P.; RODRÍGUEZ-SOALLEIRO, R.; 2021. Opportunities and challenges of Eucalyptus plantations in Europe: the Iberian Peninsula experience. *Eur. J. Forest Res.* 140, 489–510.

THOMSON, A.M.; CALVIN, K.V.; SMITH, S.J.; KYLE, G.P.; VOLKE, A.; PATEL, P.; DELGADO-ARIAS, S.; BOND-LAMBERTY, B.; WISE, M.A.; CLARKE, L.E.; EDMONDS, J.A. 2011. RCP 4.5: a pathway for stabilization of radiative forcing by 2100. *Clim Change* 109:77–94.

VIERA, M.; RUIZ FERNÁNDEZ, F.; RODRÍGUEZ-SOALLEIRO, R.; 2016. Nutritional Prescriptions for *Eucalyptus* Plantations: Lessons Learned from Spain. *Forests* 7(4): 84.

WORRELL, R.; 1987. Geographical variation in Sitka spruce productivity and its dependence of environmental factor. Doctoral thesis, Department of Forestry and Natural Resources. University of Edinburgh. Ireland

XENAKIS, G.; RAY, D.; MENCUCCINI, M.; 2012. Effects of climate and site characteristics on Scots pine growth. *Eur. J. Forest. Res.* 131, 427–439.