



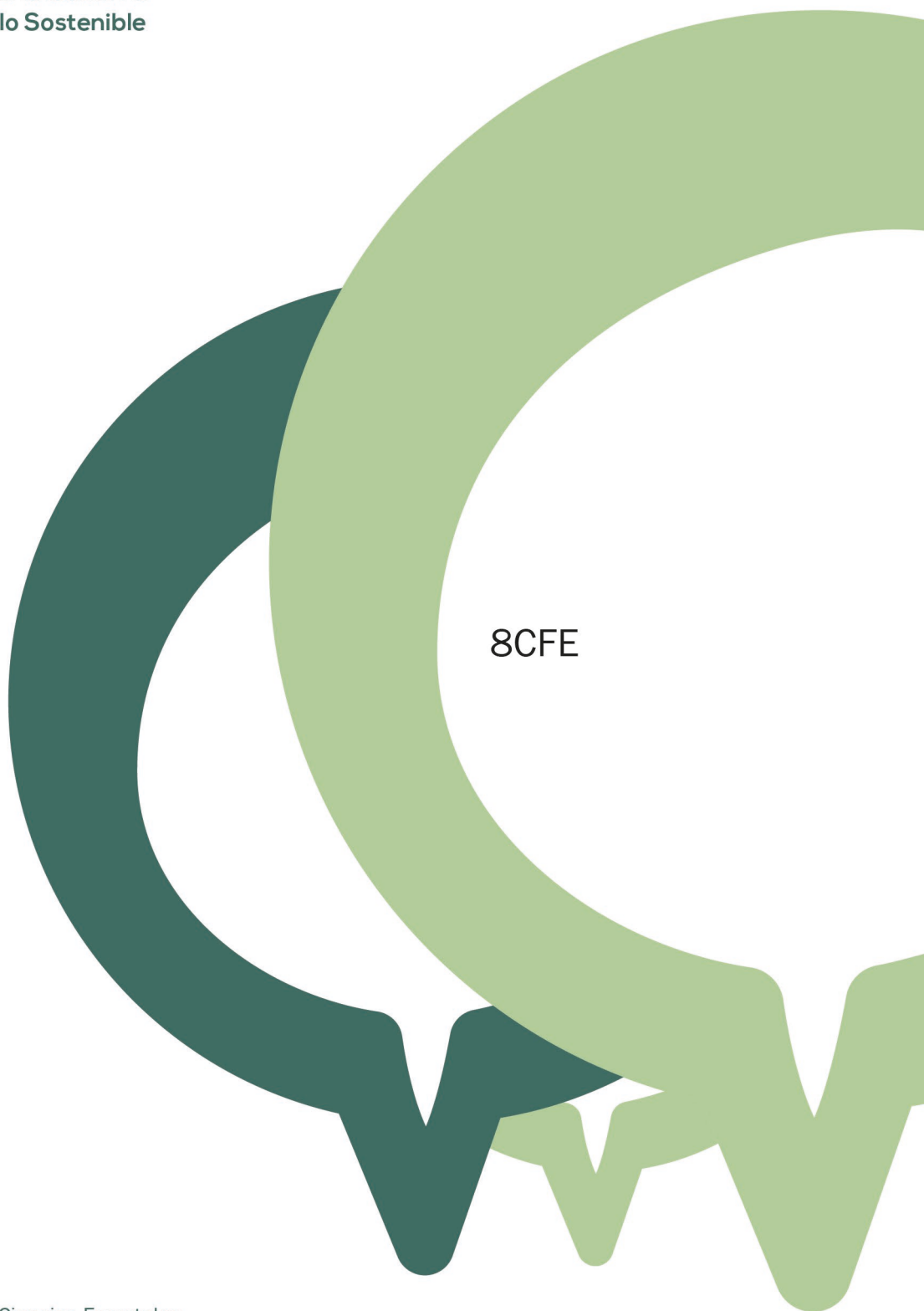
2022  
Lleida

27·1  
junio · juny  
julio · juliol

Cataluña  
Catalunya

## 8º CONGRESO FORESTAL ESPAÑOL

La **Ciencia forestal** y su contribución a los **Objetivos de Desarrollo Sostenible**



8CFE

Edita: Sociedad Española de Ciencias Forestales

**Cataluña | Catalunya · 27 junio | juny - 1 julio | juliol 2022**

**ISBN 978-84-941695-6-4**

© Sociedad Española de Ciencias Forestales

Organiza



## ***Eucalyptus globulus* Labill. en el Norte de España: análisis de la superficie ocupada y su evolución, hábitat óptimo y expansión potencial bajo escenarios de cambio climático**

LÓPEZ-SÁNCHEZ, C.A<sup>1.</sup>, CASTEDO-DORADO, F.<sup>2.</sup>, CÁMARA-OBREGÓN, A<sup>1.</sup> y BARRIO-ANTA, M.<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 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

<sup>2</sup> Departamento de Ingeniería y Ciencias Agrícolas. Escuela de Ingeniería Agrícola y Forestal. Universidad de León, Campus de Ponferrada, Avda. de Astorga S/N, 24400 Ponferrada.

### **Resumen**

El objetivo de este trabajo ha sido analizar la evolución de la superficie de las plantaciones de *Eucalyptus globulus* en el norte de España (Galicia, Asturias, Cantabria y Euskadi) y predecir el área de expansión potencial actual y futura según coberturas de uso del suelo. Para ello se usaron datos de presencia de la especie obtenidos del IFN3 y datos de coberturas del suelo de Corine Land Cover de 2018. Los resultados muestran que el área ocupada por *E. globulus* se ha multiplicado por 4,6 en los últimos 50 años, representado actualmente un 18,2% de la superficie arbolada en la zona estudiada. Para elaborar un modelo de hábitat óptimo, se utilizó la información ambiental espacialmente continua disponible hasta la fecha, y tras probar varios algoritmos, se seleccionó Random Forest como el mejor método. Las proyecciones futuras predicen un incremento significativo del hábitat óptimo en áreas interiores de Galicia y una moderada reducción en las otras tres comunidades. Actualmente hay, dentro del hábitat óptimo de la especie, 824.977 ha de terreno forestal disponible que pueden ser usadas para la expansión del eucalipto (con incremento futuro), de las cuales 311.989 ha están actualmente ocupadas por bosques de frondosas autóctonas que deberán ser protegidos.

### **Palabras clave**

Eucalipto blanco, superficie ocupada, modelo de distribución de especies, variables ambientales, random forest, cambio climático.

### **1. Introducción**

El género eucalipto fue introducido en Europa, con fines principalmente ornamentales, a finales del siglo XVIII (Jacobs, 1981; Silva-pando & Pino-Pérez, 2016). No obstante, su adaptación a las condiciones ecológicas del sur de Europa, sus altas tasas de crecimiento y los múltiples usos que se vieron para su madera, propiciaron que a lo largo de todo el siglo XIX fuese ya frecuente su plantación sobre terrenos forestales. Sin embargo, la gran aceleración de su expansión se produjo a partir de la segunda mitad del siglo XX debido al descubrimiento en Portugal de que su madera era excelente materia prima para producir pasta de papel (Bermúdez et al., 2002; Alegría et al., 2020). Hoy en día las plantaciones de eucalipto ocupan en el sur de Europa una superficie aproximada de 1,3 millones de hectáreas, principalmente en la Península Ibérica (más del 80%), aunque también en Francia e Italia (CERASOLI et al., 2016), lo que supone multiplicar por cuatro la superficie existente en 1970 (DEUS et al., 2018).

Actualmente *E. globulus* se extiende por las áreas costeras de las cuatro comunidades autónomas cantábricas (Galicia, Asturias, Cantabria y Euskadi). Según los datos actualizados del cuarto Inventario Forestal Nacional (IFN4.5 en adelante), la especie ocupa 389.034 ha, que representa el 11% de la superficie forestal de la región (MAPA, 2019a). Es la especie forestal de crecimiento rápido más abundante en España y también es la de más importancia comercial, con unas cortas anuales medias durante el período 2005-2016, de más de 4,9 millones de m<sup>3</sup>, lo que

representa el 54% de las cortas totales de madera en las citadas cuatro regiones y un 34% del total de cortas de madera anuales del país (MAPA, 2019b).

Las plantaciones de esta especie están sujetas a una importante controversia: i) por un lado han sido promovidas por propietarios particulares y compañías de pasta de papel por sus elevadas tasas de crecimiento (GARCÍA-VILLABRILLE, 2015; VIERA et al., 2016) y capacidad de generación de empleo y bienestar en el medio rural, y por otro, ii) han sido duramente criticadas por los conservacionistas por sus potenciales impactos negativos sobre los ecosistemas naturales. Hasta la fecha, diferentes estudios han analizado los efectos de estas plantaciones sobre el medio natural (e.g. POORE & FRIES, 1985; CALVO DE ANTA, 1992; CASTRO-DÍEZ et al., 2012; BAYLE, 2019; GODED et al., 2019); sin embargo, la controversia respecto a los tipos de impacto negativo y su magnitud sigue sin resolverse debido a que estos son muy dependientes del contexto particular de las plantaciones (DEUS et al., 2018).

No obstante, la alta rentabilidad de las plantaciones de eucalipto ha propiciado que algunos propietarios particulares hayan cortado rodales de frondosa autóctona para su posterior plantación con eucalipto. Este cambio de uso del monte está prohibido por las leyes forestales de las distintas regiones; sin embargo, ocurre debido a la falta de recursos para su control por parte de las Administraciones Forestales. Esta sustitución de masas autóctonas por plantaciones de eucalipto está asociada con dos importantes impactos ambientales (MONTERO DE BURGOS, 1990; VEIRAS y SOTO, 2011): i) eliminación de masas forestales mucho más diversas que las plantaciones de eucalipto y que pueden actuar como corredores ecológicos conectando áreas de alta biodiversidad y ii) la eventual creación de grandes superficies de eucalipto, que pueden amplificar los impactos negativos de estas plantaciones. La creación de grandes superficies continuas aumenta mucho también los riesgos bióticos, abióticos y financieros, por lo que desde esta perspectiva deberían también evitarse (FREER-SMITH et al., 2019).

*Eucalyptus globulus* es una especie flexible en relación con las características del suelo y del clima. En su área natural en Australia, las zonas más adecuadas para la especie se caracterizan por presentar climas templados con una precipitación media anual mayor de 400–500 mm y con una estación seca de hasta tres meses, pero no severa ya que esta especie es bastante sensible a la sequía (JACOBS, 1981; WHITEHEAD & BEADLE, 2004). Aunque la gran expansión de la especie a lo largo del mundo ha incrementado inevitablemente el rango de condiciones ambientales; en relación con la precipitación y la temperatura, la mayoría de las plantaciones se han instalado en regiones con una precipitación mayor de 500–600 mm/año y una temperatura media anual de  $14 \pm 4$  °C (e.g., POHJONEN & PUKKALA, 1990; GELDRES & SCHLATER, 2004; WANG & BAKER, 2007; HARPER et al., 2009; CERASOLI et al., 2016; ALEGRIA et al., 2020). Además de ausencia de sequía severa, las zonas objeto de plantación no deben ser propensas a las heladas ya que temperaturas por debajo de -5°C llegan a causar hasta un 50% de mortalidad de los tejidos vivos (ALMEIDA et al., 1994).

El aumento de las concentraciones atmosféricas de CO<sub>2</sub> y otros gases de efecto invernadero está acelerando el cambio climático y está ya afectando al crecimiento y la supervivencia de las especies vegetales (su abundancia y distribución geográfica), pero también está provocando cambios en las tasas fotosintéticas y en la eficiencia del uso del agua (BOOTH, 2012). De hecho, según las proyecciones del modelo CMIP5 del Panel Intergubernamental de Cambio Climático, las regiones del norte de España sufrirán un aumento gradual de la temperatura media anual de entre 1,3 y 2,5 °C junto con una disminución de la precipitación anual de entre 68 y 142 mm. Un clima cambiante también puede aumentar la incidencia de muchas de las amenazas que afectan a los bosques, como plagas y enfermedades, especies invasoras, incendios forestales o tormentas y sequías (DALE et al., 2001). Por tanto, es muy importante llevar a cabo análisis cuantitativos del hábitat potencial de las especies forestales y los cambios esperados bajo distintos escenarios de cambio climático. Este tipo de análisis es aún más importante en el caso de especies forestales exóticas de crecimiento rápido

como los eucaliptos, ya que el hábitat óptimo potencial actual o futuro puede estar ya cubierto por bosques autóctonos o estar dentro de Espacios Naturales Protegidos (ENP) y puede, por tanto, generar importantes conflictos.

El hábitat óptimo de una especie vegetal es la zona o región geográfica donde la especie está actualmente presente o potencialmente puede estarlo y los modelos matemáticos utilizados para predecirlo en función de variables ambientales se conocen como Modelos de Distribución de Especies, SDMs (GUISAN & ZIMMERMANN, 2000, BOOTH et al., 2014). Como consecuencia del uso de variables climáticas como predictores, los SDMs se consideran una herramienta adecuada para predecir el hábitat potencial futuro de las especies forestales bajo diferentes escenarios de cambio climático. No obstante, este tipo de modelización de la distribución ha sido criticado por usar sólo variables abióticas y omitir otras variables explicativas importantes para la regeneración de las especies vegetales como las interacciones bióticas, las limitaciones a la regeneración y la capacidad adaptativa (por ejemplo, PEARSON & DAWSON, 2003. SINCLAIR et al., 2010). Sin embargo, en el presente estudio muchas de estas limitaciones tienen poca importancia, ya que se trata de una especie plantada por el hombre, cuya distribución no depende de su capacidad de dispersión natural y porque las operaciones de cultivo reducen las interacciones competitivas negativas con otras especies y promueven las positivas (DEUS et al., 2018).

## 2. Objetivos

El objetivo principal de este trabajo ha sido analizar la cubierta actual de *E. globulus* en el norte de España y desarrollar un modelo de distribución para predecir el hábitat potencial actual y futuro para la especie bajo diferentes escenarios de cambio climático. Se establecieron los siguientes objetivos específicos: (i) determinar la presencia actual de *E. globulus* en toda el área de estudio y dentro de los ENP; (ii) desarrollar un SDM y un mapa espacialmente continuo de hábitat óptimo basado en las variables ambientales actuales; (iii) hacer proyecciones futuras del modelo basadas en diferentes escenarios de cambio climático; y (iv) examinar el solapamiento entre el hábitat óptimo actual y futuro de *E. globulus* sobre bosques autóctonos y otras áreas naturales y seminaturales y ENP bajo cambio climático.

## 3. Metodología

### 3.1. Área de estudio

El área de estudio abarca cuatro comunidades autónomas del norte de España: Galicia, Asturias, Cantabria y Euskadi. Las plantaciones de *E. globulus* están presentes principalmente en la región biogeográfica eurosiberiana que se extiende a lo largo del litoral del norte de España. La geomorfología 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 11,5-14,5 °C) y precipitaciones que se distribuyen de manera bastante uniforme a lo largo del año, a menudo superiores a los 1000 mm por año (NICOLÁS e IGLESIAS, 2012). Geológicamente, en el eje central predominan las rocas paleozoicas antiguas (calizas carboníferas, pizarra, carbón, conglomerados, cuarcitas y areniscas), flanqueadas por rocas mesozoicas (calizas, dolomitas y areniscas) y terciarias en las montañas bajas de la parte oriental del País Vasco (IGME, 2015a).

### 3.2. Datos usados

La información sobre la presencia de eucalipto se obtuvo de las parcelas del Tercer Inventario Forestal Nacional (IFN3). La presencia se definió como la ocurrencia de uno o más eucaliptos vivos en cada parcela, por lo que las parcelas se clasificaron como con o sin presencia de eucalipto. Es

importante destacar que este inventario no distingue otras especies estrechamente relacionadas con *E. globulus*, como *Eucalyptus nitens* (actualmente de importancia comercial). Sin embargo, en el momento de este inventario (que comenzó en 1997 en Galicia y después en las otras regiones), la presencia de *E. nitens* no fue significativo ya que las plantaciones comerciales de esta especie se establecieron por primera vez en Galicia hacia el año 1992 (PÉREZ-CRUZADO, 2011).

Como posibles predictores de los modelos de distribución y productividad de la especie se utilizaron tres tipos de variables ambientales espacialmente continuas: topográficas, climáticas, y edáficas. Las variables topográficas se obtuvieron del modelo digital de elevación elaborado por el Plan Nacional de Ortofotografía Aérea (PNOA; [www.pnoa.ign.es](http://www.pnoa.ign.es)), usando para determinarlas el software SAGA (CONRAD et al., 2015). Como variables climáticas se emplearon 19 variables climáticas que se obtuvieron de WorldClim (HIJMANS et al., 2005) y como variables edáficas se utilizaron 12 variables edáficas obtenidas de SoilGrids250m (HENGL et al., 2017). Por último, el tipo de suelo se obtuvo de la European Soil Database (ESDB) v2.0., y la clase litostratigráfica, permeabilidad y geología se obtuvieron del Mapa Geológico y Estratigráfico Nacionales (IGME, 2015a; 2015b). Debido a las diferentes resoluciones espaciales de las variables anteriores, todas fueron rasterizadas a resolución de 250 m.

Para evaluar el cambio de la superficie ocupada por *E. globulus* en las últimas décadas, se han utilizado datos de los cuatro primeros inventarios forestales nacionales españoles (IFN1, IFN2, IFN3 y IFN4 (MARM, 1966, MARM, 1986, MARM, 2006, MARM, 2012).

La distribución actual de eucaliptos se obtuvo a partir de la reciente actualización del IFN4, realizada solo para las especies forestales más productivas del norte de España (en adelante IFN4.5). En combinación con este inventario, se construyó un mapa vectorial de cobertura forestal (escala 1:25000) y se actualizó en 2018 (MAPA, 2019a).

Para evaluar los tipos de cobertura y uso del suelo que podrían verse afectados por una hipotética expansión del eucalipto en su hábitat potencial, utilizamos la versión 2018 de la base de datos CORINE Land Cover (CLC) (CLC 2018) para España (EEA, 2019). Esta versión de CLC es la primera en utilizar la cobertura completa de las imágenes de Sentinel-2 y proporciona una resolución espacial de 20 m con una unidad de mapeo mínima de 25 ha (EEA, 2019). La nomenclatura de los datos vectoriales tiene 3 niveles jerárquicos. Las clases del primer nivel son superficies artificiales, áreas agrícolas, bosques y áreas seminaturales, humedales y agua. El segundo nivel tiene 15 clases y el tercer nivel, 44 subclases. Aunque las clases más detalladas no discriminan especies de árboles, el uso de esta base de datos nos permitió diferenciar diferentes tipos de cobertura forestal (coníferas, frondosas y bosques mixtos) y otros tipos de uso de la tierra. Para analizar la superficie cubierta por eucaliptos y la distribución de los tipos de cobertura del suelo en ENP, utilizamos los datos vectoriales oficiales y de libre acceso para estas áreas (MITECO, 2019).

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. Modelización de la distribución potencial de la especie

Para obtener el mejor modelo de distribución a partir de las variables ambientales, se probaron 8 algoritmos *machine learning* implementados en el paquete BIOMOD2 R (THUILLER et al., 2016): redes neuronales artificiales (ANN), análisis de árboles de clasificación (CTA), análisis discriminante flexible (FDA), modelos generalizados de regresión potenciada (GBM), modelos lineales generalizados (GLM), modelado de máxima entropía (MAXEnt), modelos de bosques aleatorios (RF) y envolventes rectilíneas de superficie (SRE). Para analizar la precisión de las predicciones del modelo SDM, se

utilizó la matriz de confusión (FIELDING & BELL, 1997) obtenida tras aplicar el método de validación cruzada de 10 carpetas y de la que se extrajeron varios estadísticos: precisión global (OA), sensibilidad, especificidad, estadístico true skill (TSS), área bajo la curva ROC (AUC) y estadístico Kappa. Los algoritmos generan probabilidades de presencia y para calcular OA y Kappa es necesario un modelo binario, por lo que fue necesario fijar un umbral de probabilidad para determinar esos valores de presencia/ausencia. Dicho umbral se calculó como el valor medio de dos métodos: la probabilidad de presencia que maximizó sensibilidad y especificidad y la probabilidad de presencia que minimizó la diferencia entre los valores absolutos de sensibilidad y especificidad.

### 3.4. Predicciones futuras

El modelo seleccionado se aplicó sobre datos climáticos futuros predichos para 2050 y 2070 bajo dos escenarios de cambio climático (moderado y pesimista). El escenario moderado (RCP 4.5) asume que las políticas climáticas limitarán las emisiones relacionadas con el efecto invernadero, alcanzándose una concentración de CO<sub>2</sub> 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 CO<sub>2</sub> de 1.350 ppm y un incremento de 2,6–4,8 °C de temperatura para 2100 (IPCC, 2013; HARRIS et al., 2014).

### 3.5. Determinación de coberturas vegetales dentro del hábitat potencial de eucalipto

Una vez seleccionado el mejor modelo, se aplicó a las variables ambientales actuales remuestreadas a una resolución de 250 × 250 m para generar un mapa espacialmente continuo del hábitat óptimo actual. Además, el modelo se aplicó también a las variables climáticas futuras que reflejan los dos escenarios de cambio climático considerados: moderado (RCP 4.5) y pesimista (RCP 8.5), para dos horizontes temporales (2050 y 2070). Con el fin de cuantificar la superficie actual de los diferentes tipos de masas forestales y terrenos semi-naturales ubicados dentro del hábitat óptimo de *E. globulus*, se superpusieron las siguientes cuatro capas: i) hábitat óptimo actual y futuro obtenido en el presente estudio; ii) cobertura actual de bosque de frondosas (código 311 de CLC2018); iii) cobertura actual de otros bosques y terrenos seminaturales (CLC2018); y iv) cobertura actual de *E. globulus* (E<sub>IFN4.5</sub>) obtenida del IFN4.5. La superficie actual ocupada por frondosas dentro del hábitat óptimo del eucalipto que no se corresponde con la cobertura actual de eucaliptos se catalogó como bosque de frondosas autóctonas. Esta aproximación es válida ya que el IFN4.5 sólo ha inventariado 1.217,6 hectáreas de bosques frondosas autóctonas diferentes del eucalipto (*Acacia* sp.) en toda la superficie de hábitat óptimo de eucalipto en el área de estudio.

Como resultado de este procedimiento, se examinaron con más detalle las siguientes cinco categorías de hábitats sobre cuales se puede expandir *E. globulus*:

- *bosques de especies de frondosas autóctonas (SH<sub>NBF</sub>)*: superficie para la expansión potencial de eucaliptos (dentro de su hábitat óptimo) que corresponde a bosques de frondosas autóctonas. Determinado como el área de las teselas de código 311 de CLC2018, menos el área actual ocupada por rodales de eucaliptos (E<sub>IFN4.5</sub>) y acacias.
- *Hábitat óptimo en otras áreas naturales y seminaturales (SH<sub>FSA</sub>)*: superficie para expansión potencial de eucalipto (dentro de su hábitat óptimo) sobre terrenos forestales no catalogados como bosque de frondosa autóctona. Comprende los siguientes códigos CLC2018: 312 (bosque de coníferas), 313 (bosque mixto), 321 (pradera natural), 322 (páramo y brezal), 323 (vegetación esclerófila), 324 (bosque-arbusto de transición), 333 (áreas con poca vegetación) y 334 (áreas quemadas).
- *Hábitat óptimo neto (SH<sub>NET</sub>)*: superficie para la expansión potencial del eucalipto (dentro de su hábitat óptimo) ocupada actualmente por los bosques y otros terrenos seminaturales que están. Es la suma de SH<sub>NBF</sub>, SH<sub>FSA</sub> y E<sub>IFN4.5</sub>.

- *Hábitat óptimo en terrenos no forestales (SH<sub>NFL</sub>)*: superficie para la expansión potencial de eucalipto (dentro de su hábitat óptimo) clasificada según CLC2018 como terrenos no forestales (superficies artificiales, áreas agrícolas, humedales y superficies de agua).
- *Hábitat óptimo bruto (SH<sub>BRUTO</sub>)*: superficie total de hábitat óptimo. Es la suma de SH<sub>NFL</sub> y SH<sub>NET</sub>.

Para cuantificar la distribución del hábitat óptimo potencial para eucalipto sobre las clases de cobertura terrestre en los espacios naturales protegidos, se superpusieron los mapas vectoriales de ENP sobre el mapa de hábitat óptimo de eucalipto.

## 4. Resultados

### 4.1. Modelo de distribución de especie

De las 12.773 parcelas IFN3 incluidas en las cuatro comunidades autónomas, el eucalipto estuvo presente en 3.014 y ausente en 9.759). Después de comparar ocho algoritmos diferentes, se seleccionó Random Forest (RF) como el mejor modelo para ajustar el SDM. El modelo seleccionado presentó una precisión general de 0,87 y un área bajo la curva ROC (AUC) de 0,93 (Tabla 1).

Tabla 1. Valores de los estadísticos de comparación (tras validación cruzada de 10 grupos) de los diferentes algoritmos probados para ajustar el modelo de distribución de la especie.

	Técnica estadística							
	ANN	CTA	FDA	GBM	GLM	MAXENT	RF	SRE
AUC	0,8875 (0,0166)	0,8895 (0,0131)	0,9113 (0,0104)	0,9225 (0,0087)	0,8950 (0,0097)	0,9204 (0,0074)	0,9331 (0,0071)	0,7146 (0,0258)
OA	0,8378 (0,0160)	0,8517 (0,0105)	0,8518 (0,0096)	0,8601 (0,0097)	0,8332 (0,0118)	0,8561 (0,0083)	0,8705 (0,0070)	0,7963 (0,0137)
TSS	0,7069 (0,0234)	0,6977 (0,0163)	0,7244 (0,0104)	0,7315 (0,0170)	0,7049 (0,0157)	0,7303 (0,0167)	0,7551 (0,0147)	0,4291 (0,0521)
Kappa	0,6046 (0,0294)	0,6196 (0,0234)	0,6194 (0,0211)	0,6342 (0,0225)	0,5936 (0,0256)	0,6315 (0,0198)	0,6640 (0,0197)	0,4315 (0,0451)

ANN = redes neuronales artificiales; CTA = análisis de árboles de clasificación; FDA = análisis discriminante flexible; GBM = modelos generalizados de regresión potenciada; GLM = modelos lineales generalizados; MAXENT = modelado de máxima entropía; RF = modelos de bosques aleatorios; SRE = envolventes rectilíneas de superficie; Estadísticos de comparación: Área bajo la curva ROC (AUC), OA (precisión general), TSS (estadístico True Skill), Kappa (kappa de Cohen). Valores entre paréntesis son las desviaciones estándar de 10 predicciones.

### 4.2. Cambios de superficie hasta 2018 y superficie actual en espacios naturales protegidos

La superficie ocupada por eucalipto se ha multiplicado por 4,6 en los últimos 50 años (pasa de 84.323 ha en 1966-1974 a 389.033 ha en 2018). No obstante, las diferencias entre las diferentes comunidades autónomas son muy importantes. Así, la superficie ocupada por eucaliptos se ha incrementado por 11,29 en Galicia, por 1,90 en Asturias, por 1,20 en Cantabria y por 6,99 en Euskadi. La superficie actual de eucaliptos en el norte de España representa el 18,22% de la superficie arbolada total, con diferencias, otra vez, muy marcadas por comunidades autónomas. Así, esta especie representa sólo el 2,69% de la superficie arbolada de Euskadi, mientras que en Asturias representa el 15,46%, en Cantabria el 19,47% y en Galicia el 23,82%. Teniendo en cuenta los datos de las diferentes provincias de la región donde *E. globulus* ocupa la superficie mayor (Galicia), encontramos también importantes diferencias: i) en la provincia interior de Ourense, *E. globulus* sólo

representa el 0,28% de la superficie arbolada, ii) por el contrario, en A Coruña el 44,76% de la superficie arbolada está cubierta por rodales de eucalipto (Tabla 3). El IFN4.5 es el primero a distinguir entre dos especies de eucalipto próximas (*E. globulus* y *E. nitens*). Así, en las regiones de estudio se han detectado 64.818 ha de *E. nitens* (principalmente en Galicia, con 58.156 ha), aumentando la proporción de superficie arbolada ocupada por plantaciones de eucalipto hasta un 21,25% en el norte de España y hasta un 53,66% en la provincia de A Coruña (Tabla 2).

Tabla 2. Evolución de la superficie (en hectáreas) ocupada por eucaliptos entre 1966 y 1974 y hasta la actualidad (2018), cuantificando la superficie actual de eucalipto como porcentaje de la superficie arbolada total (CLCw) según la clasificación Corine Land Cover 2018 (CLC2018).

	Galicia			Asturias	Cantabria	Euskadi			Total	
	Po	C	Lu	Ou	As	Ca	A	Vi		Gui
E <sub>IFN1</sub>	8182	15371	4086	0	25507	29697	0	1480	0	84323
E <sub>IFN2</sub>	11085	27040	8367	0	32824	32824	0	7675	0	86993
E <sub>IFN3</sub>	73779	17520	70995	860	71836	42968	36	9384	243	445067
E <sub>IFN4</sub>	66887	214313	75190	565	69713	41184	147	9772	353	477774
EG <sub>IFN4.5</sub>	50846	169907	65835	579	56559	34956	0	9936	411	389033
EN <sub>IFN4.5</sub>	1693	33799	22562	100	410	212	700	5166	171	64818
E <sub>IFN4.5</sub>	52540	20370	88398	680	56970	35168	700	15103	582	453851
CLCf	290255	501619	647208	547022	745239	350047	175504	155206	140951	3553056
CLCw	193307	379619	426715	205980	365911	179568	136002	128965	119671	2135743
%EG <sub>IFN4.5</sub>	26,30	44,76	15,43	0,28	15,46	19,47	0,00	7,70	0,34	18,22
%E <sub>IFN4.5</sub>	27,18	53,66	20,72	0,33	15,57	19,59	0,52	11,71	0,49	21,25

Variables obtenidas de Inventarios Forestales Nacionales: E<sub>IFN<sub>x</sub></sub>: superficie ocupada por plantaciones de eucalipto según los Inventarios Forestales Nacionales (IFN1 -1966-1974, IFN2- 1986-1996, IFN3- 1997-2007, IFN4- 2008-2018). EG<sub>IFN4.5</sub>: superficie ocupada por *Eucalyptus globulus* según la reciente actualización del Cuarto Inventario Forestal Nacional en el norte de España (IFN4.5). EN<sub>IFN4.5</sub>: superficie ocupada por *Eucalyptus nitens* según IFN4.5. E<sub>IFN4.5</sub>: superficie ocupada por eucalipto (*E. nitens* + *E. globulus*). %EG<sub>IFN4.5</sub>: porcentaje del área ocupada por *E. globulus* en relación con la superficie arbolada total (CLCw). %E<sub>IFN4.5</sub>: porcentaje de área ocupada por eucalipto (*E. nitens* + *E. globulus*) en relación con la superficie arbolada total (CLCw). Variables de la versión 2018 de Corine Land Cover (CLC2018): CLCf: Área total en la provincia ocupada por áreas forestales y seminaturales (códigos CLC2018: 311 bosque frondosas; 312 bosque de coníferas; 313 bosque mixto; 321 pastizal natural; 322 páramo y brezales; 323 vegetación esclerófila; 324 bosque-arbusto de transición; 331 playas, dunas, arenas; 332 rocas desnudas; 333 áreas con escasa vegetación; 334 áreas quemadas; glaciares y nieves perpetuas. CLCw: área total ocupada por bosque (CLC2018 códigos: 311 bosque frondosas; 312 bosque de coníferas; 313 bosque mixto).

La superficie ocupada por *E. globulus* en ENP alcanzó las 7.840 ha en las cuatro comunidades autónomas, lo que representa solo el 2% de la superficie total ocupada por la especie. No obstante, se observaron diferencias importantes entre provincias (Tabla 4).



#### 4.3. Efectos previstos del cambio climático en el hábitat óptimo

Las proyecciones del SDM bajo dos escenarios climáticos futuros diferentes revelan un aumento en el hábitat óptimo neto ( $SH_{NET}$ ) entre un 14% y 22% para 2050 y entre un 18% y 34% para 2070, para los escenarios de cambio climático RCP 4.5 y RCP 8.5, respectivamente. A pesar del incremento global, se observan claras diferencias en el cambio en  $SH_{NET}$  entre Galicia y las tres comunidades autónomas restantes. En la región occidental de Galicia, se esperan importantes aumentos en  $SH_{NET}$  de entre 30% y 40% para 2050 en el RCP 4.5 y RCP 8.5, respectivamente (Tabla 3, Figura 1). También se esperan aumentos adicionales del 5% para RCP 4.5 y 6% para RCP 8.5 para 2070. El escenario de empeoramiento del cambio climático (pasar de RCP 4.5 a RCP 8.5) tiene un impacto bastante mayor (alrededor de un 37% más alto) que el aumento del horizonte temporal de 2050 a 2070. Este incremento se produce en el interior de las provincias de Lugo y Ourense. Las otras dos provincias (A Coruña y Pontevedra) son en la actualidad casi totalmente aptas para la especie y seguirán siéndolo en los dos escenarios futuros de cambio climático proyectados (Figura 1).

A diferencia de Galicia, se espera una significativa reducción de  $SH_{NET}$  para las otras tres comunidades autónomas (Tabla 3, Figura 1) bajo el escenario de cambio climático moderado. Así, se esperan reducciones del 16% y del 12%, respectivamente, para Asturias, del 23 y 26% para Cantabria y del 62 y 63% para Euskadi, para el horizonte temporal de 2050 y 2070, respectivamente. Se espera que el escenario pesimista provoque una mayor reducción de la  $SH_{NET}$  para Asturias y Cantabria (reducciones del 23-11% y 33-13%) pero un sorprendente efecto contrario en Euskadi para el que se predice una pérdida de hábitat adecuado del 4% para 2050, pero una ganancia del 86% para 2070 (Tabla 3, Figura 1). Las proyecciones futuras para  $SH_{NBF}$  y  $SH_{FSA}$  se determinaron considerando el hábitat adecuado neto futuro proyectado ( $SH_{NET}$ ) pero considerando la cobertura actual de CLCf y CLCw.

#### 4.4. Expansión potencial actual y futura

La superficie actual de hábitat óptimo para *E. globulus* en terrenos forestales ( $SH_{NET}$ ) es de 1.203.756 ha, pero esta especie ya cubre un área de 372.871. Así, la  $SH_{NET}$  actual para la expansión de la especie es de 830.885 ha, lo que representa un 222,83% más de la superficie actual que podría ser ocupada por plantaciones de *E. globulus*. De este hábitat, un total de 587.448 ha se encuentran en Galicia, 148.196 ha en Asturias, 49.923 ha en Cantabria y 45.318 ha en Euskadi. Este  $SH_{NET}$  se puede superponer sobre áreas donde actualmente ya existen bosques de frondosas autóctonas y coníferas, bosques mixtos y áreas forestales no arboladas ( $SH_{NBF}$  y  $SH_{FSA}$ , respectivamente) (Tabla 3).

En la actualidad, 296.357 ha de la superficie del hábitat óptimo de *E. globulus* están ocupadas por bosque de frondosas autóctonas (Tabla 3), de las cuales 185.420 ha se encuentran en Galicia. Las proyecciones futuras indican un aumento del hábitat óptimo sobre superficies cubiertas por bosques de frondosas autóctonas hasta 414.706 ha para 2070 en el peor escenario de cambio climático (RCP 8.5), la mayor parte del cual también se encuentra en Galicia (307.474 ha).

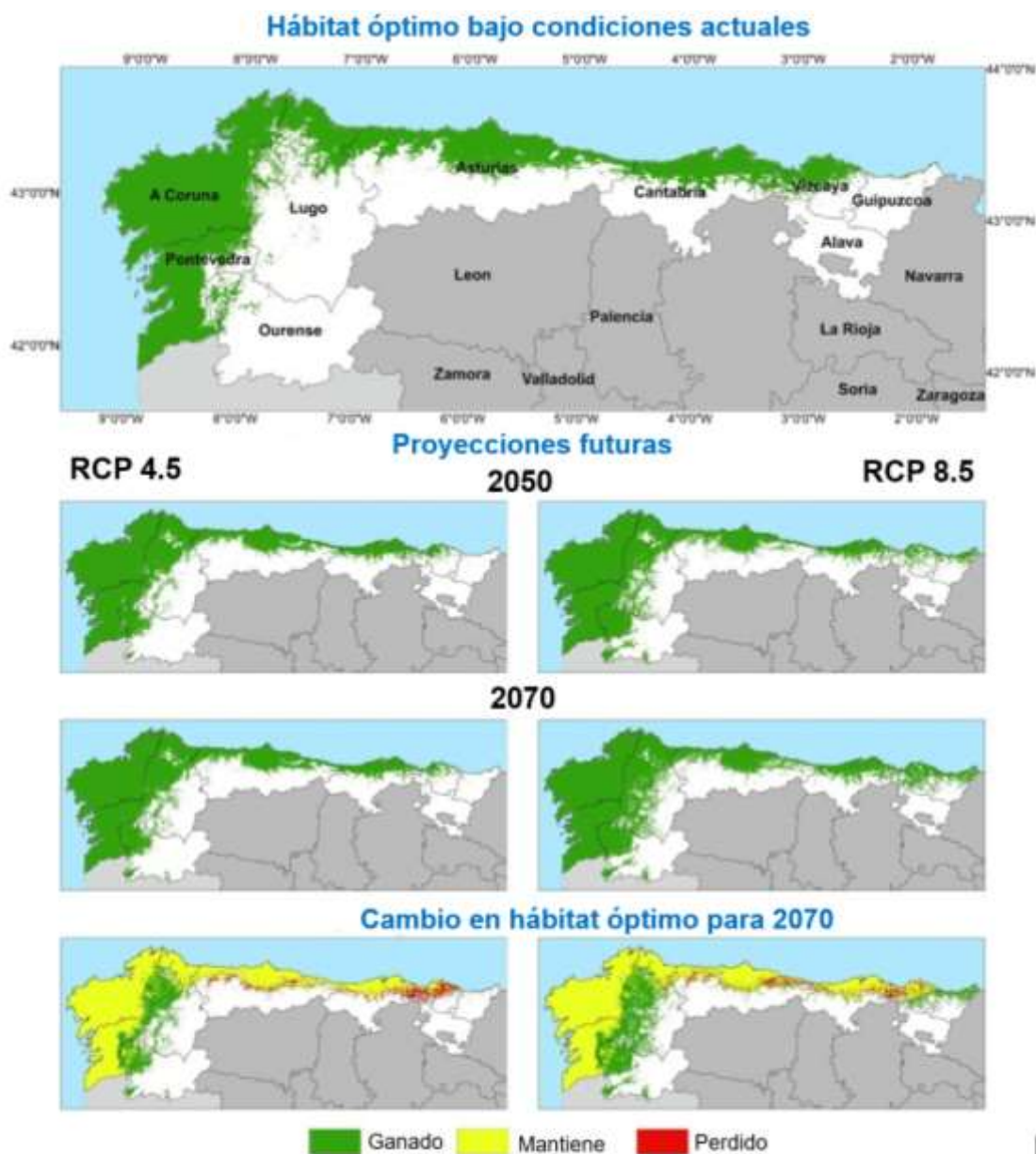


Figura 1. Predicciones del modelo de hábitat óptimo para las condiciones actuales y para condiciones futuras bajo dos escenarios de cambio climático diferentes (RCP 4.5 y RCP 8.5) y para los horizontes temporales de 2050 y 2070.

Tabla 3. Superficie (en ha) ocupada por diferentes tipos de coberturas de vegetación incluidas en el hábitat óptimo de eucalipto según el SDM ajustado y proyecciones futuras bajo dos escenarios climáticos futuros diferentes (RCP 4.5 y RCP 8.5) para el año 2050 y 2070.

		Galicia				Asturias	Cantabria	Euskadi			Total
Provincia		Po	C	Lu	Ou	As	C	A	Vi	Gui	
ACTUAL 2018	CLCf	290255	501620	647209	547023	745240	350048	175504	155207	140952	3553056
	CLCw	193307	379619	426715	205981	365911	179569	136003	128966	119672	2135743
	SH <sub>NBF</sub>	66034	82945	28763	7679	69180	27730	39	13563	425	296357

	SH <sub>FSA</sub>	122349	220676	45384	13619	79017	22193	315	29962	1014	534529
	EG <sub>IFN4.5</sub>	48925	166241	61198	179	54584	33347	0	8386	13	372871
	SH <sub>NET</sub>	237307	469862	135345	21476	202780	83270	354	51911	1452	1203756
2050 RCP 4.5	SH <sub>NBF</sub>	+15%	+3%	+149%	+319%	-20%	-21%	-98%	-56%	-55%	+18%
	SH <sub>FSA</sub>	+21%	+4%	+175%	+428%	-21%	-40%	-92%	-73%	-35%	+23%
	SH <sub>NET</sub>	+15%	+3%	+92%	+387%	-16%	-23%	-93%	-63%	-41%	+14%
2050 RCP 8.5	SH <sub>NBF</sub>	+16%	+3%	+172%	+552%	-31%	-33%	-82%	-52%	+2072%	+26%
	SH <sub>FSA</sub>	+25%	+5%	+203%	+767%	-26%	-48%	-41%	-36%	+1028%	+39%
	SH <sub>NET</sub>	+17%	+3%	+106%	+685%	-23%	-33%	-46%	-41%	+1337%	+22%
2070 RCP 4.5	SH <sub>NBF</sub>	+15%	+3%	+162%	+386%	-16%	-26%	-100%	-62%	-20%	+21%
	SH <sub>FSA</sub>	+23%	+5%	+201%	+542%	-16%	-42%	-93%	-71%	-32%	+30%
	SH <sub>NET</sub>	+16%	+3%	+104%	+483%	-13%	-26%	-94%	-64%	-29%	+18%
2070 RCP 8.5	SH <sub>NBF</sub>	+17%	+3%	+232%	+542%	-16%	-12%	+411%	-17%	+2990%	+40%
	SH <sub>FSA</sub>	+25%	+5%	+290%	+729%	-9%	-15%	+548%	+57%	+1759%	+56%
	SH <sub>NET</sub>	+18%	+3%	+148%	+658%	-11%	-13%	+533%	+26%	+2121%	+34%

Variables de IFN4.5: EG<sub>IFN4.5</sub>: área actualmente ocupada por plantaciones de *E. globulus*. Variables de Corine Land Cover (CLC2018): CLCf: área total de la provincia cubierta por terrenos forestales y seminaturales. CLCw: área total en la provincia ocupada por bosque. Variables obtenidas en las áreas CLC2018, SNFI4.5 y SDM: SH<sub>NBF</sub>: superficie de expansión potencial de eucalipto en el bosque frondosas autóctonas (CLC2018 código 311 (bosque frondosas) menos EG<sub>IFN4.5</sub>, menos EN<sub>IFN4.5</sub> y menos superficie de *Acacia* sp.). SH<sub>FSA</sub>: superficie de expansión potencial en otras áreas naturales y seminaturales. SH<sub>NET</sub>: superficie de CLCf incluida en el hábitat óptimo, SH<sub>NET</sub>= E<sub>IFN4.5</sub> + SH<sub>NBF</sub> + SH<sub>FSA</sub>.

Tabla 4. Superficie (ha) ocupada actualmente por eucalipto dentro de Espacios Naturales Protegidos (ENP) y predicciones futuras para los horizontes temporales 2050 y 2070 bajo dos escenarios diferentes de cambio climático.

	Provincia	Galicia				Asturias	Cantabria	Euskadi			Total
		Po	C	Lu	Ou	As	C	A	Vi	Gui	
ACTUAL (2018)	EG <sub>IFN4.5</sub>	48925	166241	61198	179	54584	33347	0	8386	13	372871
	EG <sub>ENP</sub>	161	3278	1585	8	340	1149	0	1293	26	7840
	%EG <sub>ENP</sub>	0%	2%	2%	1%	1%	3%	0%	13%	6%	2%
	SH <sub>ENP</sub>	13862	39109	12350	2515	3185	22548	0	16834	25	110429
2050 RCP 4.5	%SH <sub>ENP</sub>	+43%	+12%	+94%	+218%	-13%	-6%	0%	-64%	+164%	+14%
2050 RCP 8.5	%SH <sub>ENP</sub>	+55%	+13%	+77%	+1484%	-15%	-7%	0%	-47%	+8373%	+47%
2070 RCP 4.5	%SH <sub>ENP</sub>	+51%	+13%	+101%	+620%	-14%	-9%	0%	-63%	+109%	+25%
2050 RCP 8.5	%SH <sub>ENP</sub>	+53%	+13%	+138%	+993%	-5%	0%	0%	2%	+16379%	+53%

EG<sub>IFN4.5</sub>: área total ocupada por *E. globulus*. EG<sub>ENP</sub>: área ocupada por *E. globulus* en ENP. %EG<sub>ENP</sub>: porcentaje de *E. globulus* en ENP en relación con EG<sub>IFN4.5</sub>. SH<sub>NPA</sub>: área actual de hábitat óptimo de *E. globulus* en ENP. %SH<sub>ENP</sub>: porcentaje de incremento o disminución de hábitat óptimo de *E. globulus*.

## 5. Discusión

### 5.1. Modelo de distribución de especies y efectos del cambio climático en el hábitat óptimo

Random Forest fue seleccionada como la mejor técnica para modelizar el hábitat óptimo para *E. globulus* en el norte de España. El éxito de la técnica se basa en el uso de numerosos árboles, desarrollados con diferentes variables independientes que se seleccionan aleatoriamente del conjunto original completo de características, y ha sido recomendado como una técnica adecuada para aplicaciones de modelización ecológica y de distribución de especies (PRASAD et al., 2006, ARAUJO & LUOTO, 2007). Además, también ha demostrado ser la mejor técnica en análisis comparativos llevados a cabo en la modelización del hábitat óptimo de otras especies forestales (e.g., SERRA-VARELA et al., 2017, BARRIO-ANTA et al., 2020) y también ha sido seleccionada como la técnica utilizada para modelizar y cartografiar el hábitat óptimo de las principales formaciones forestales europeas (CASALEGNO et al., 2011).

Aunque existe gran superficie ocupada actualmente por *E. globulus* en el norte de España, según el SDM desarrollado, existe hábitat potencial adecuado para que la superficie ocupada por la especie siga aumentando. Así, el SDM ajustado predice una expansión sustancial del hábitat óptimo de *E. globulus* en Galicia, tanto para el escenario de cambio climático moderado como para el pesimista. Por el contrario, no se prevé ningún cambio o una reducción de leve a moderada para las otras tres comunidades autónomas del norte de España (Asturias, Cantabria y Euskadi). Estas proyecciones son similares a las llevadas a cabo para toda la Península Ibérica por DEUS et al. (2018).

### 5.2. Cambios históricos en la superficie ocupada por eucalipto, cobertura actual y expansión potencial futura

Después del establecimiento inicial de plantaciones comerciales de eucalipto en Galicia entorno a 1850 (LAMA GUTIÉRREZ, 1976, SILVA-PANDO & PINO-PÉREZ, 2016), y similar a lo señalado para Portugal (ALEGRIA et al., 2020), las plantaciones se expandieron rápidamente en toda la costa norte de España debido principalmente a factores económicos. La notable plasticidad de la especie en relación al suelo y al clima facilitó su adaptación (JACOBS, 1981; BEAN & RUSSO, 1989), por lo que no ha habido restricciones ambientales apreciables para la supervivencia y crecimiento de *E. globulus* en el área de estudio (LAMA GUTIÉRREZ, 1976; JACOBS, 1981). El rápido aumento en el área ocupada por *E. globulus* ha ido acompañado de un aumento de las existencias de biomasa y de la fijación de carbono. Por ejemplo, en Galicia, el stock de biomasa de *E. globulus* se multiplicó por 5,8 en el período 1972-2009. De hecho, los rodales de *E. globulus* representan actualmente las reservas máximas de carbono sobre el suelo en esta comunidad autónoma (GÓMEZ-GARCÍA, 2020).

Aunque prohibido por las leyes forestales regionales, la sustitución del bosque autóctono por plantaciones de eucalipto ha ocurrido con cierta frecuencia. La principal razón es la enorme diferencia en la tasa de crecimiento y las edades de corta en comparación con la mayoría de las especies de frondosa autóctona. Por ejemplo, la edad media de corta de *E. globulus* en Galicia es de 12 a 16 años (VIERA et al., 2016), muy inferior a los 110-145 años necesarios para maximizar la producción en volumen en el caraballo (*Quercus robur* L.) (GÓMEZ-GARCÍA et al., 2015). Además, las autoridades forestales disponen de recursos bastante limitados para llevar a cabo un control efectivo que evite el establecimiento de plantaciones de eucalipto tras la corta de masas autóctonas. Para proteger y potenciar estos bosques, algunas comunidades autónomas, como Galicia, han establecido una base de datos de bosques autóctonos con superficies superiores a 15 ha. Los propietarios de estas áreas serán elegibles para beneficios fiscales y se les dará prioridad para recibir subvenciones públicas para la gestión sostenible y la conservación (DOG, 2020).

Si bien las condiciones climáticas futuras parecen favorecer la expansión del área potencial de *E. globulus*, esto no implica necesariamente el establecimiento de nuevas plantaciones. La legislación de los gobiernos regionales y los cambios socioeconómicos y las demandas del mercado jugarán un papel muy importante para limitar, revertir o incluso fomentar la expansión de la especie (DEUS et al., 2018). Así, la ley 11/2021 de recuperación de tierra agraria en Galicia, establece una prohibición transitoria hasta finales de 2025 de nuevas plantaciones con especies del género eucalipto en terrenos donde estas especies no fueran dominantes (más del 50% de pies de la masa) (DOG, 2021). También han surgido nuevos retos relacionados con la expansión del género *Eucalyptus* en el norte de España. Así, en la última década, *E. nitens* se ha plantado en zonas propensas a heladas en altitudes de hasta 900-1000 m, principalmente en zonas del interior de Galicia, pero también en Euskadi. Por otra parte, las plantaciones de *E. nitens* están también sustituyendo a plantaciones de pino radiata y a aquellas de *E. globulus* en las zonas más afectadas por *Gonipterus platensis*, ya que *E. nitens* es menos susceptible a esta plaga (GONÇALVES et al., 2019).

La superficie actual de eucalipto dentro de ENP en las cuatro comunidades estudiadas es de 7840,40 ha, lo que representa sólo el 2,02% de la superficie total ocupada por eucaliptos. Además, la mayoría de estas plantaciones se establecieron antes de la designación de estas áreas como espacios protegidos, como ya ha señalado previamente DEUS et al. (2018). Actualmente, algunos ENP cuentan con normativas restrictivas que prohíben el establecimiento de plantaciones de eucalipto por parte de propietarios privados, y en algunas comunidades como Galicia se ha prohibido el establecimiento de nuevas plantaciones de eucalipto dentro de los espacios incluidos en la red Natura 2000. En este sentido, una reducción paulatina del área cubierta por eucaliptos y la promoción de los bosques autóctonos de frondosas mejoraría la conectividad ecológica entre áreas protegidas y favorecería la heterogeneidad del paisaje.

## 6. Agradecimientos

Los autores están muy agradecidos a Elena Robla y Vicente Sandoval, del Área de Inventarios y Estadísticas Forestales (Ministerio para la Transición Ecológica y Reto Demográfico), por proporcionar los datos de la actualización del Cuarto Inventario Forestal Nacional para el norte de España (IFN4.5).

## 7. Conclusiones

La superficie ocupada por *E. globulus* en el norte de España se ha quintuplicado en los últimos cincuenta años. La especie actualmente ocupa una superficie de 389.034 ha, que representan el 18,22% de la superficie arbolada. Sin embargo, en A Coruña, la especie ya ocupa más del 44% de la superficie arbolada de la provincia. Además, el 2% del área ocupada por eucaliptos se encuentra dentro de áreas naturales protegidas. Utilizando la técnica Random Forest y variables ambientales espacialmente continuas, desarrollamos un modelo de hábitat óptimo para la especie cuya aplicación sobre proyecciones climáticas futuras nos permitió detectar regiones donde se espera un aumento sustancial de hábitat óptimo (Galicia) de otras donde se espera una leve o moderada reducción (Asturias, Cantabria y Euskadi). Dentro del hábitat óptimo actual, identificamos 830.885 ha de terreno forestal apto para nuevas plantaciones con la especie, correspondiendo 296.357 ha a superficies actualmente cubiertas por bosques autóctonos. Estos datos deberían bastar, por si solos, para instar a políticos y planificadores forestales a desarrollar leyes, planes y programas de gestión forestal sostenible que ayuden a controlar la expansión desmesurada de estas plantaciones y que eviten o reduzcan la alta presión a la que someten a los bosques autóctonos, de mucha mayor biodiversidad.

## 8. Bibliografía

- ALEGRIA, C.; ALBUQUERQUE, T.; ROQUE, N.; 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, M.H.; CHAVES, M.M.; SILVA, J.C.; 1994. Cold acclimation in eucalypt hybrids. *Tree Physiology* 14, 921–932.
- ARAUJO, M.B.; LUOTO, M.; 2007. The importance of biotic interactions for modelling species distributions under climate change. *Glob. Ecol. Biogeogr.* 16(6), 743–753.
- 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.
- BAYLE, G.K.; 2019. Ecological and social impacts of eucalyptus tree plantations on the environment. *J. Biodiverse. Conserv. Bioresour. Manag.* 5(1), 93–104.
- BEAN, C.; RUSSO, M.J.; 1989. Elemental stewardship abstract for *Eucalyptus globulus* (revised). Arlington, VA: The Nature Conservancy.
- BERMUDEZ, J.D.; TOUZA, M.C.; SANZ, F.; 2002. Manual de la madera de eucalipto blanco. Fundación o Fomento da Calidade Industrial e Desenvolvemento Tecnolóxico de Galicia. Ourense.
- BOOTH, T.H, NIX, H.A, BUSBY, J.R, HUTCHINSON, M.F.; 2014. Bioclim: the first species distribution modelling package, its early applications and relevance to most current MaxENT studies. *Diversity Distrib.* 20, 1–9.
- BOOTH, TH.; 2012. Eucalypt plantations and climate change. *For. Ecol. Manag.* 301, 28–34.
- CALVO DE ANTA, R.; 1992. El eucalipto en Galicia: Sus relaciones con el medio natural. Universidad de Santiago de Compostela. 211 pp. Santiago de Compostela.
- CASALEGNO, S.; AMATULLI, G.; BASTRUP-BIRK, A.; DURRANT, T.H.; PEKKARINEN, A.; 2011. Modelling and mapping the suitability of European forest formations at 1-km resolution. *Eur. J. Forest. Res.* 130, 971–981.
- CASTRO-DÍEZ, P.; FIERRO-BRUNNENMEISTER, N.; GONZÁLEZ-MUÑOZ, N.; GALLARDO, A.; 2012. Effects of exotic and native tree leaf litter on soil properties of two contrasting sites in the Iberian Peninsula. *Plant Soil*, 350(1), 179–191.
- CERASOLI, S.; CALDEIRA, M. C.; PEREIRA, J. S.; CAUDULLO, G.; DE RIGO, D.; 2016. *Eucalyptus globulus* and other eucalypts in Europe: distribution, habitat, usage and threats. En: SAN-MIGUEL-AYANZ, J.; DE RIGO, D.; CAUDULLO, G.; HOUSTON DURRANT, T.; MAURI, A. (Eds.), *European Atlas of Forest Tree Species*. Publ. Off. EU, Luxembourg, pp. 90–91. e01b5bb+
- CONRAD, O.; BECHTEL, B.; BOCK, M.; DIETRICH, H.; FISCHER, E.; GERLITZ, L.; WEHBERG, J.; WHICHMANN, V.; BÖHNER, J.; 2015. System for automated geoscientific analyses (SAGA) v. 2.1.4. *Geosci. Model Dev.* 8, 1991–2007.

DALE, V.H.; YOYCE, L.A.; MCNULTY, S.; NEILSON, R.P.; AYRES, M.P.; FLANNIGAN, M.D.; HANSON, P.J.; IRLAND, L.C.; LUGO, A.E.; PETERSON, C.J.; SIMBERLOFF, D.; SWANSON, F.J.; STOCKS, B.J.; WOTTON, B.M.; 2001. Climate Change and Forest Disturbances. *Bioscience* 51(9), 723–734.

DEUS, E.; SILVA, J.S.; CASTRO-DÍEZ, P.; LOMBA, A.; ORTIZ, M.L.; VICENTE, J.; 2018. Current and future conflicts between eucalypt plantations and high biodiversity areas in the Iberian Peninsula. *J. Nat. Conserv.* 45: 107–117.

DOG, 2020. DECRETO 167/2019, de 5 de diciembre, por el que se crea y se regula el Registro de masas consolidadas de frondosas autóctonas. DOG nº 4, miércoles 8 de enero de 2020.

DOG, 2021. Lei 11/2021, de 14 de maio, de recuperación da terra agraria de Galicia. DOG nº 94, venres 21 de maio de 2021.

EEA, EUROPEAN ENVIRONMENTAL AGENCY, 2019. CORINE Land Cover 2018. Available online: <https://land.copernicus.eu/pan-european/corine-land-cover/clc2018> (accessed 15 January 2020).

FIELDING, A.; BELL, J.; 1997. A review of methods for the assessment of prediction errors in conservation presence/absence models. *Environ Conserv* 24, 38–49.

FREER-SMITH, P.; MUYS, B.; BOZZANO, M.; DRÖSSLER, L.; FARRELLY, N.; JACTEL, H.; KORHONEN, J.; MINOTTA, G.; NIJNIK, M. AND ORAZIO, C.; 2019. Plantation forests in Europe: challenges and opportunities. From Science to Policy 9. European Forest Institute.

GARCÍA-VILLABRILLE, J.D.; 2015. Modelización del crecimiento y la producción de plantaciones de *Eucalyptus globulus* Labill. en el noroeste de España. Tesis doctoral. Universidad de Santiago de Compostela. <https://minerva.usc.es/xmlui/handle/10347/13686>

GELDRES, E.; SCHLATER, J.E.; 2004. Crecimiento de las plantaciones de *Eucalyptus globulus* sobre suelos rojos arcillosos de la provincia de Osorno, Décima Región. *Bosque* 25(1), 95–101.

GODED, S.; EKROOS, J.; DOMÍNGUEZ, J.; AZCÁRATE, J.G.; GUITIÁN, J.A.; SMITH, H.G.; 2019. Effects of eucalyptus plantations on avian and herb species richness and composition in North-West Spain. *Glob. Ecol. Conserv.* 19: e00690.

GÓMEZ-GARCÍA, E.; 2020. Estimating the changes in tree carbon stocks in Galician forests (NW Spain) between 1972 and 2009. *For. Ecol. Manage.* 467, 118157.

GÓMEZ-GARCÍA, E.; CRECENTE-CAMPO, F.; BARRIO-ANTA, M.; DIÉGUEZ-ARANDA, F.; 2015. A disaggregated dynamic model for predicting volume, biomass and carbon stocks in even-aged pedunculate oak stands in Galicia (NW Spain). *Eur. J. For. Res.* 134(3), 569–583.

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.

GUISAN, A.; ZIMMERMANN, N.E.; 2000. Predictive habitat distribution models in ecology. *Ecol. Modell.* 135, 147–186.

HARPER, R.J.; SMETTEM, K.R.J.; CARTER, J.O.; MCGRATH, J.F.; 2009. Drought deaths in *Eucalyptus globulus* (Labill.) plantations in relation to soils, geomorphology and climate. *Plant Soil* 324, 199.

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

IGME, 2015b. Mapa Geológico de la Península Ibérica, Baleares y Canarias a escala 1:1000000. 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. Second Edition, Pp. 412–419, FAO forestry series 11. Rome.

LAMA GUTIÉRREZ, G.; 1976. Atlas del eucalipto. Tomo I: Información y ecología. Ministerio de Agricultura. Instituto Nacional de Investigaciones Agrarias (INIA)/Instituto Nacional para la Conservación de la Naturaleza (ICONA). Sevilla.

MAPA, 2019a. Actualización del Cuarto Inventario Forestal Español para el norte de España. Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación. Gobierno de España (no publicado).

MAPA, 2019b. Anuario de estadística Forestal. Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación. Gobierno de España.

MARM, 1966. Primer Inventario Forestal Nacional. Ministerio de Medio Ambiente, y Medio Rural y Marino, Dirección General de Desarrollo Rural y Política Forestal. Madrid.

MARM, 1986. Segundo Inventario Forestal Nacional. Ministerio de Medio Ambiente, y Medio Rural y Marino, Dirección General de Desarrollo Rural y Política Forestal. Madrid.

MARM, 2006. Tercer Inventario Forestal Nacional. Ministerio de Medio Ambiente, y Medio Rural y Marino, Dirección General de Desarrollo Rural y Política Forestal. Madrid.

MARM, 2012. Cuarto Inventario Forestal Nacional. Ministerio de Medio Ambiente, y Medio Rural y Marino, Dirección General de Desarrollo Rural y Política Forestal. Madrid.

MITECO, 2019. Cartografía de Espacios naturales Protegidos de España. Ministerio para la Transición Ecológica y el reto Demográfico. Gobierno de España.

MONTERO DE BURGOS, J.L.; 1990. El eucalipto en España. Comentarios a un problema. ICONA, Serie Técnica, 44 pp, Madrid.



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.

PÉREZ-CRUZADO, C.; 2011. Models for estimating biomass and carbon in biomass and soils in *Pinus radiata* (D. Don), *Eucalyptus globulus* (Labill) and *Eucalyptus nitens* (Deane & Maiden) Maiden plantations established in former agricultural lands in Northwestern Spain. Tesis doctoral, Universidad de Santiago de Compostela, 206 pp.

POHJONEN, V.; PUKKALA, T.; 1990. *Eucalyptus globulus* in Ethiopian Forestry. For. Ecol. Manage. 36, 19–31.

POORE, M.E.D.; FRIES, C.; 1985. The ecological effects of Eucalyptus. FAO, Rome, Italy.

PRASAD, A.; IVERSON, L.; LIAW, A.; 2006. Newer classification and regression tree techniques: bagging and random forests for ecological prediction. Ecosystems 9, 181–199.

SERRA-VARELA, M.J.; ALÍA, R.; RUIZ-DANIELS, R.; ZIMMERMANN, N.E.; GONZALO-JIMÉNEZ, J.; GRIVET, D.; 2017. Assessing vulnerability of two Mediterranean conifers to support genetic conservation management in the face of climate change. Divers Distrib. 23, 507–516.

SILVA-PANDO, F.J.; PINO-PÉREZ, R.; 2016. Introduction of Eucalyptus in Europe. Aust. For. 79(4), 283–291.

SINCLAIR, S.J.; WHITE, M.D.; NEWELL, G.R.; 2010. How useful are species distribution models for managing biodiversity under future climates? Ecol. Soc. 15(1), 8.

THUILLER, W.; GEORGES, D.; ENGLER, R.; BREINER, F.; 2016. 'biomod2': Ensemble platform for species distribution modelling. Methods Ecol. Evol. 5, 634–646.

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.

VEIRAS, X.; SOTO, M.A.; 2011. La conflictividad de las plantaciones de eucalipto en España y Portugal. 96 pp. Greenpeace, Madrid.

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

WANG, Y.; BAKER, T.G.; 2007. A regionalised growth model for *Eucalyptus globulus* plantations in south-eastern Australia. Aust. For. 70(2): 93–107.  
<https://doi.org/10.1080/00049158.2007.10675008>

WHITEHEAD, D.; BEADLE, C.L.; 2004. Physiological regulation of productivity and water use in Eucalyptus: a review. For. Ecol. Manage. 193, 113–140.