



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



Plantaciones con especies de madera de calidad en Castilla y León: materiales forestales y potencialidad

TRANQUE PASCUAL, F. J.¹, VALERA GIL, E.², ALONSO PONCE, R.³

¹ Dirección General de Patrimonio Natural y Política Forestal. Junta de Castilla y León.

² Área de Gestión y apoyo a las ayudas. Tragsatec.

³ Föra Forest Technologies.

Resumen

Las plantaciones de frondosas de madera de calidad pueden ser una interesante alternativa en Castilla y León que, con su vasta extensión, dispone de multitud de zonas potenciales para este tipo de especies.

En los últimos años se ha avanzado notablemente tanto en la identificación de las zonas aptas para el uso de especies con un objetivo de producción de madera de calidad, como en la selección y mejora de dichas especies. Destacan principalmente nogal, cerezo, incluso serbales, aunque otras frondosas menos estudiadas podrían tener cabida como especies complementarias, incrementando la diversidad de estaciones de uso posible.

Se presentan en este trabajo mapas de aptitud climática para la determinación de la potencialidad de algunas especies de madera de alto valor, así como resultados preliminares de crecimiento, fenología y conformación obtenidos a partir de ensayos experimentales en Castilla y León. Dicha información facilitará las recomendaciones de uso de estas plantaciones, de gran incertidumbre respecto a su rentabilidad económica, y que disponen en esta Comunidad Autónoma de una línea específica de ayudas. Su empleo podría suponer una alternativa económica y ecológica para la diversificación de las producciones.

Palabras clave

Ensayos, mapas, aptitud, climática, nobles.

1. Introducción

Las plantaciones con especies de madera de calidad pueden suponer una interesante alternativa forestal de desarrollo rural por el elevado precio que alcanza su madera. También pueden jugar un papel ecológico relevante al utilizarse terrenos agrícolas abandonados, o terrenos forestales donde pueden aumentar la diversidad ecológica (COELLO et al, 2015; COELLO y PIQUÉ, 2009). Sin embargo, para producir madera de calidad son necesarias una adecuada gestión selvícola y una correcta elección de estación, existiendo profundas carencias en cuanto a recomendaciones del material y zonas de utilización.

Para estas plantaciones se emplean frondosas arbóreas cuya madera es apreciada por sus cualidades tecnológicas y estéticas, conocidas comúnmente como especies nobles. El nogal y el cerezo son las que mayor interés y potencialidad tienen, con aproximadamente 8000 hectáreas cultivadas entre ambas en España (ALETÀ & VILANOVA, 2014), pero también presentan altas exigencias edafoclimáticas y problemas fitosanitarios. Complementariamente, otras frondosas con buena aptitud, y cuya madera presenta alto valor económico, son serbales, fresnos y almez.

La mayoría de estas especies nobles sólo están presentes en el Catálogo de Materiales de Base como fuentes semilleras, y de momento ninguna de ellas ha sido aprobada con categoría controlada. La Junta de Castilla y León (en adelante, JCyL) ya

contempló en su plan forestal fomentar repoblaciones con frondosas de calidad, debido a lo cual se desarrollaron varios estudios para determinar las especies de mayor potencialidad (CISNEROS et al, 2010), así como para promover la catalogación de materiales de base. Finalmente, esta comunidad autónoma autorizó cuatro clones de cerezo (*Prunus avium* L.) y dos de jerbo (*Sorbus domestica* L.), seleccionados con un objetivo de producción de madera de alto valor. Además, actualmente la JCyL dispone de una línea de ayudas, cofinanciadas por el Fondo Europeo Agrícola de Desarrollo Rural (FEADER), destinada específicamente a plantaciones de madera de calidad. En la última década se han plantado más de 200 ha de masas puras con especies nobles en Castilla y León, sobre todo nogal, cerezo, serbales y fresnos, de las que casi 50 hectáreas fueron subvencionadas por la citada ayuda.

El fomento de este tipo de plantaciones requiere profundizar en el conocimiento de recomendaciones de uso específicas, tanto del tipo material a emplear como de las estaciones ecológicas adecuadas para su utilización. Para la definición de las zonas de aptitud se utilizan multitud de metodologías, destacando los Modelos Lineales Generalizados y Modelos Aditivos Generalizados (AUSTIN, 2002), y los que modelizan el nicho ecológico a partir de algoritmos que maximizan la entropía (PHILLIPS et al, 2006). En España se han empleado frecuentemente modelos basados en las envolventes ambientales (RUBIO & SÁNCHEZ PALOMARES, 2006) o en la teoría de campos aplicada a la similitud ecológica (ALONSO PONCE et al, 2010), estos últimos ya empleados para determinar la aptitud de especies de madera de calidad (CISNEROS et al, 2010). Aunque todas estas técnicas permiten definir las teóricas zonas recomendables de utilización de las especies, se requiere además de ensayos de campo para evaluar la interacción genotipo y ambiente, así como la influencia de la gestión realizada en la plantación (ALETÀ et al, 2009; GUARDIOLA, 2014). La información finalmente obtenida de estos ensayos, combinada con los modelos de aptitud, permite al usuario valorar la decisión de acometer este tipo de plantaciones eligiendo el material y la zona más adecuada.

2. Objetivos

El objetivo general de este trabajo es analizar la viabilidad del territorio de Castilla y León para las plantaciones de especies productoras de madera de calidad de mayor interés. Este análisis se apoya en dos objetivos específicos: i) determinar la aptitud climática de especies mediante modelos de distribución, y ii) analizar el crecimiento, fenología y conformación de fuste de algunas de estas especies a partir de los resultados preliminares de diversos ensayos experimentales establecidos por la JCyL.

3. Metodología

A. Modelos de aptitud climática

A.1. Datos

Las especies de madera de alto valor modelizadas en este trabajo, para el territorio de Castilla y León, son el nogal (*Juglans regia* L.), cerezo (*Prunus avium* L.), jerbo (*Sorbus domestica* L.), mostajo (*Sorbus torminalis* (L.) Crantz), fresno de montaña (*Fraxinus excelsior* L.) y almez (*Celtis australis* L.). Las fuentes de datos empleados en el análisis se agrupan en dos categorías:

l) Datos de presencia de las especies: se ha utilizado el 3^{er} Inventario Forestal Nacional, considerándose como presencias cualquier parcela con al menos un ejemplar de la especie. Además, las ubicaciones utilizadas como presencias para entrenar los algoritmos se han seleccionado de entre las ubicadas dentro de las regiones biogeoclimáticas (ELENA ROSELLÓ, 1997) presentes en Castilla y León. Para *Sorbus*

domestica y *Celtis australis* el número de presencias se complementó con localizaciones facilitadas por el INIA-DGB (2002-2007) y con las bases de datos de la Infraestructura Mundial de Información en Biodiversidad (GBIF, www.gbif.org). Se reservó al menos el 30% de la muestra para validar los modelos.

II) Datos climáticos: se ha utilizado el Atlas Climático Ibérico (AEMET, 2011) en formato ráster, con 1 km de resolución. Se seleccionaron siete variables climáticas definidoras del régimen pluviométrico, térmico y del balance hídrico, de tal manera que estas tres componentes del espacio climático quedaran suficientemente equilibradas: i) régimen pluviométrico: precipitaciones total anual (PT), primaveral (PP) y estival (PV); ii) régimen térmico: temperatura media de las mínimas del mes más frío (TNF) y temperatura media de las máximas del mes más cálido (TXC) y iii) balance hídrico: índice hídrico de Thornthwaite (IH) e intensidad de la sequía según Gaussen (ISQ).

A.2. Métodos estadísticos

El proceso de modelización seguido ha sido el conocido como “predicción conjunta” o *ensemble forecasting* (ARAÚJO & NEW, 2007), que consiste en generar modelos de aptitud con distintos algoritmos de cálculo e integrar sus resultados. Hemos empleado los algoritmos Maxent (PHILLIPS et al, 2006) y API (ALONSO PONCE et al, 2010), ambos de uso libre y especialmente indicados cuando se cuenta con datos contrastados de presencias pero no de ausencias. El primero se ha ejecutado mediante la aplicación homónima, mientras que el segundo se encuentra disponible en la aplicación Moderforest (ALONSO PONCE et al, 2022). En ambos algoritmos, y para todas las especies, se ha dividido la muestra en submuestras aleatorias de entrenamiento y validación, repitiendo 30 veces cada proceso.

Para validar cada modelo y establecer los umbrales de corte de los indicadores de aptitud generados (que pueden ser interpretados como probabilidades de presencia *sensu lato*), se ha empleado el procedimiento basado en la curva de Boyce-Hirzel (HIRZEL et al, 2006). Para cada uno de los dos algoritmos se han definido cuatro clases (extramarginal o no apto, marginal, adecuada y óptima), a las que se les ha asignado el valor ordinal 0, 1, 2 y 3, respectivamente. Sumando los valores ordinales de los dos algoritmos se obtiene una capa ráster de predicción conjunta con valores que varían entre 1 a 6. Finalmente, las clases de aptitud derivadas de estos valores ordinales se han definido de la siguiente manera: 1: marginal crítica; 2: marginal; 3: adecuada; 4: buena; 5: excelente; 6: óptima.

B. Ensayos experimentales

B.1. Emplazamiento y características de las zonas de ensayo

Para determinar la aptitud, producción, fenología y pauta de crecimiento de las especies analizadas se establecieron ensayos comparativos en varias localizaciones de Castilla y León (Figura 1). Las características edafoclimáticas de cada zona de ensayo, y su código correspondiente, se muestran en la Tabla 1.

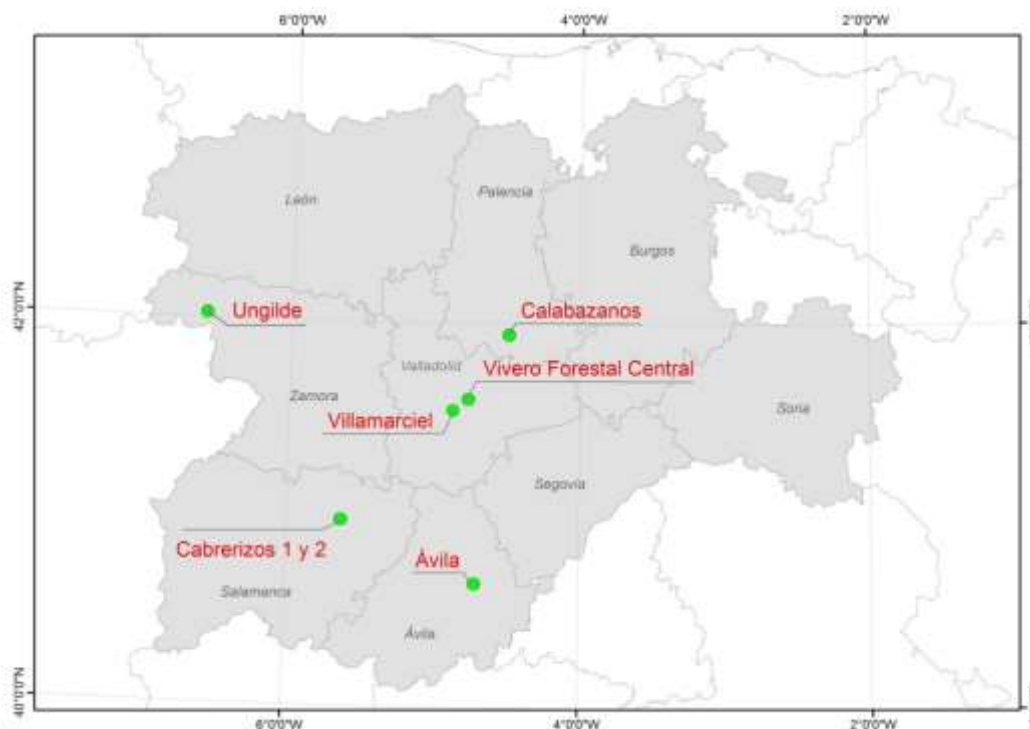


Figura 1. Localización de los ensayos en Castilla y León.

Tabla 1. Características edafoclimáticas medias de las zonas de ensayo. TM: temperatura media anual (°C), PA: precipitación anual (mm), PE: precipitación media mensual mínima estival (mm), HSEG: número de meses de helada segura, ALT: altitud media (m), % are/lim/arc: porcentaje de arena, limo y arcilla. Fuente: ITACyL y análisis propios.

ENSAYO	ÁVILA	CABRERIZOS	CALABAZANOS	UNGILDE	VIVERO FORESTAL CENTRAL	VILLAMARCIEL
Código ensayo	AVI	CAB1 y CAB2	CAL	UNG	VFC	VIL
Provincia	Ávila	Salamanca	Palencia	Zamora	Valladolid	Valladolid
TM	10,7	11,8	11,8	9,8	11,8	11,8
PA	422	425	436	1037	435	442
PE	16	11	15	19	13	14
HSEG	2,8	1,4	0,4	3,6	2,1	1,9
ALT	1082	794	729	971	686	690
% are/lim/arc	62/5/33	64/17/19	30/38/32	65/22/13	50/25/25	82/10/8
pH	-	8,29	8,67	-	8,5	8,1

B.2. Material vegetal y diseño de ensayos

Los materiales testados son cerezos (*Prunus avium*), nogales (*Juglans regia* y *J. x intermedia*) y jerbos (*Sorbus domestica*) (Tabla 2).

En el caso del cerezo y jerbo se trata de clones seleccionados y producidos mediante cultivo *in vitro* por la JCyL, algunos de ellos catalogados como materiales de base. La planta se cultivó en alveolo forestal de 1200 cm³ de capacidad y se plantó con una altura de 40-70 cm, a excepción de los ensayos de Ávila y Calabazanos, que era de 235 cm³ y altura 20-40 cm.

En las parcelas de nogal se comparan progenies de varias fuentes semilleras de Castilla y León y dos híbridos comerciales, Mj209×Ra y Ng23×Ra, facilitados por el IRTA con una savia. Dichos materiales se plantaron a raíz desnuda, excepto el III y VI que estaban cultivados en envase forestal de 400 cm³. Los híbridos se plantaron con una altura de 40-100 cm, la planta en envase con 50-100 cm, y los materiales V y VI con 60-120 cm.

Los ensayos siguen un diseño de bloques completos al azar con marco de plantación de 5x5 metros, excepto Cabrerizos, que fue 5x6, y los campos de plantas madre, que no siguen un diseño estadístico. El mantenimiento de las plantaciones consiste en gradeos periódicos, dos o tres riegos estivales en la mayoría de los casos y dos podas anuales, una de formación en invierno y otra de calidad a principios de verano. Se aplicaron prácticas culturales conforme a los criterios técnicos de silvicultura de calidad (CISNEROS et al, 2010), con un régimen de podas homogéneo.

Tabla 2. Material testado en cada sitio de ensayo. Se indica el código de material base en caso de estar catalogado. Entre paréntesis, el año de plantación. *: Campo de plantas madre

Material	Código material	Material base	AVI (2016)	CAB1 (2008)	CAB2 (2010)	CAL (2015)	UNG (2011)	VIL (2010)	VFC* (2017)
<i>Prunus avium</i>	AV5			X	X		X	X	
	AV7			X	X		X	X	
	BU12	CL-Q-95/CYL-04	X			X	X	X	X
	LE1							X	
	LE4	CL-Q-95/CYL-02	X			X	X	X	X
	SA2			X	X		X	X	
	SA4	CL-Q-95/CYL-01	X	X	X	X	X	X	X
	SO1	CL-Q-95/CYL-03	X			X	X		X
S08						X	X		
Material	Código material	Material base				CAL (2015)			VFC (2015)
Mj209xRa	I	PF-Q-751/08/001				X			X
Ng23xRa	II	PF-Q-751/08/003				X			X
<i>Juglans regia</i>	III	FS-75/16/09/003				X			X
	IV	FS-75/19/05/005				X			X
	V	FS-75/05/49/003							X
	VI	FS-75/19/05/002							X
Material	Código material	Material base	AVI (2016)	CAB (2013)		CAL (2012)			VFC* (2017)
<i>Sorbus domestica</i>	101	CL-Q-478/CYL-101	X	X		X			X
	102	CL-Q-478/CYL-102	X						X

B.3. Variables analizadas

Las variables de crecimiento analizadas fueron el diámetro normal (D) y la altura total (H), que se midieron anualmente en todas las parcelas. En el caso de nogal, y dado el diferente formato de cultivo y tamaño del material, se calculó además el incremento medio anual en altura (ΔH) y en diámetro (ΔD).

En las parcelas de Calabazanos, Ávila y Vivero Forestal Central (en adelante, VFC), así como en los campos de plantas madre de *Prunus avium* y *Sorbus domestica* que la JCyL dispone en el VFC de Valladolid, se realizó un análisis de fenología midiendo la fecha de brotación y de caída de la hoja entre los años 2018 y 2021. En cerezo y jerbo se usó como inicio de brotación el estadio 09 (yemas foliares hinchadas y verdes) de la escala BBCH para frutales de hueso (MEIER et al, 1994), y el estadio 95 (50% de hojas en suelo) para la caída de hoja; en nogal se empleó el estadio fenológico Cf2 para la brotación, según

descripción de GERMAIN et al, (1999), y la pérdida de al menos 50% de la hoja (DÍAZ & FERNÁNDEZ-LÓPEZ, 2005) para la caída. Se transformaron estas fechas en días julianos para su análisis como variables cuantitativas medias, y se calculó el periodo vegetativo promedio de cada individuo como la diferencia entre la media de las dos variables anteriores.

Además, en las parcelas de Ávila, Cabrerizos, Calabazanos, Ungilde y VFC se realizó un estudio cualitativo de calidad del fuste entre los años 2018 y 2021. Para ello se analizó la variable rectitud del tronco hasta los 2 metros de altura, según una escala de tres niveles (7: tronco recto, 4: ligera curvatura que puede desaparecer externamente con los años y 1: curvatura muy pronunciada e irrecuperable), y la dominancia apical (7: una guía dominante, 4: bifurcado pero recuperable con poda, 1: bifurcado irrecuperable).

B.4. Análisis estadístico

Se llevó a cabo un análisis de la varianza de las variables cuantitativas mediante modelo lineal mixto, tanto a nivel individual como para comparar los sitios de ensayo, usando en el primer caso el material genético como efecto fijo y el bloque como aleatorio, y en el segundo, el material genético, el sitio de ensayo e interacción entre ambos como efectos fijos, y como efecto aleatorio el bloque anidado en cada zona de ensayo. Se empleó la función *lmer* del paquete *lme4* (BATES et al, 2015), con estimación de máxima verosimilitud restringida (REML), y *lmerTest* (método Satterthwaite), del software estadístico R. Las comparaciones a posteriori de las medias, ajustadas con la librería *emmeans* de R, se realizaron con la prueba de Tukey ($p < 0.05$).

Para las variables cualitativas (rectitud y dominancia) se llevó a cabo el ajuste de un modelo generalizado multinomial, usando como efectos fijos el genotipo, el sitio de ensayo y la interacción entre ellos, y test de razón de verosimilitud (likelihood-ratio tests; L-R χ^2). Para ello se empleó la función *multinom* del paquete *nnet* del software R.

4. Resultados

A. Modelos de aptitud climática

Los modelos de aptitud reflejaron una diversa potencialidad para las seis especies analizadas (Figura 2). Así, *F. excelsior* y *S. torminalis* presentan una buena aptitud únicamente en las comarcas netamente atlánticas de Castilla y León; *C. australis*, por el contrario, alcanza los mejores valores de aptitud en las comarcas más térmicas del sudoeste de la región, aunque se detectan ciertos enclaves de aptitud marginal en zonas del centro de la cuenca. *Prunus avium* muestra una buena idoneidad en amplias zonas de la orla montañosa, mientras que *J. regia*, si bien concentra sus mejores valores en la parte nororiental y oriental de la región, presenta amplias zonas de aptitud marginal en buena parte de la misma. Por último, *S. domestica* es la especie con mayor vocación climática fuera de la orla montañosa.

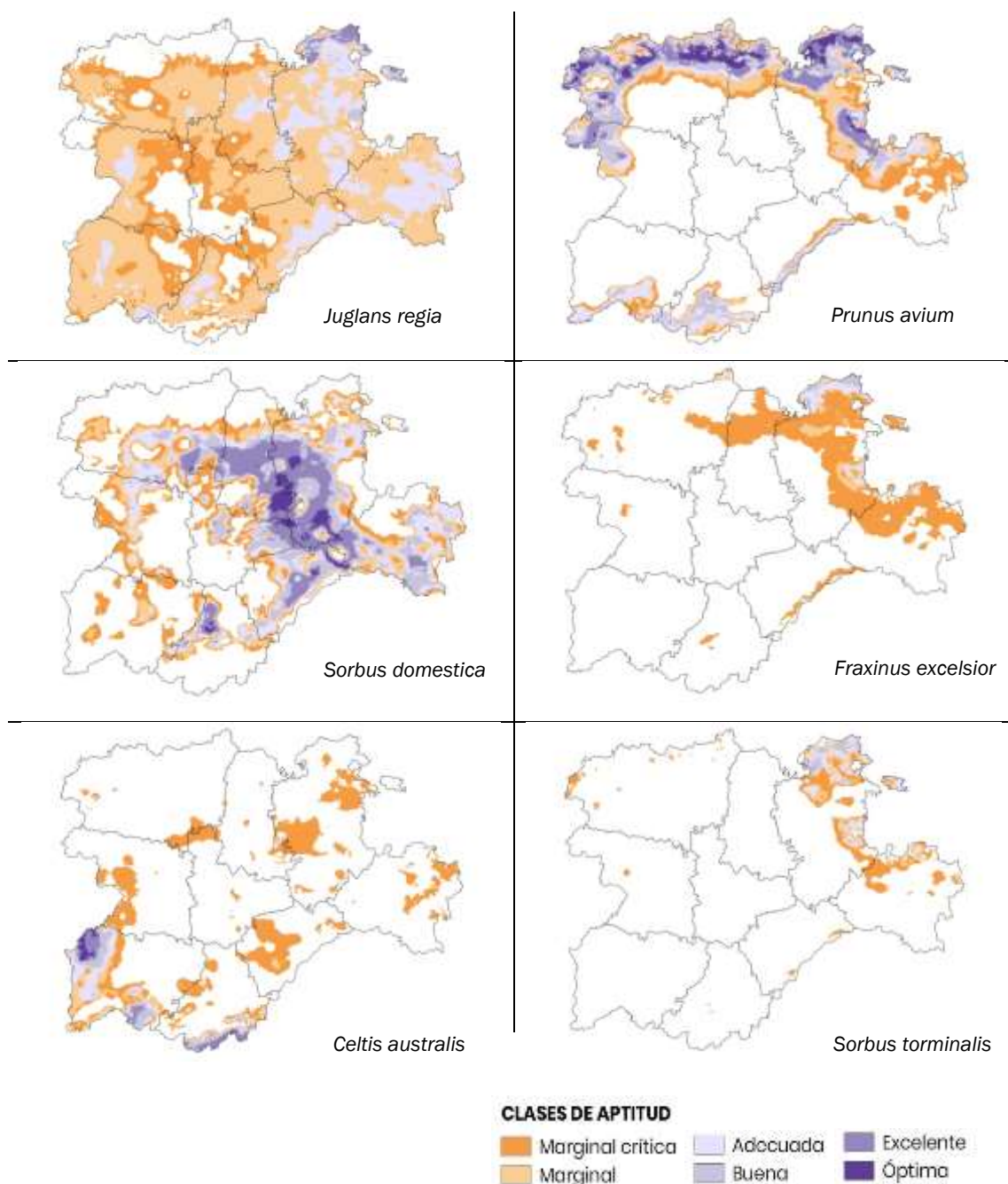


Figura 2. Modelos de aptitud climática en Castilla y León para las seis especies de interés consideradas.

B. Ensayos experimentales

Prunus avium

En el análisis individual de cada ensayo se detectaron diferencias significativas entre clones para la variable diámetro en todos los casos (Tabla 3). Igualmente la variable altura (datos no mostrados) reflejó diferencias entre clones excepto en la parcela de Calabazanos donde, a los 6 años de edad, no fue significativa.

Tabla 3. Media, y error estándar asociado, del diámetro de cada clon en cada ensayo a la edad especificada. Nivel de significación: * <0.05 , ** <0.01 ; *** <0.001 . (e: edad de análisis del ensayo, n: número de árboles analizados, D: media del diámetro, SE: error estándar de la media). Letras iguales indica que no hay diferencias significativas ($p>0.05$).

AVI *** e= 4 años					CAB1 *** e= 12 años				
clon	n	D (cm)	SE		clon	n	D (cm)	SE	
LE4	40	1.06	0.126	a	AV7	9	9.01	1.26	a
BU12	35	1.28	0.132	a	AV5	13	10.60	1.16	ab
SA4	38	1.40	0.129	ab	SA2	15	11.88	1.12	b
SO1	44	1.71	0.123	b	SA4	12	14.58	1.17	c

CAB2 *** e=11 años					CAL * e=6 años				
clon	n	D (cm)	SE		clon	n	D (cm)	SE	
AV7	10	8.51	0.930	a	LE4	16	8.68	0.747	a
AV5	13	10.70	0.740	ab	SO1	19	9.83	0.782	ab
SA4	12	11.62	0.744	bc	BU12	17	10.08	0.730	ab
SA2	15	13.19	0.731	c	SA4	18	11.45	0.758	b

UNG * e=10 años					VIL *** e=10 años				
clon	n	D (cm)	SE		clon	n	D (cm)	SE	
SO1	7	6.04	1.42	a	SO8	26	6.18	0.59	a
SO8	12	6.52	1.19	ab	BU12	35	6.78	0.52	a
LE4	8	6.99	1.67	ab	LE4	41	6.96	0.55	a
BU12	13	7.64	1.13	ab	AV7	10	7.21	0.36	a
SA2	9	8.79	1.42	ab	LE1	42	7.36	1.23	ab
SA4	12	10.38	1.13	ab	SA2	10	7.49	0.56	a
AV7	10	11.00	1.16	b	AV5	38	7.69	1.40	ab
					SA4	74	9.09	0.47	b

El clon SA4 aparece consistentemente como uno de los materiales con valores más elevados en diámetro y altura en todas las zonas, si bien únicamente en la parcela de Villamarciel, estación bastante alejada del óptimo ecológico de la especie, presenta diferencias significativas respecto a la mayoría de clones catalogados. En las dos parcelas de Cabrerizos, donde se observaron numerosos casos de quemaduras solares y gomosis en tronco, los clones testados proceden del Sistema Central, presentando SA2 valores de diámetro elevados, y superiores al resto en altura aunque sin diferencias significativas respecto a SA4.

Aunque no todos los ensayos se instalaron el mismo año, comparando las parcelas de Calabazanos, Ungilde y Villamarciel a partir de los datos que presentaban cada una de ellas a los 6 años de edad, se aprecian diferencias significativas entre clones ($p < 0.01$) y zonas de ensayo ($p < 0.001$) para la variable diámetro, así como interacción entre ambos factores ($p < 0.05$). El ensayo de Calabazanos mostró un mayor crecimiento, probablemente por riegos estivales algo más abundantes. Entre los clones catalogados destaca SA4, con un valor de diámetro medio ajustado superior al resto y significativamente más patente en Calabazanos. LE4 aparecía como el clon con valores más bajos mientras que BU12 presentaba valores intermedios. Del resto de clones son reseñables los elevados valores en diámetro de SA2, con una notable superioridad frente al resto en el ensayo de Ungilde.

Se compararon los ensayos de Ungilde y Villamarciel con datos referidos a la edad de 10 años (Figura 3), obteniendo diferencias en diámetro y altura altamente significativas entre clones ($p < 0.001$). Se detectaron diferencias entre zonas para la variable altura, así como para la interacción de material y zona. El clon SA4 presentó, nuevamente, los valores más elevados, con una media ajustada significativamente superior a LE4 y SO8 tanto en altura como en diámetro. LE4 tenía valores medios en Villamarciel pero muy bajos en Ungilde, mientras que BU12 aparecía siempre con valores medios ajustados intermedios, continuando con el patrón detectado en la comparativa a los 6 años.

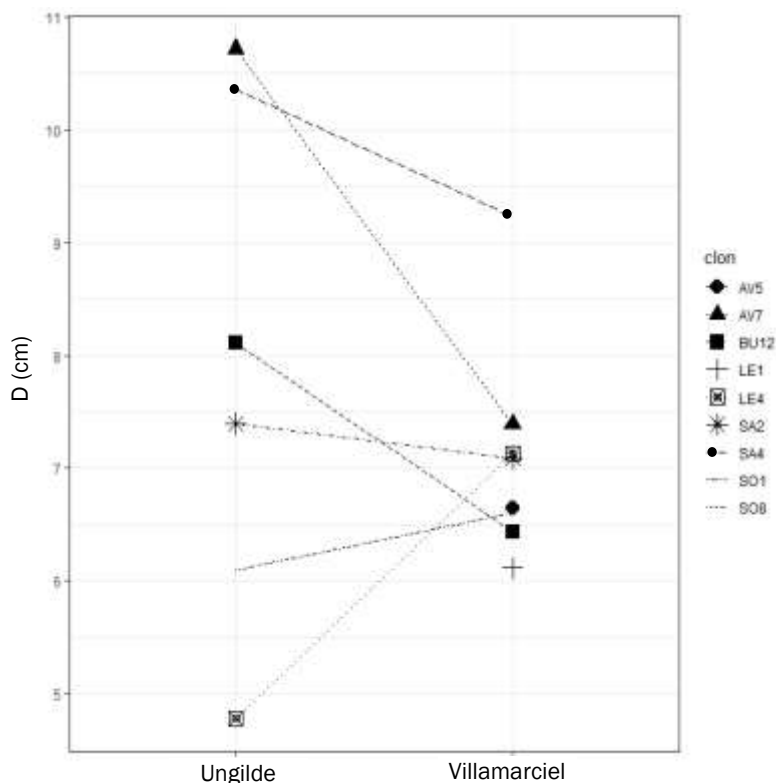


Figura 3. Media ajustada de la variable diámetro (D) en los clones de cerezo comparados a los 10 años en los ensayos Ungilde y Villamarciel.

En el análisis fenológico se detectaron diferencias significativas en la duración del periodo vegetativo e inicio de brotación ($p < 0.001$) entre los distintos clones de cerezo catalogados, pero no así entre ensayos. En todos los casos fue significativa la interacción entre clon y zona. El clon LE4 presenta una brotación más tardía en todos los ensayos así como un menor periodo vegetativo. Por su parte, el clon SA4 era más tardío en caída de la hoja, especialmente en la parcela del VFC. En el resto de clones no se apreciaron diferencias significativas.

El análisis multinomial indicó diferencias en rectitud entre los cuatro clones catalogados ($p < 0.05$) y de dominancia entre zonas ($p < 0.001$). En ambos casos fue significativa la interacción entre los clones y las zonas ($p < 0.05$). El clon que más sobresale por conformación de fuste fue SO1, con un 57% de ejemplares con una rectitud de nivel óptimo en Ávila, 58% en Calabazanos y 33% en Ungilde. Por el contrario el clon SA4 presentaba los valores promedio de rectitud óptima más bajos (20% de árboles), aunque con valores elevados en Calabazanos (40%). En Ávila un 60% de los árboles presentaban buena dominancia (valor 7), con escasas diferencias entre clones.

Juglans spp.

Se observan diferencias significativas entre los materiales de nogal comparados en los ensayos de Calabazanos y VFC tanto en incremento medio anual en altura ($p < 0.01$) como en diámetro ($p < 0.05$), pero no así entre zonas. No se detectó interacción entre genotipos y ambiente.

Las progenies híbridas presentaron unos crecimientos medios ajustados claramente superiores al resto en ambas parcelas (Tabla 4), especialmente Ng23xRa (II), aunque con diferencias significativas ($p < 0.05$) únicamente respecto al material III que resultó ser netamente inferior al resto. El material IV, procedente de una fuente semillera de León (FS-

75/19/05/005), presentaba unos valores intermedios de crecimiento en altura y no inferiores estadísticamente al híbrido Mj209xRa.

Tabla 4. Valores medios ajustados, y error estándar (SE) asociado, del incremento medio anual en altura (ΔH) y en diámetro (ΔD) de los diferentes materiales en los dos ensayos considerados.

Material	Calabazanos				VFC			
	ΔH (m)	SE	ΔD (cm)	SE	ΔH (m)	SE	ΔD (cm)	SE
I	0.84	0.49	2.22	0.15	0.59	0.16	1.43	0.28
II	0.84	0.51	2.25	0.16	0.75	0.16	2.25	0.27
III	0.75	0.41	1.87	0.16	0.47	0.16	1.10	0.28
IV	0.77	0.40	1.75	0.16	0.70	0.16	1.37	0.30
V					0.69	0.16	1.04	0.26
VI					0.60	0.16	1.23	0.28

Se detectaron diferencias muy significativas entre materiales para las distintas variables fenológicas consideradas ($p < 0.001$), e interacción entre material y zona ($p < 0.05$). A excepción del material V (FS-75/05/49/003) en el VFC, las progenies autóctonas presentaron una mayor precocidad en la brotación (Figura 4) respecto a las materiales híbridos cuya media era posterior al 6 de mayo (día 125) en todos los casos.

El análisis multinomial de la rectitud y dominancia indicó diferencias significativas entre los diferentes materiales y zonas comparadas ($p < 0.001$), no así entre bloques ni en la interacción material y zona. La progenie III presentó los peores valores de rectitud en ambos ensayos. Las progenies híbridas mostraban valores algo superiores en el nivel óptimo de rectitud, mientras que el material IV se comportaba de manera intermedia. En el factor dominancia no se aprecian diferencias importantes entre materiales, aunque la progenie del IV presentaba porcentajes inferiores en todos los niveles.

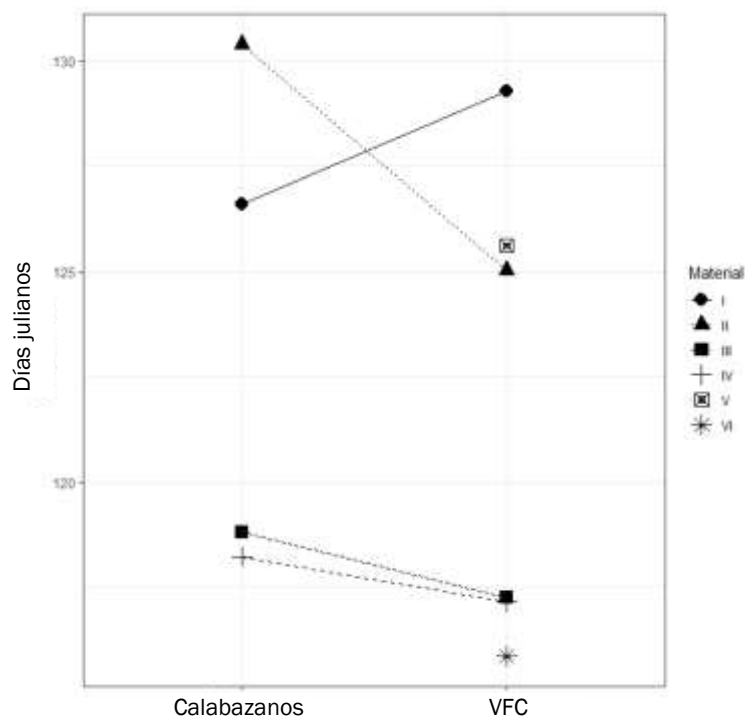


Figura 4. Media ajustada del inicio de la brotación de los materiales de nogal en cada ensayo.

Sorbus domestica

En el ensayo de Ávila no se detectaron, a los 4 años de edad, diferencias significativas en ninguna variable cuantitativa ni de forma ($p > 0.05$) entre los dos clones de jerbo testados. Tampoco se detectaron diferencias fenológicas entre clones ni respecto a la parcela del VFC.

En la comparación del único clon presente en Calabazanos y Cabrerizos (CYL-101), se observaron elevadas diferencias entre zonas ($p < 0.001$), tanto en diámetro como en altura, a los 8 años de edad. En Calabazanos se obtuvo un diámetro medio de 7,92 cm, con crecimientos próximos a 1 cm/año en diámetro y 70 cm/año en altura; valores éstos significativamente superiores a Cabrerizos, incluso con un aporte hídrico estival inferior (90-150 litros/árbol/año frente a los 300-400 de Cabrerizos), y ello a pesar de un fuerte brote en 2020 de *Venturia inaequalis* (Cke.) Wint, hongo habitual en la especie y que afecta al vigor general de la plantación por marchitamiento de las hojas (BELETE & BOYRAZ, 2017).

El análisis multinomial de las variables rectitud y dominancia reflejó diferencias entre estas dos zonas ($p < 0.05$), pero no entre bloques. El 49% de los árboles de Cabrerizos presentaba el mejor nivel de rectitud, mientras que en Calabazanos esta cifra era muy inferior (21%) y ha ido descendiendo con los años.

5. Discusión

Los modelos de aptitud climática desarrollados para seis especies de interés para madera de calidad revelan una amplia gama de respuestas que permiten identificar áreas adecuadas para al menos una de ellas en prácticamente cualquier punto de la región, salvo en alta montaña y en las zonas más xéricas del centro de la cuenca del Duero. Sin embargo, se trata de modelos de naturaleza exclusivamente climática, por lo que la inclusión de otros factores, como por ejemplo los riegos o la naturaleza del suelo, podrían incrementar sustancialmente las zonas de aptitud. Ello se deduce de los ensayos de campo, donde zonas mostradas como no aptas (caso del cerezo en Calabazanos) o de aptitud marginal (caso del nogal en VFC) ofrecen crecimientos elevados en muchos de los materiales analizados. Así pues, las recomendaciones generales de los modelos deben afinarse para cada material concreto mediante los resultados de los ensayos de campo, permitiendo cuantificar la aptitud e interacción con el ambiente de los clones y progenies testados conforme a la gestión aplicada y a las condiciones edáficas y/o microestacionales.

De acuerdo a los modelos, el nogal se presenta como viable en gran parte del territorio regional, si bien mayoritariamente con carácter marginal, por lo que la rentabilidad probablemente estaría condicionada al aporte de riego. De hecho, el análisis de los índices de marginalidad (GÓMEZ-SANZ, 2019) de las 7 variables climáticas empleadas muestra que las dos relativas al régimen térmico presentan una marginalidad nula o casi nula en las llanuras centrales de la cuenca del Duero (resultados no mostrados), mientras que para las otras cinco variables (particularmente PP), es moderada o alta en esas mismas zonas. La hipótesis de que la disponibilidad de riego haría aumentar considerablemente la aptitud climática podría ser contrastada mediante la generación de modelos de distribución empleando únicamente variables de régimen térmico. Por el contrario, el análisis de la marginalidad para *C. australis* revela que las amplias zonas de extramarginalidad o marginalidad crítica no se derivan de un único grupo de variables, sino que son fruto de la falta de adecuación de dos en particular: TNF y PP. En amplias zonas (fundamentalmente en el norte y este de Castilla y León) es el exceso de frío invernal el factor limitante, mientras que en la zona central de la cuenca es la falta de precipitación primaveral.

El cerezo muestra una excelente aptitud climática en buena parte de la Cordillera Cantábrica y Sistema Ibérico, aunque también presenta aptitud en el Sistema Central. Por su parte, las dos especies con menor área adecuada (*F. excelsior* y *S. torminalis*) coinciden en presentar buena aptitud fundamentalmente en la provincia de Burgos, en concreto en Las Merindades, en las estribaciones de la Sierra de la Demanda y en Treviño.

Por su parte, *S. domestica* destaca por su excelente aptitud en las zonas llanas fuera de la orla montañosa, donde las condiciones fisiográficas favorables (fundamentalmente, bajas pendientes) son más frecuentes, por lo que hacen a este taxón particularmente atractivo.

Los resultados obtenidos de los ensayos experimentales permiten evaluar el comportamiento de los distintos materiales de cerezo, nogal y jerbo. Así, en el caso de cerezo se observaron diferencias estadísticas entre los diferentes genotipos analizados, siendo el clon SA4 un material de comportamiento claramente superior al resto en la mayoría de ambientes. Se comporta como un clon generalista capaz de desarrollarse con vigor en multitud de condiciones por su baja interacción ambiental. Por el contrario, no se identificó ningún clon especialista, ni ninguno que fuera claramente inferior en alguna de las estaciones analizadas, si bien son ensayos en edades juveniles en todos los casos. Algunos clones de cerezo no catalogados presentaron elevados crecimientos en algunos de los ensayos; este es el caso del clon SA2, que podría ser una opción interesante en estaciones de marcada continentalidad, y que en su día se decidió no catalogar en favor de SA4, con mejor propagación *in vitro*. Sin embargo, trabajos que comparaban diferentes clones de cerezo (GUARDIOLA, 2014; VILANOVA & ALETÀ, 2011), entre los que se encontraban SA2, SA4, BU12 y LE4, indicaron una clara superioridad de SA4 frente a SA2 en la mayoría de sitios de ensayo. No se detectaron diferencias entre los clones de cerezo en conformación de fuste, que en general presentaron buenos valores de dominancia y rectitud. No obstante, la gestión selvícola aplicada probablemente ha enmascarado el efecto clonal de la dominancia apical, homogeneizando las diferencias mediante la poda de formación. La rectitud, sin embargo, se ha visto afectada por el factor genético y el vigor del clon en cada zona, presentando los clones de menor desarrollo las mejores conformaciones. Los rasgos fenológicos parecen estar sometidos a un importante control genético en esta especie, similar al comprobado con la floración (DUCCI & PROIETTI, 2005), detectándose diferencias significativas entre clones.

Las parcelas de nogal estudiadas presentaban crecimientos en altura y diámetro similares a los obtenidos en otros trabajos (ALETÀ et al, 2003, ALETÀ y VILANOVA, 2011, DÍAZ & FERNÁNDEZ-LÓPEZ, 2005). A pesar de que las parcelas se ubican en estaciones alejadas del óptimo de aptitud climática según los modelos, los altos valores de crecimiento (cerca de 2 cm/año en diámetro de las progenies híbridas), aunque con diferencias entre materiales, indican la relevancia del factor riego en este tipo de plantaciones. Por otro lado, el hecho de que algunos materiales hayan presentado crecimientos mediocres incluso con riego, apoya la idea de que el análisis de aptitud debe incluir factores edáficos para obtener resultados concluyentes a escala de parcela. Dada la correlación juvenil-adulto de caracteres vegetativos en la especie (RINK & KUNG, 1995) es esperable que se mantengan las tasas de crecimiento hasta la edad de turno, que no sería antes de los 25-30 años en los mejores de los casos (BECQUEY, 2005). Combinando potencial cualitativo y crecimiento, los nogales híbridos superan al resto de materiales en producción de madera de calidad, presentan mayor rectitud y unas brotaciones más tardías, lo cual es coincidente con otros ensayos de la red europea (FADY et al, 2003). Sin embargo, algunas progenies autóctonas presentan unos crecimientos y conformación de fuste más que aceptable, con unas diferencias que podrían ser mucho menos acusadas en los suelos más fértiles, donde los híbridos no siempre presentan un mejor crecimiento que las progenies locales (FADY et al, 2003). El mayor aprecio a la madera de *J. regía*, unido a la ventaja de producir fruto desde edades tempranas, pudiera hacer algunos de estos

materiales locales seleccionados mucho más atractivos económicamente, especialmente en un contexto multifuncional o en sistemas agroforestales (KAESER et al, 2010).

El jerbo presenta en Castilla y León una alta aptitud termopluviométrica (Figura 2), y podría ser una alternativa a tener en cuenta en estaciones ecológicas limitantes para otras especies como el cerezo o nogal (TURRIENTES et al, 2009). Por su marcada rusticidad (ORIA DE RUEDA et al, 2006) y su cotizada madera para ebanistería (MARTÍNEZ DE AZAGRA Y ORIA DE RUEDA, 2004), su uso es muy interesante en suelos más pobres y con escasas precipitaciones. Considerada de crecimiento lento, se observa en este trabajo que en suelos profundos, cuidados adecuados, y suplemento hídrico, puede tener desarrollos muy elevados. Los valores de dominancia y rectitud de fuste de los clones analizados se pueden considerar adecuados, al menos en etapas juveniles, pero deberá continuar evaluándose el posible factor genético de las curvaturas de fuste detectado en los últimos años en la parcela de Calabazanos, de más edad y por tanto mayor desarrollo.

El jerbo y otras especies de serbal, así como el fresno o almez, pueden suponer una alternativa o complemento al cerezo y nogal, dada la gran aptitud observada en los modelos. La selección y evaluación de estos materiales está aún en una fase muy incipiente pero sin duda suponen una opción a tener en cuenta en el futuro, probablemente sin necesidad de elevados niveles de mejora genética.

Los altos precios de la madera de alta calidad, y la tendencia creciente de su consumo, puede hacer de estas plantaciones una interesante alternativa económica, especialmente si están incentivadas, como es el caso en Castilla y León donde se puede llegar a subvencionar 2.800 €/ha. Y aún cobrarían mayor interés si se pudieran integrar ayudas agroforestales para simultanear el aprovechamiento de madera con otros recursos agrícolas y ganaderos; aumentaría sin duda la rentabilidad de muchas explotaciones al obtener una producción más eficiente tanto en el tiempo como en el espacio (DUPRAZ & LIAGRE, 2008).

6. Conclusiones

Las plantaciones de madera de alto valor pueden suponer una interesante alternativa forestal de desarrollo rural si se emplea un material adecuado y en estaciones idóneas. Sin embargo, no existe demasiada información sobre los materiales a utilizar ni las zonas potenciales de uso.

Los mapas de aptitud climática obtenidos en este trabajo determinan las zonas recomendables de uso de algunas especies con interés para madera de calidad, aunque el aporte de riego puede incrementar notablemente dichas zonas de aptitud. Sería interesante abordar modelos específicos para los distintos materiales, por ejemplo a nivel de clon, e integrar variables edáficas para una mayor representatividad.

Los resultados de los ensayos de campo de cerezo, nogal y jerbo establecidos hasta la fecha complementan la información de los modelos climáticos, ofreciendo datos preliminares de crecimiento, fenología y comportamiento cualitativo de los distintos materiales. Con una información más avanzada se podrá disponer de recomendaciones de utilización más detalladas, discriminando los materiales más adecuados en cada zona.

La línea de ayudas de la Junta de Castilla y León para el fomento de las especies de madera de calidad puede hacer mucho más interesante este tipo de plantaciones, especialmente si se implementara en un contexto de agroforestería.

7. Agradecimientos

Los autores desean agradecer a los compañeros de la Junta de Castilla y León, así como al personal de TRAGSA implicado, la colaboración en la instalación, mantenimiento y medición de los ensayos. Agradecimiento también a los investigadores del desaparecido

Centro de Investigación Forestal de Valonsadero (Soria), y en especial a Óscar Cisneros, donde comenzó la selección y testado de muchos materiales comentados en este trabajo. Jaime Coello, Toni Vilanova, Neus Aletà, Ricardo Alía y Valentín Pando mejoraron el texto con sus revisiones.

8. Bibliografía

AEMET (2011). *Atlas Climático Ibérico*. Ministerio de Medio Ambiente y Rural y Marino Madrid. pp 79.

ALETÀ, N.; NINOT, A.; VOLTAS, J. (2003). Caracterización del comportamiento agroforestal de doce genotipos de nogal (*Juglans sp.*) en dos localidades de Cataluña. *Inv Agrar Sist Rec F*, 12, 39-50.

ALETÀ, N.; VILANOVA, A. (2011). Evaluación del crecimiento y la producción de nogal. *Navarra Forestal*, 28, 11–16.

ALETÀ, N.; VILANOVA, A. (2014). Les plantacions espanyoles d'alt valor. *Catalunya Forestal*, 119, 21–24.

ALETÀ, N.; VILANOVA, A.; VOLTAS, J. (2009). Comportamiento de 24 progenies de nogal común (*Juglans regia L.*) para su uso en la producción de madera. Resultados hasta el sexto año de crecimiento. *5º Congreso Forestal Español*. Ávila, España.

ALONSO PONCE, R.; GÓMEZ-SANZ, V.; LÓPEZ-SENEPLEDA, E.; RUÍZ-PEINADO, R.; MONTERO, G.; SÁNCHEZ-PALOMARES, O.; SERRADA, R. (2022). MODERFOREST: más que una aplicación para la elección de especie y origen de la semilla en repoblaciones forestales. *8º Congreso Forestal Español (En Revisión)*. Lleida, España.

ALONSO PONCE, R.; LÓPEZ SENEPLEDA, E.; SÁNCHEZ PALOMARES, O. (2010). A novel application of the ecological field theory to the definition of physiographic and climatic potential areas of forest species. *Eur J For Res*, 129(1), 119–131.

ARAÚJO, M. B.; NEW, M. (2007). Ensemble forecasting of species distributions. *Trends Ecol Evol*, 22(1), 42–47.

AUSTIN, M. P. (2002). Spatial prediction of species distribution: an interface between ecological theory and statistical modelling. *Ecol Model*, 157(2–3), 101–118.

BATES, D.; MÄCHLER, M.; BOLKER, B.; WALKER, S. (2015). *lme4: Linear mixed-effects models using Eigen and S4. R package version 1.1–7. 2014.*

BECQUEY, J. (2005). Plantations de noyer sur terres agricoles. En Jornadas Hispanofrancesas del Nogal: Fruto y Madera. La Pobla de Mafumet (Tarragona), 22-24 Noviembre 2005.

BELETE, T.; BOYRAZ, N. (2017). Critical review on apple scab (*Venturia inaequalis*) biology, epidemiology, economic importance, management and defense mechanisms to the causal agent. *J Plant Physiol Pathol*, 5(2), 2.

CISNEROS, O.; MARTINEZ, V.; MONTERO, G.; ALONSO, R.; TURRIENTES, A.; LIGOS, J.; SANTANA, J. (2010). Plantaciones de frondosas en Castilla y Leon. Cuaderno de campo. Junta de Castilla y Leon, Consejería de Fomento y Medio Ambiente. Valladolid, España.

COELLO, J.; BAIGES, T.; CERVERA, T.; ALCOVERRO, F. (2015). Plantacions agroforestals de noguera i freixe amb cultius herbacis. Un sistema productiu innovador amb interès ambiental. XXXII Jornades Tècniques Silvícoles Emili Garolera. Consorci Forestal de Catalunya. Santa Coloma de Farners, 60–71.

COELLO, J.; PIQUÉ, M. (2009). Plantaciones mixtas de nogal, serbal y fresno para la producción de madera de calidad y restauración forestal. 5º Congreso Forestal español. Ávila, España.

DÍAZ, R.; FERNÁNDEZ-LÓPEZ, J. (2005). Genetic variation at early ages for several traits of interest for timber-production breeding of *Juglans regia*. *Can J For Res*, 35(2), 235–243.

DUCCI, F.; PROIETTI, R. (2005). Variabilità del ciliegio selvatico in Italia. En Ducci (Ed.), *Monografia sul ciliegio selvatico*, 17–27.

DUPRAZ, C.; LIAGRE, F. (2008). Agroforesterie: des arbres et des cultures. France Agricole Editions. Paris.

ELENA ROSELLO, R. (1997). Clasificación biogeoclimática de España peninsular y balear. Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación. Madrid.

FADY, B.; DUCCI, F.; ALETA, N.; BECQUEY, J.; DIAZ VAZQUEZ, R.; FERNANDEZ LOPEZ, F.; JAY-ALLEMAND, C.; LEFÈVRE, F.; NINOT, A.; PANETSOS, K. et al (2003). Walnut demonstrates strong genetic variability for adaptive and wood quality traits in a network of juvenile field tests across Europe. *New For*, 25, 211–225.

GERMAIN, E.; PRUNET, J.-P.; GARCIN, A. (1999). *Le noyer*. CTIFL. Paris. pp 279.

GÓMEZ-SANZ, V. (2019). Site-scale ecological marginality: Evaluation model and application to a case study. *Ecol Model*, 408, 108739.

GONZALO, J. (2010). Diagnosi fitoclimàtica de la Espanya peninsular. *Organismo Autónomo Parques Nacionales*, Ministerio de Medio Ambiente Rural y Marino. Madrid.

GUARDIOLA, N. (2014). Comportament adaptatiu i productiu de genotips espanyols de *Prunus avium* L . seleccionats per fusta: fenologia , creixement i conformació. Master. Universidad de Lleida.

HIRZEL, A. H.; LE LAY, G.; HELFER, V.; RANDIN, C.; GUISAN, A. (2006). Evaluating the ability of habitat suitability models to predict species presences. *Ecol Model*, 199(2), 142–152.

KAESER, A.; SEREKE, F.; DUX, D.; HERZOG, F.; RECKENHOLZ-TÄNIKON, A. R. T. (2010). Agroforesterie moderne en Suisse. *Vergers Novateurs: Productivité et Rentabilité. Rapport ART*, 725, 1–12.

MARTÍNEZ DE AZAGRA, A.; ORIA DE RUEDA, J. A. (2004). Der Speierling (*Sorbus domestica* L.) in Spanien. *Corminaria*, 22, 3–8.

MEIER, U.; GRAF, H.; HACK, H.; HESS, M.; KENNEL, W.; KLOSE, R.; MAPPE, D.; SEIPP, D.; STAUSS, R.; STREIF, J. (1994). Phenological growth stages of pome fruit (*Malus domestica* Borkh. and *Pyrus communis* L.), stone fruit (*Prunus* species), currants *Ribes* species and strawberry (*Fragaria x ananassa* Duch.). *Nachr Dtsch Pflanzenschutzd.* 46(7), 141-153.

ORIA DE RUEDA, J. A.; MARTINEZ DE AZAGRA, A.; ALVAREZ, A. (2006). Botánica forestal del género *Sorbus* en España. *Inv Agrar Sist Rec F*, 15(S1), 166-186.

PHILLIPS, S.; ANDERSON, R.; SCHAPIRE, R. (2006). Maximum entropy modeling of species geographic distributions. *Ecol Model*, 190(3–4), 231–259.

RINK, G.; KUNG, F. H. (1995). Age trends in genetic control of *Juglans nigra* L. height growth. In: GOTTSCHALK, K.W.; FOSBROKE, S., (eds) Proceedings, 10th Central Hardwood Forest Conference. 247-255. USDA Forest Service NE. Radnor, PA

RUBIO, A.; SÁNCHEZ-PALOMARES, O. (2006). Physiographic and climatic potential areas for *Fagus sylvatica* L. based on habitat suitability indicator models. *Forestry*, 79(4), 439–451.

TURRIENTES, A.; LIGOS, J.; CISNEROS, O.; ALONSO PONCE, R. (2009). *Sorbus domestica* L. como alternativa para forestación de tierras agrarias en Castilla y León. *5º Congreso Forestal Español*. Ávila, España.

VILANOVA, A.; ALETÀ, N. (2011). Clons de cirerer per a l'obtenció de fusta. Exemple d'una plantació en terrenys agraris. *Catalunya Forestal*, 106, 12-17.