

Suelos y plantaciones de *Pinus nigra* ssp. *salzmanii* en La Rioja (España)

R. Rodríguez-Ochoa^{1,*}, H. Alonso¹, J.R. Olarieta¹

(1) Departament de Medi Ambient i Ciències del Sòl. Universitat de Lleida Rovira Roure, 191. Lleida 25198. España.

* Autor de correspondencia: R. Rodríguez-Ochoa [rrodriguez@macs.udl.cat]

> Recibido el 19 de febrero de 2018 - Aceptado el 24 de junio de 2018

Rodríguez-Ochoa, R., Alonso, H., Olarieta, J.R. 2018. Suelos y plantaciones de *Pinus nigra* ssp. *salzmanii* en La Rioja (España). *Ecosistemas* 27(2): 126-135. Doi.: 10.7818/ECOS.1559

Existe una necesidad de incorporar información edáfica en los modelos de distribución y de crecimiento de especies forestales, y específicamente, esta información también es escasa para *Pinus nigra* ssp. *salzmanii* Arn en La Rioja. Por ello se estudiaron los suelos, el microclima, la vegetación y el crecimiento de esa especie en 18 parcelas en repoblaciones de la zona central de La Rioja. Los suelos con iluviación de arcilla fueron predominantes sobre sedimentos de piedemonte (Alfisolos y Argiudolls), los Inceptisoles y Mollisoles sobre calizas, y Entisoles y Alfisolos sobre lutitas y arenitas silíceas. Fueron escasos los suelos de carácter lítico o superficial. El índice de estación a los 30 años para *P. nigra* varió entre 5.5 m y 11.5 m, aumentando con la profundidad enraizable, el pH y la proporción de arena y elementos gruesos, y disminuyendo con el magnesio de cambio en el horizonte mineral superficial. La composición específica de la vegetación espontánea se relacionó tanto con variables edáficas como climáticas, así como con las labores de preparación del terreno para la plantación. La información de suelos es un requisito imprescindible para entender el funcionamiento de estos ecosistemas forestales.

Palabras clave: Alfisolos; Entisoles; evaluación del territorio; Inceptisoles; Mollisoles; *Quercus pyrenaica*

Rodríguez-Ochoa, R., Alonso, H., Olarieta, J.R. 2018. Soils and *Pinus nigra* ssp. *salzmanii* plantations in La Rioja (Spain). *Ecosistemas* 27(2): 126-135. Doi.: 10.7818/ECOS.1559

There is a need to incorporate soil information into distribution and growth models of forest plant species. This information is particularly scarce for *Pinus nigra* ssp. *salzmanii* Arn in La Rioja. The soils, microclimate, vegetation, and growth of this species were studied in 18 sample plots in plantations in central La Rioja. Soils with clay illuviation (Alfisolos and Argiudolls) predominate on piedmont sediments, while Inceptisols and Mollisols predominate on limestone, and Entisols and Alfisolos on siliceous sandstone and mudstone. Soils were rarely classified within lithic or shallow taxa. Site index at age 30 years for *P. nigra* varied between 5.5 m and 11.5 m, and increased with increasing rootable depth and pH, coarse fragments, and sand content, and decreased with increasing concentration of exchangeable magnesium in the surface mineral horizon of soils. The specific composition of the spontaneous vegetation was related both to soil and climate variables but also to the site preparation techniques used for plantation. Soil information is an essential requirement to understand ecosystem functioning.

Key words: Alfisolos; Entisols; Inceptisols; land evaluation; Mollisols; *Quercus pyrenaica*

Introducción

El conocimiento de las condiciones edáficas es básico para la gestión forestal ya que éstas influyen, junto con otras variables del medio, sobre el crecimiento de las especies forestales y su regeneración (Valentine 1986; Kimmins 1992). Por otro lado, los modelos de distribución actual y potencial de las especies vegetales se han concentrado en la influencia de las variables climáticas, prestando muy poca atención a las variables edáficas (Thuiller 2013), por lo que existe una gran necesidad de obtener información sobre las relaciones entre estas variables y la distribución espacial de las especies (Diekmann et al. 2015; Mod et al. 2016).

Las características edáficas influyen sobre la distribución y el crecimiento de las especies forestales por cuanto afectan al desarrollo radicular (Olarieta et al. 2016), y a la disponibilidad de agua (Elena y Sánchez 1991; Vennetier et al. 2018) y nutrientes (Zöttl y Velasco 1966; Elena y Sánchez 1991), y de oxígeno para las raíces (Sajedi et al. 2012).

La superficie arbolada de La Rioja ocupa 175 260 ha (IFN 2013), de las cuales 40 000 ha corresponden a plantaciones (Ortigosa 1991). El pino laricio (*Pinus nigra* subsp. *salzmannii* (Dunal) Franco) es, junto con el pino albar (*P. sylvestris* L.), la especie más utilizada en estas repoblaciones, ocupando 9428 ha, principalmente a altitudes entre 800 y 1200 m en la zona central de esta comunidad autónoma (IFN 2013).

Trabajos anteriores en sistemas forestales en La Rioja han tratado aspectos como los efectos geomorfológicos de las plantaciones forestales (Ortigosa 1991), mostrando que las técnicas de preparación del terreno utilizadas para la plantación tienen un efecto significativo sobre el desarrollo posterior de ésta, produciendo la técnica de terrazas peores crecimientos que la de fajas. Otros trabajos se han centrado en los hayedos (Blanco et al. 2003), que en esta comunidad aparecen en el rango de altitudes de 850-1640 m con precipitaciones medias anuales de 620-1320 mm, y cuyos suelos taxonómicamente se incluyen en los Cambisoles, Luvisoles, Umbrisoles, y Phaeozems. Las masas autóctonas

de *P. nigra* estudiadas por [Sánchez et al. \(1990\)](#) en diferentes regiones de España, pero no en La Rioja, se desarrollan principalmente sobre Rendzinas que alcanzan valores de pH de 5.8 en el horizonte mineral superficial.

En este trabajo se pretende, por tanto, realizar una primera aproximación a los suelos de las plantaciones de *P. nigra* de La Rioja y a la influencia de las condiciones edafo-climáticas sobre el crecimiento de esta especie y la distribución de la vegetación acompañante.

Material y Métodos

Zona de estudio

La zona central de La Rioja comprende los valles de los ríos Iregua, Leza, y Jubera, así como el frente de la Sierra de Moncalvillo en su caída hasta el Ebro, y abarca altitudes entre 400 m y 1300 m ([Fig. 1](#)). Los materiales geológicos que aparecen son, principalmente, sedimentos detríticos de piedemontes, calizas y conglomerados calizos del Jurásico y sedimentos detríticos de estos materiales, y arenitas y lutitas silíceas del Purbeck-Weald.

Climáticamente ([Martínez y Núñez 1991](#)), la zona tiene una temperatura media anual de 8.5-13.3 °C, una precipitación media anual de 440-810 mm, y una evapotranspiración media anual (método Turc) de 400-650 mm.

Muestreo de campo y análisis de laboratorio

Dada la ausencia de una cartografía detallada de suelos, se planteó la distribución de las parcelas en plantaciones de *P. nigra* en función de las tres variables que podían abarcar una mayor variabilidad edáfica: material geológico, altitud, y orientación, restringida ésta a las dos situaciones extremas, norte y sur, en pendientes superiores al 15%. Pero al no disponer tampoco de una cartografía de la distribución de los diferentes sistemas de preparación del terreno utilizados en las plantaciones, no se pudo considerar esta variable en el diseño experimental. Así, se estudiaron 18 parcelas de

200 m², sin influencia aparente de ninguna otra actividad antrópica o incendio, cuatro sobre sedimentos en glacia a altitudes entre 650 m y 930 m, ocho parcelas sobre calizas y conglomerados en altitudes entre 650 y 1270 m, y seis parcelas sobre areniscas y lutitas silíceas entre 1050 y 1270 m. Del total de parcelas, 3 habían sido preparadas por ahoyado, 8 mediante fajas, y 7 con terrazas.

En cada parcela se midió el diámetro normal de los pies de *P. nigra* en los que éste era igual o superior a 5 cm mediante forcípula de brazo móvil, y la altura total de los dos pies dominantes de cada parcela, se determinó la edad de éstos en un testigo obtenido en la base del tronco, y se determinó el índice de estación a los 30 años (IE30) en base a las curvas de crecimiento de [Gómez Loranca \(1996\)](#). Así mismo se realizó un inventario visual de las especies de plantas presentes.

En cada parcela se caracterizó el territorio y se describió una calicata, excavada hasta material geológico o una profundidad de 125 cm, en base a los criterios SINEDARES ([CBD SA 1983](#)), clasificando el suelo a nivel de familia de Soil Taxonomy ([S.S.S. 1999](#)), y muestreando los diferentes horizontes (n=43).

Análisis de laboratorio

Las muestras de los horizontes se llevaron a laboratorio y, tras secarlas a 50°C y tamizarlas a 2 mm, se analizó la textura (método de la pipeta), pH (1:2.5 en agua), carbono orgánico (método de Walkley-Black, considerando un factor de recuperación de 1.58), carbonato cálcico equivalente (mediante el calcímetro de Bernard), caliza activa (extracción con oxalato amónico), fósforo asimilable (método Olsen-Watanabe), cationes de cambio (extracción con acetato amónico 1N a pH=7), y capacidad de intercambio catiónico (saturación de la muestra con acetato sódico 1N a pH=8.2 y desplazamiento del sodio adsorbido con acetato amónico 1N a pH=7), siguiendo en todos los casos las propuestas de [Page et al. \(1982\)](#). Los horizontes orgánicos, dada su escasa entidad, con un grosor siempre menor de 2 cm, no se analizaron.

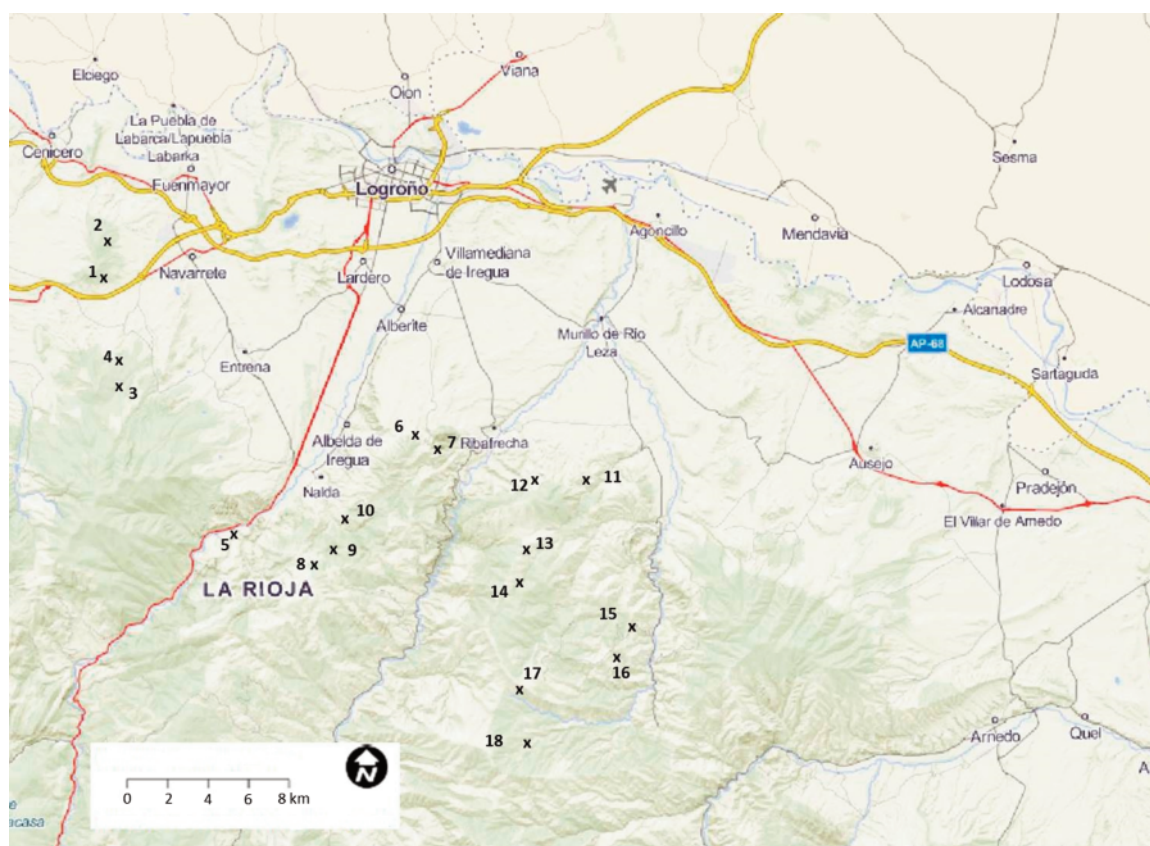


Figura 1. Localización de las parcelas muestrales en la zona de estudio.

Figure 1. Location of sampling plots within the study area.

Tratamiento de los datos

Para la caracterización climática de las parcelas desarrolladas sobre glaciares sus valores de temperatura y precipitación se interpolaron entre los de los observatorios de Cenicero (altitud 430 m.s.m.) y Sotés (650 m.s.m.). Para las demás parcelas se obtuvieron modelos de regresión lineal entre la altitud y la precipitación de los observatorios de Santa Cruz de Yanguas (1223 m.s.m.), Ortigosa (980 m.s.m.), Soto (717 m.s.m.), y El Redal (528 m.s.m.), y entre la altitud y la temperatura de los de los observatorios de Varea (364 m.s.m.), El Redal, y Munilla (820 m.s.m.). Se estimó la radiación incidente y la evapotranspiración potencial (método de Turc) para cada parcela en base al modelo ECOSIM (Gracia 1991). Se desarrolló un balance hídrico simple para cada parcela considerando que la extracción de agua del suelo en los meses secos sigue un modelo lineal, y que, la reserva máxima, es la capacidad de retención de agua disponible (CRAD) del suelo estimada en función de la profundidad enraizable, la proporción de elementos gruesos y los valores de agua disponible, propuestos por Hall et al. (1977) para cada horizonte dentro de la profundidad enraizable. Se determinó así para cada parcela la evapotranspiración real anual, y el déficit anual acumulado. Igualmente, se obtuvieron los parámetros de los diagramas bioclimáticos (Montero de Burgos y González 1983).

El análisis estadístico de los datos se realizó con el programa R (R Development Core Team 2009). Se analizaron las correlaciones lineales entre las variables edáficas mediante el test de Pearson. Se utilizó el test de Kruskal-Wallis para estudiar la variación entre los órdenes de suelos de Soil Taxonomy de la altitud y pendiente de la estación, y de la profundidad, CRAD, y los valores promedio dentro de los 30 cm superficiales del suelo mineral (que a partir de ahora denominaremos "horizonte mineral superficial del suelo") de las variables obtenidas en laboratorio. Estos valores se obtuvieron como promedio ponderado de los valores obtenidos en cada horizonte mineral presente dentro de los 30 cm superficiales del suelo por el grosor del horizonte presente dentro de estos 30 cm. En el caso de que el test mostrara diferencias significativas, se compararon todas las parejas de materiales mediante el test de Dunn implementado en el paquete FSA (Ogle 2016).

Para el análisis estadístico de las variables del medio influyentes en el crecimiento de pino laricio se utilizaron como variables independientes la altitud, sistema de preparación del terreno, la profundidad y CRAD del suelo, los valores promedio en los 30 cm superficiales del suelo mineral de las variables edáficas determinadas en laboratorio, las variables climáticas, y la orientación de la ladera linealizada mediante la función:

$$\text{Orientación lineal} = 180 - |\text{orientación} - 180|$$

Se utilizaron modelos de regresión lineal múltiple mixtos paso a paso con el paquete 'nlme' (Pinheiro et al. 2015), introduciendo la parcela como efecto aleatorio, para obtener las variables del medio más influyentes sobre el índice de estación (IE30). Por otro lado, las parcelas se agruparon en cuatro clases de crecimiento (CIE30) mediante un análisis de agrupamiento de los índices de estación realizado con el método de Ward implementado en el paquete R Commander, y se analizó la variación de las variables del medio entre estas clases de crecimiento mediante el test de Kruskal-Wallis comparando, en caso de aparecer efectos significativos, todas las parejas de clases mediante el test de Dunn del paquete FSA ajustado para comparaciones múltiples por el método de Benjamini-Hochberg.

Para el análisis de la distribución de la vegetación acompañante que aparecía en tres o más parcelas se utilizó el análisis de correspondencias canónicas (CCA) paso a paso del paquete 'vegan' (Oksanen et al. 2013). Se comprobó mediante los tests de permutación implementados en este paquete la significación de cada uno de los ejes y de cada una de las variables ambientales. Mediante el test de Kruskal-Wallis también se estudió la variación de las características del medio entre las parcelas con presencia de *Quercus pyrenaica*, principal especie forestal acompañante, y aquellas en que

esta especie estaba ausente. Y se utilizaron modelos de regresión logística para definir cuáles de esas características son significativas para explicar la presencia de esta especie.

Se rechazaron los modelos que no cumplían los supuestos estadísticos básicos, aquellos con P-valores superiores a 0.05, y aquellos en que el P-valor de alguna de las variables independientes superaba este valor.

Resultados

Caracterización climática de las parcelas

Los resultados del modelo climático a escala de parcela mostraron que el período del año con temperaturas medias de las mínimas inferiores a 0°C dura 0-3 meses, mientras que el período con temperaturas medias inferiores a 7.5°C dura 3-6 meses. El déficit medio anual acumulado varía entre 0 mm y 140 mm, y supone 0-3 meses de sequía. Así, para todos los suelos estudiados se estimó un régimen de temperatura méxico y un régimen de humedad ústico (S.S.S. 1999).

Suelos

Taxonómicamente los suelos estudiados se clasificaron en 4 órdenes de Soil Taxonomy (Tabla 1), predominando los suelos con procesos de iluviación de arcilla (Alfisolos y Argiustolls) sobre los sedimentos de piedemonte, los Inceptisoles y Mollisoles sobre calizas, y Entisoles y Alfisolos sobre arenitas y lutitas silíceas. Un 17% de los suelos estudiados se clasificaron en subgrupos *últicos*, especialmente sobre los sedimentos de piedemonte, y los suelos de subgrupos *líticos* o de familias *superficiales* (S.S.S. 1999) representaron el 27% de las parcelas, principalmente sobre arenitas y lutitas silíceas.

Tabla 1. Caracterización fisiográfica, calidad de estación, y material original y clasificación de los suelos de las parcelas estudiadas.

Table 1. Physiographic characterization, station quality, and original material and classification of the soils of the plots studied.

Parcela	1	2	3	4	5	Clasificación suelo
1	660	8.9	b	S	a	Haplustalf cálcico
2	650	8.9	b	U	a	Haplustalf típico
3	930	8.8	b	S	a	Haplustalf típico
4	880	9.0	b	U	a	Haplustalf últico
5	650	11.5	a	U	b	Calcistep típico
6	930	8.7	b	U	b	Argiustoll típico
7	930	6.4	d	S	b	Haplustoll típico
8	1090	9.2	b	S	b	Haplustept údico
9	1270	8.6	b	S	b	Haplustept údico
10	1220	9.5	b	U	b	Haplustoll páchico
11	820	7.4	c	S	b	Calcistep típico
12	1100	10.3	a	U	b	Haplustoll páchico
13	1120	9.4	b	U	c	Haplustept lítico
14	1190	9.9	a	S	c	Haplustalf últico
15	1050	6.2	d	U	c	Ustorthent lítico
16	1090	5.5	d	S	c	Ustorthent lítico
17	1250	7.8	c	S	c	Haplustalf últico
18	1270	7.6	c	U	c	Haplustept údico

1: altitud (m); 2: Índice de estación a los 30 años (m); 3: clase de índice de estación; 4: orientación (S: solana; U: umbría); 5: material original del suelo (a: sedimentos de piedemonte; b: calizas y conglomerados calizos; c: arenitas y lutitas silíceas).

Alfisolos y Mollisolos aparecen en pendientes inferiores al 40% y Entisolos e Inceptisolos en pendientes superiores al 20% ($P=0.05$) (Tabla 2). Los Entisolos se caracterizan también por las bajas concentraciones de calcio y altas de magnesio intercambiables en el horizonte mineral superficial, mientras que estos cationes presentan el patrón opuesto en los Mollisolos.

Las concentraciones de carbono orgánico en el horizonte mineral superficial son superiores al 3% en el 17% de todos los suelos estudiados. Las cantidades de carbono orgánico acumuladas en los horizontes minerales de estos suelos se estiman entre 3.0 kg.m⁻² y 14.7 kg.m⁻². Suelos con una profundidad hasta 60 cm acumulan un máximo de 10.0 kg.m⁻², y en suelos con profundidades superiores se acumula un mínimo de 7.1 kg.m⁻² de carbono orgánico.

Para el conjunto de horizontes estudiados, la concentración de carbono orgánico está positivamente correlacionada con la de fósforo asimilable ($r=0.65$; $p<0.0001$; $n=43$). Por otra parte, la concentración de caliza activa está correlacionada positivamente con la de carbonato cálcico equivalente, de manera que aquella aumenta proporcionalmente a ésta para horizontes con niveles de carbonatos inferiores al 35% ($r=0.99$; $P<0.001$; $n=12$), representando la caliza activa, aproximadamente, un 43% de los carbonatos totales. Para concentraciones en carbonatos superiores al 35%, la caliza activa depende inversamente de la concentración de carbono orgánico (C) según la función:

$$\text{caliza activa (\%)} = 13.8 - (1.0 \cdot C) \quad (R^2=0.75; p=0.001; n=9)$$

Crecimiento de *P. nigra*

El índice de estación de pino laricio a los 30 años (IE30) varió entre 5.5 m y 11.5 m (Tabla 1). La única variable que individualmente mostró un efecto estadísticamente significativo ($P<0.05$) sobre el índice de estación en el análisis de regresión lineal fue la profundidad enraizable (Tabla 3). El modelo más significativo se construyó con la combinación de la proporción de arena y el pH del horizonte mineral superficial, ambas con efecto positivo sobre el índice de estación. El modelo con tres variables independientes incluyó la CRAD del suelo y la proporción de elementos gruesos en el horizonte superficial con efecto positivo, así como el magnesio intercambiable en este horizonte con efecto negativo.

Las cuatro clases de IE30 (CIE30) producidas por el análisis de agrupamiento fueron: CIE30a, que incluyó parcelas con IE30 de 9.9-11.5 m (17% de las parcelas) (posibilidad media de la masa principal de 5.4-7.5 m³.ha⁻¹.año⁻¹); CIE30b, con parcelas de IE30 de 8.6-9.5 m (50% de las parcelas) (posibilidad de 3.8-5.4 m³.ha⁻¹.año⁻¹); CIE30c, con parcelas de IE30 de 7.4-7.8 m (17% de las parcelas) (posibilidad de 2.4-3.8 m³.ha⁻¹.año⁻¹); y CIE30d, con parcelas de IE30 de 5.5-6.4 m (17% de las parcelas) (posibilidad menor de 2.4 m³.ha⁻¹.año⁻¹). El test de Kruskal-Wallis muestra que la profundidad enraizable varía significativamente entre las CIE30 ($P=0.04$) (Fig. 2) pero las comparaciones entre parejas de clases no muestran diferencias significativas, aunque las diferencias entre CIE30d (profundidad media de 30 cm) y las demás clases (con valores medios de 72-92 cm) se aproximan a la significación estadística ($P=0.6-0.7$). La intensidad bioclimática real (ibr) también varía significativamente entre las clases de IE30 ($P=0.02$) (Fig. 2), siendo la diferencia significativa ($P=0.03$) entre la clase CIE30d (valor medio de 3.0 ubc) y la clase CIE30b (valor medio de 6.6 ubc) y aproximándose a la significación (0.07) entre la clase CIE30d y la clase CIE30c (valor medio de 6.6 ubc).

Vegetación acompañante

Se registraron un total de 61 especies vegetales en las plantaciones estudiadas. Las más frecuentes fueron *Rosa sp.* (presente en el 78% de las parcelas), *Crataegus monogyna* (56%), *Thymus vulgaris*, *Rubia peregrina*, y *Juniperus communis* (39%), y *Quercus pyrenaica*, *Cistus laurifolius*, y *Genista scorpius* (33%). *Quercus faginea* apareció en el 28% de las parcelas y *Q. ilex* únicamente en el 17%. *Fagus sylvatica* sólo apareció en una de las parcelas.

Tabla 2. Rangos de variación de algunas características de los suelos en función de su clasificación a nivel de orden de Soil Taxonomy.

Table 2. Ranges of variation of some characteristics of soils in function of its order-level classification of Soil Taxonomy.

	Pr>F	Entisolos (n=2)	Mollisolos (n=4)	Inceptisolos (n=6)	Alfisolos (n=6)
Pend	0.04	25-48 b	10-32 a	21-50 ab	15-38 a
Prof	0.02	20-40 b	80-120 a	30-110 a	45-98 a
CRAD	0.003	33-38 b	71-83 bc	35-119 ac	81-146 a
Ca	0.09	7.0-8.9	18.2-27.6	7.9-22.2	3.9-24.9
Mg	0.08	1.3-4.0	0.4-0.7	0.4-1.1	0.7-1.6
pH	0.09	6.6-6.8	7.0-8.3	6.6-8.6	5.9-7.8

Pr>F según test de Kruskal-Wallis. Pend: pendiente (%). Prof: profundidad enraizable (cm). CRAD: capacidad de retención de agua disponible (mm). Ca: concentración de calcio intercambiable en el horizonte mineral superficial (cmol(+).kg⁻¹). Mg: concentración de magnesio intercambiable en el horizonte mineral superficial (cmol(+).kg⁻¹).

Tabla 3. Modelos de regresión lineal múltiple obtenidos para explicar el índice de estación de *Pinus nigra* (n=18).

Table 3. Multiple linear regression models obtained to explain the index of *Pinus nigra* station (n = 18).

	Variables	Estimador	P-valor variable	AIC	R ²	P-valor modelo
Modelo 1	Término independiente	6.3	< 0.005	63	0.35	0.009
	Profundidad enraizable	0.032	0.009			
Modelo 2	Término independiente	- 8.4	0.03	54	0.64	< 0.005
	pH*	0.1	< 0.005			
	Arena*	1.75	< 0.005			
Modelo 3	Término independiente	6.55	< 0.005	60	0.56	0.008
	Elementos gruesos*	0.04	0.015			
	CRAD	0.02	0.047			
	Magnesio intercambiable*	0.81	0.033			

*: valores en los 30 cm superficiales minerales del suelo

El análisis de correspondencias canónicas (CCA) produjo un modelo en el que los cuatro primeros ejes mostraron ser significativos y explicaron el 52% de la inercia total incorporando cuatro variables ambientales significativas: sistema de preparación del terreno, intensidad bioclimática fría (ibf), así como la caliza activa y la arena en el horizonte mineral superficial (Tabla 4).

El primer eje, que explicó un 17%, se relacionó, por un lado, con la proporción de arena en el horizonte mineral superficial, asociada a *Quercus pyrenaica*, *Fragaria vesca*, y *Erica arborea*. Y por el otro lado se relacionó con la concentración de caliza activa del horizonte mineral superficial del suelo, asociada a *Lavandula*

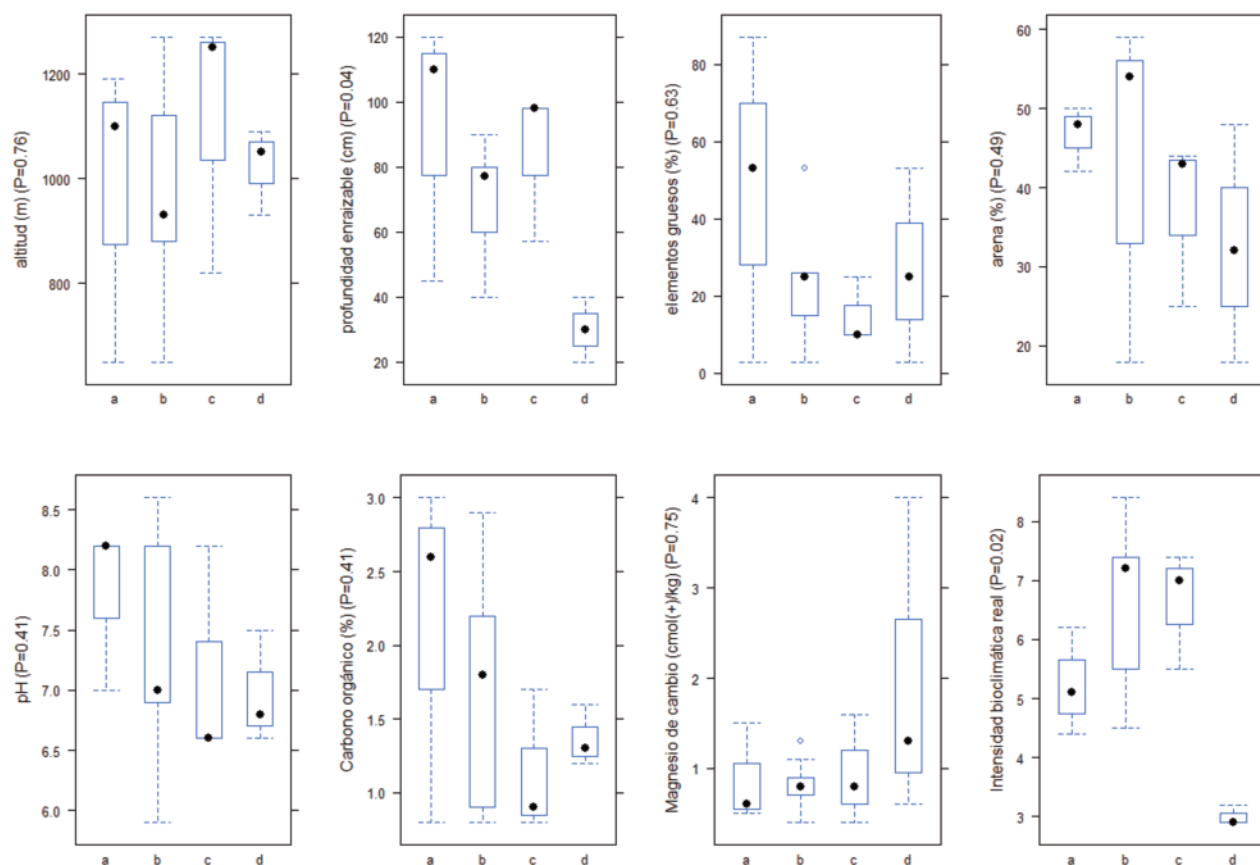


Figura 2. Diagramas de caja de las principales variables edafo-climáticas en función de las clases de índice de estación de *P. nigra* en las parcelas estudiadas. Entre paréntesis, P-valor en el test de Kruskal-Wallis. (a, b, c, d: clases de índice de estación (CIE30) (parcelas con índice de estación a los 30 años de 9.9-11.5 m, 8.6-9.5 m, 7.4-7.8 m, y 5.5-6.4 m, respectivamente). ibr: intensidad bioclimática real (ubc). Las parcelas pertenecientes a la clase CIE30d tienen valores de intensidad bioclimática real (ibr) significativamente menores que las de clase CIE30b ($P=0.03$).

Figura 2. Box and whisker plots of the main soil and climate variables according to the site quality classes of *P. nigra* in the study plots. (a, b, c, d: site quality classes (CIE30) (plots in which site index at the age of 30 years is 9.9-11.5 m, 8.6-9.5 m, 7.4-7.8 m, and 5.5-6.4 m, respectively). Ibr: 'intensidad bioclimática real' (ubc)). (Plots in class CIE30d have significantly smaller values of rootable depth than those in class CIE30c ($P=0.05$), and significantly smaller values of actual bioclimatic intensity (ibr) than those in class CIE30 b ($P=0.03$)).

Tabla 4. Resultados del análisis canónico de correspondencias.

Table 4. Results of the canonical correspondence analysis.

	Valor propio	Proporción explicada	Coeficientes de correlación ponderados					
			caliza activa	arena	ibf	prep. fajas	prep. hoyos	prep. terrazas
Eje 1	0.42	0.17	- 0.87	0.70	- 0.30	- 0.57	0.54	0.17
Eje 2	0.34	0.13	0.15	0.47	0.33	0.52	0.19	- 0.70
Eje 3	0.28	0.11	- 0.26	0.31	0.86	- 0.32	0.50	- 0.07
Eje 4	0.18	0.07	0.12	- 0.43	- 0.15	0.26	0.50	- 0.67

latifolia, *Dorycnium pentaphyllum*, y *Viburnum lantana* (Fig. 3). El segundo eje explicó un 13% (Fig. 4), y separó las labores de preparación con terrazas, asociadas a *Quercus ilex*, *Genista scorpius*, y *Thymus vulgaris*, de la preparación por fajas y la arena en el horizonte mineral superficial del suelo, asociadas con la presencia de *Helleborus foetidus*, *Hedera helix*, y *Genista hispanica* spp. *occidentalis*. El tercer eje, que explicó un 11%, quedó definido por la intensidad bioclimática fría (ibf), asociada a la presencia de *Erica cinerea* y *Cistus salvifolius* Y el cuarto eje, que explicó un 7%, separó la preparación por hoyos de la preparación por terrazas, asociándose al primer sistema *Juniperus communis* y *Erica vagans*, y *Quercus ilex* y *Genista hispanica* al segundo (Fig. 4).

Las parcelas con presencia de pies de *Quercus pyrenaica* se caracterizaron por tener una menor proporción de carbonatos, caliza activa, y limo, así como un pH inferior en el horizonte mineral superficial que las parcelas en la que esta especie está ausente (Fig. 5). Sin embargo, no apareció ningún modelo de regresión logística binomial significativo, aunque aquéllos en que se incorporaban el pH y la proporción de arena en el horizonte mineral superficial del suelo como variables explicativas individuales, éstas se acercaron a la significación estadística ($P=0.07$, $P=0.08$, respectivamente). Esta relación de *Q. pyrenaica* con la arena también apareció, como se ha comentado, en el análisis de correspondencias canónicas (Fig. 3).

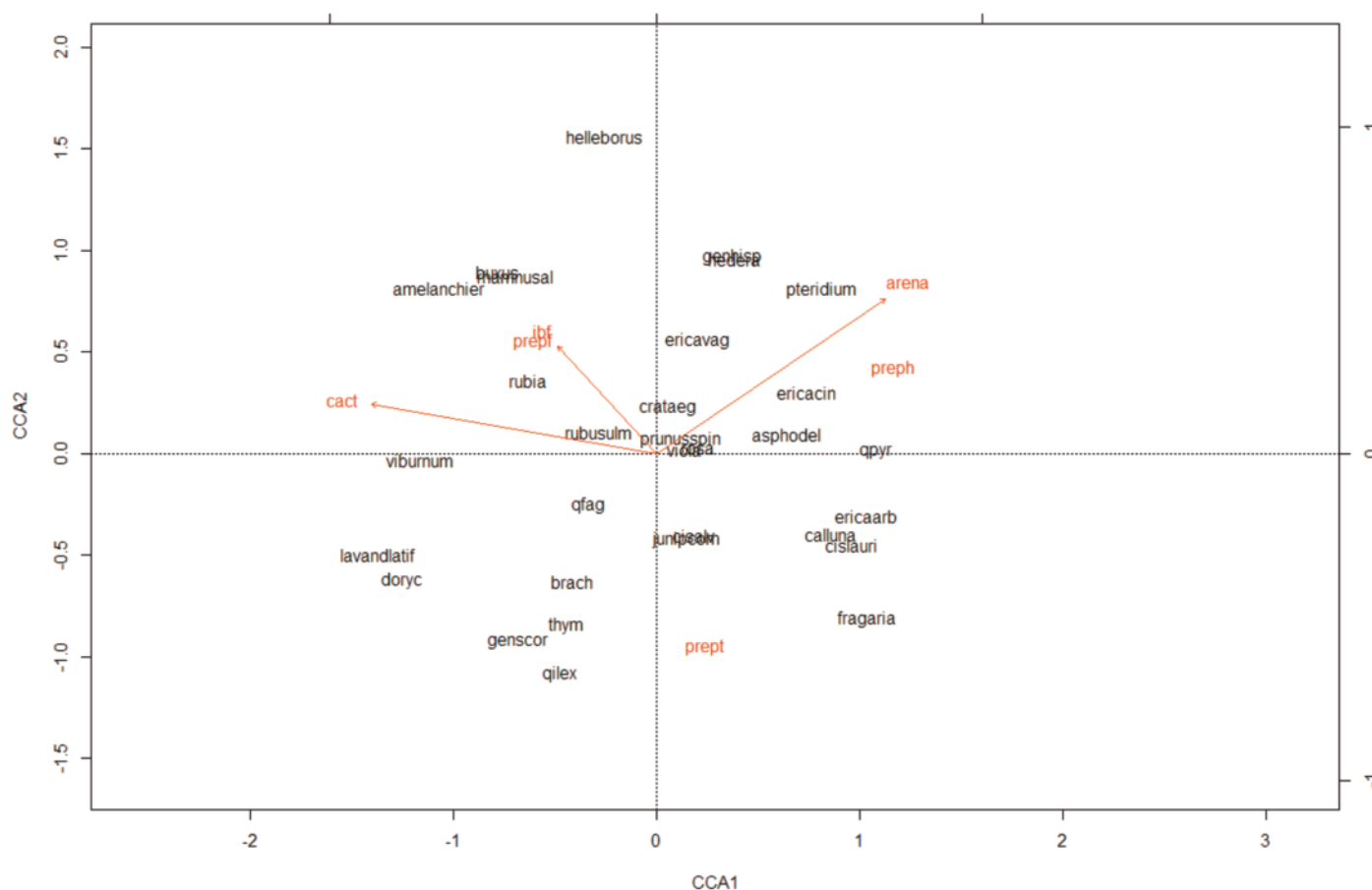


Figura 3. Distribución de las especies vegetales y de las variables del medio significativas en los dos primeros ejes (CCA1 y CCA2) del análisis de correspondencias canónicas. ('arena', 'cact': arena y caliza activa en el horizonte mineral superficial del suelo, respectivamente; 'preph', 'prept', 'prepf': preparación del terreno por hoyos, terrazas, y fajas, respectivamente) ('amelanchier': *Amelanchier ovalis*; 'buxus': *Buxus sempervirens*; 'calluna': *Calluna vulgaris*; 'cislauri': *Cistus laurifolius*; 'cislav': *Cistus salvifolius*; 'ericaarb': *Erica arborea*; 'ericacin': *Erica cinerea*; 'fragaria': *Fragaria vesca*; 'genhisp': *Genista hispanica*; 'genscor': *Genista scorpius*; 'hedera': *Hedera helix*; 'helleborus': *Helleborus phoetidis*; 'lavandlatif': *Lavandula latifolia*; 'prunusspin': *Prunus spinosa*; 'pteridium': *Pteridium aquilinum*; 'qfag': *Quercus faginea*; 'qilex': *Quercus ilex*; 'qpyr': *Quercus pyrenaica*; 'rhamnusal': *Rhamnus alaternus*; 'rubia': *Rubia peregrina*; 'thym': *Thymus vulgaris*).

Figure 3. Distribution of the plant species and significant environmental variables in the first two axes (CCA1 and CCA2) of the canonical correspondence analysis. ('arena', 'cact': sand and active lime in the surface soil mineral horizon, respectively; 'preph', 'prept', 'prepf': site preparation by holes, bench terraces and contour ploughing, respectively) ('amelanchier': *Amelanchier ovalis*; 'buxus': *Buxus sempervirens*; 'calluna': *Calluna vulgaris*; 'cislauri': *Cistus laurifolius*; 'cislav': *Cistus salvifolius*; 'ericaarb': *Erica arborea*; 'ericacin': *Erica cinerea*; 'fragaria': *Fragaria vesca*; 'genhisp': *Genista hispanica*; 'genscor': *Genista scorpius*; 'hedera': *Hedera helix*; 'helleborus': *Helleborus phoetidis*; 'lavandlatif': *Lavandula latifolia*; 'prunusspin': *Prunus spinosa*; 'pteridium': *Pteridium aquilinum*; 'qfag': *Quercus faginea*; 'qilex': *Quercus ilex*; 'qpyr': *Quercus pyrenaica*; 'rhamnusal': *Rhamnus alaternus*; 'rubia': *Rubia peregrina*; 'thym': *Thymus vulgaris*).

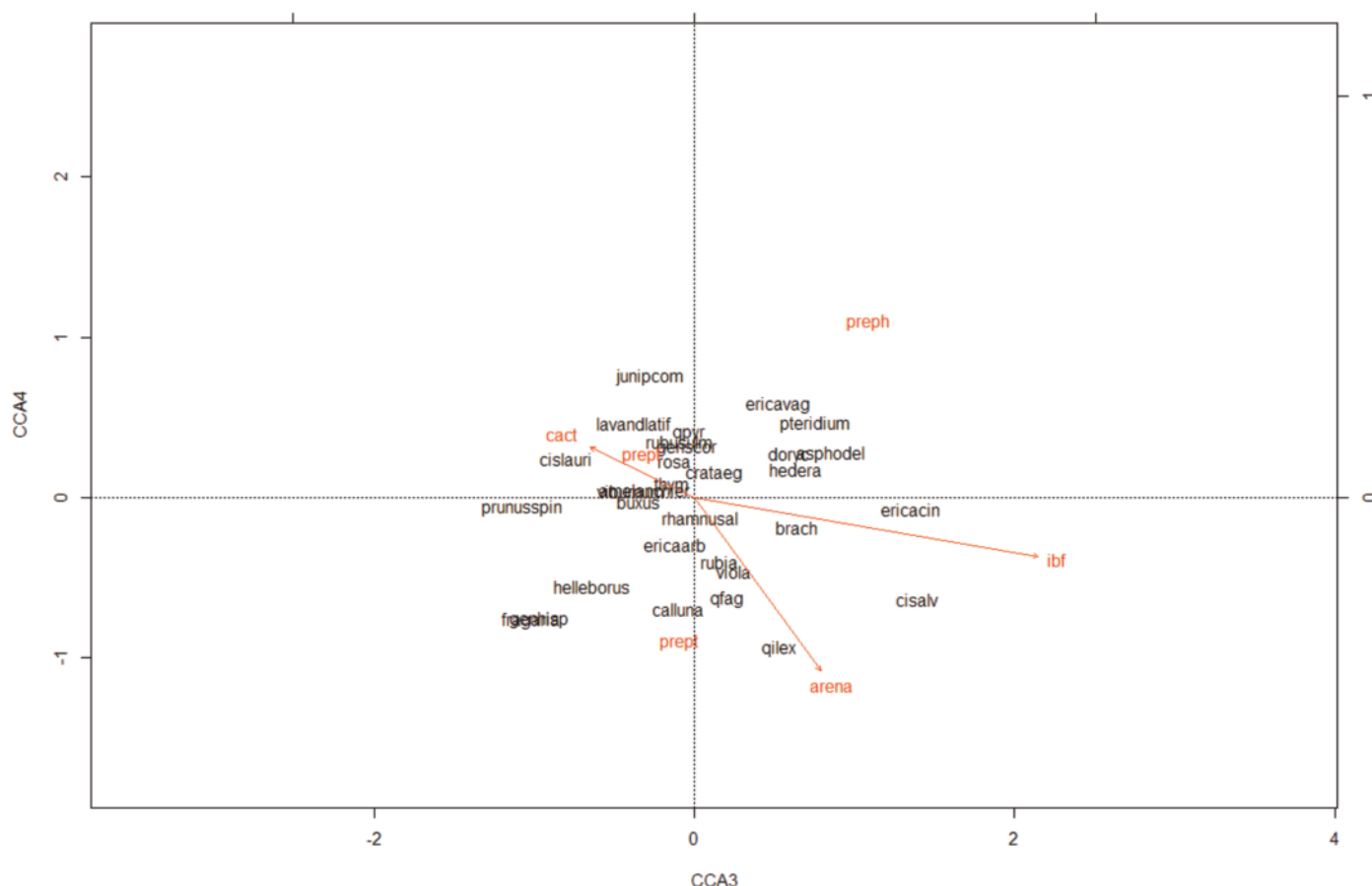


Figura 4. Distribución de las especies vegetales y de las variables del medio significativas en los ejes 3 y 4 (CCA3 y CCA4) del análisis de correspondencias canónicas. ('arena', 'cact': arena y caliza activa en el horizonte mineral superficial del suelo, respectivamente; 'prept', 'prepf', 'preph': preparación del terreno por terrazas, fajas, y hoyos, respectivamente) ('amelanchier': *Amelanchier ovalis*; 'buxus': *Buxus sempervirens*; 'calluna': *Calluna vulgaris*; 'cislauri': *Cistus laurifolius*; 'cislav': *Cistus salvifolius*; 'crataeg': *Crataegus monogyna*; 'ericacarb': *Erica arborea*; 'ericacin': *Erica cinerea*; 'fragaria': 'ericavag': *Erica vagans*; *Fragaria vesca*; 'genhisp': *Genista hispanica*; 'genscor': *Genista scorpius*; 'hedera': *Hedera helix*; 'helleborus': *Helleborus phoetidis*; 'junipcom': *Juniperus communis*; 'lavandalatif': *Lavandula latifolia*; 'prunusspin': *Prunus spinosa*; 'pteridium': *Pteridium aquilinum*; 'qfag': *Quercus faginea*; 'qilex': *Quercus ilex*; 'qpyr': *Quercus pyrenaica*; 'rhamnusal': *Rhamnus alaternus*; 'rosasp': *Rosa sp.*; 'rubia': *Rubia peregrina*; 'rubusulm': *Rubus ulmifolius*; 'thym': *Thymus vulgaris*).

Figure 4. Distribution of the plant species and significant environmental variables in the third and fourth axes (CCA3 and CCA4) of the canonical correspondence analysis. ('arena', 'cact': sand and active lime in the surface soil mineral horizon, respectively; 'prept', 'prepf', 'preph': site preparation by bench terraces, contour ploughing and individual holes, respectively) ('amelanchier': *Amelanchier ovalis*; 'buxus': *Buxus sempervirens*; 'calluna': *Calluna vulgaris*; 'cislauri': *Cistus laurifolius*; 'cislav': *Cistus salvifolius*; 'crataeg': *Crataegus monogyna*; 'ericacarb': *Erica arborea*; 'ericacin': *Erica cinerea*; 'fragaria': 'ericavag': *Erica vagans*; *Fragaria vesca*; 'genhisp': *Genista hispanica*; 'genscor': *Genista scorpius*; 'hedera': *Hedera helix*; 'helleborus': *Helleborus phoetidis*; 'junipcom': *Juniperus communis*; 'lavandalatif': *Lavandula latifolia*; 'prunusspin': *Prunus spinosa*; 'pteridium': *Pteridium aquilinum*; 'qfag': *Quercus faginea*; 'qilex': *Quercus ilex*; 'qpyr': *Quercus pyrenaica*; 'rhamnusal': *Rhamnus alaternus*; 'rosasp': *Rosa sp.*; 'rubia': *Rubia peregrina*; 'rubusulm': *Rubus ulmifolius*; 'thym': *Thymus vulgaris*).

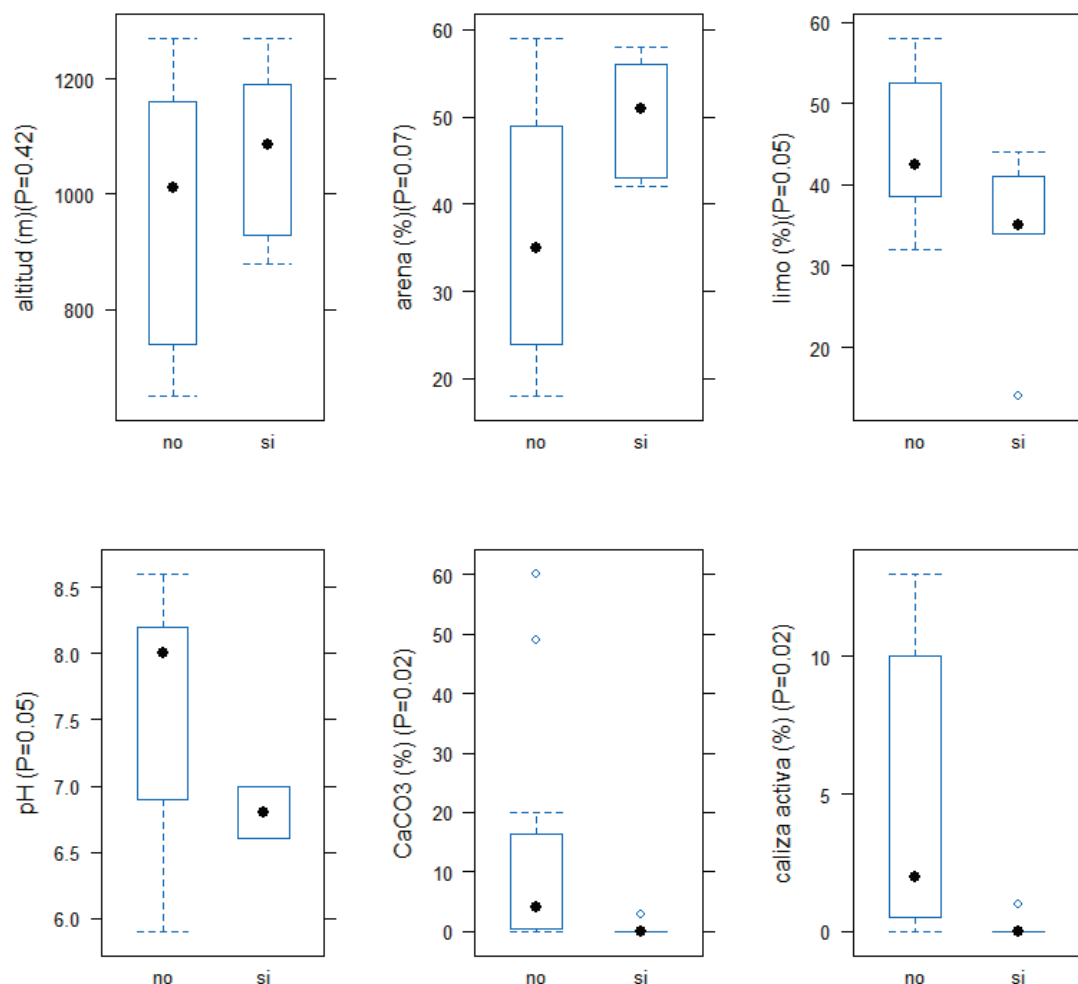


Figura 5. Diagramas de caja de las principales variables del medio en las parcelas con presencia de *Quercus pyrenaica* ('si') y aquéllas en las que esta especie está ausente ('no'). Entre paréntesis, P-valor en el test de Kruskal-Wallis.

Figure 5. Box and whisker plots of the main environmental variables in the plots with presence of *Quercus pyrenaica* ('si') and in those in which this species is absent ('no'). In parentheses, P-value in the Kruskal-Wallis test.

Discusión

Los suelos estudiados en plantaciones de *Pinus nigra* en la zona central de La Rioja presentan claras diferencias respecto a los de masas autóctonas de esta especie estudiadas por Sánchez et al. (1990). Si en éstas últimas predominan las Rendzinas, en aquella son dominantes Alfisoles e Inceptisoles. Además, la escasa presencia de subgrupos *líticos* o de familias *superficiales* (S.S.S. 1999) en los suelos de estas plantaciones contrasta con el carácter lítico del 62% de los suelos muestreados por Sánchez et al. (1990) en masas autóctonas de España. Igualmente, los suelos de las plantaciones de La Rioja muestran una menor concentración de carbono orgánico en el horizonte mineral superficial (Fig. 2), ya que el 89% tienen menos del 3%, mientras que en los suelos de esas masas autóctonas sólo el 37% tienen esta característica (Sánchez et al. 1990).

En comparación con los suelos de los hayedos de La Rioja, los suelos de las plantaciones de pino laricio muestran muchos taxones similares, Cambisoles, Luvisoles, y Phaeozems. Sin embargo, tienen una concentración inferior de carbono orgánico, y el pH del horizonte mineral superficial no llega a niveles tan bajos como en los hayedos, en los que puede alcanzar valores de 4.8 (Blanco et al. 2003).

Los resultados obtenidos muestran que los horizontes minerales de los suelos constituyen el reservorio más importante de carbono orgánico de estos ecosistemas, ya que las cantidades acumuladas en estos horizontes suponen un 60% del carbono total acumulado en las plantaciones, considerando que el valor medio

del carbono acumulado en la biomasa aérea es de 6.4 kg.m⁻² (IFN 2013). Estas cantidades son similares a las obtenidas para diferentes sistemas forestales peninsulares (Muñoz-Rojas et al. 2012; Doblas-Miranda et al. 2013).

La capacidad del suelo para suministrar agua a los árboles, reflejada en la profundidad enraizable (Modelo 1, Tabla 3) o en la CRAD (Modelo 3, Tabla 3), es el factor principal que explica las diferencias en el índice de estación de estas plantaciones. Aunque *P. nigra* es una especie más resistente a la sequía que otros pinos, como *P. sylvestris* (Sánchez-Salguero et al. 2012), la importancia de la disponibilidad de agua para el crecimiento de *P. nigra* en España ha sido puesta de manifiesto por Martín-Benito et al. (2008), pero también en ambientes húmedos, como el oeste de Francia, con la variedad Corsicana de esta especie (Lebourgeois et al. 1997). Trájer et al. (2016) obtuvieron también una correlación significativa entre la profundidad del suelo y la altura de *P. nigra* en Hungría. El mejor crecimiento en suelos con alta proporción de elementos gruesos en el horizonte superficial (Modelo 3, Tabla 3) contrasta con los resultados obtenidos por Gandullo y Sánchez (1994), que sugieren que esta especie prefiere suelos poco pedregosos. Este efecto positivo de los elementos gruesos también se ha demostrado para la presencia y crecimiento de otras especies, como *Q. ilex* (Rodríguez-Ochoa et al. 2014; Olarieta et al. 2017) y *P. radiata* (Olarieta et al. 2006), y, junto con el producido por la arena (Modelo 2, Tabla 3), apuntaría a dos cuestiones. Por un lado, el crecimiento del pino laricio podría aumentar con la porosidad de aireación del horizonte superficial del suelo, que tiende a aumentar, a su vez, cuanto ma-

yores son las fracciones granulométricas gruesas (elementos gruesos y arena) (Baetens et al. 2009). Por otro lado, la mayor presencia de las fracciones gruesas aumentaría el potencial del agua en el suelo tras las lluvias de verano (van Wessemael et al. 1996) y, por tanto, la facilidad en el uso de este agua por *P. nigra*, que muestra una respuesta significativa en el crecimiento a las precipitaciones del mes de junio (Sánchez-Salguero et al. 2012). Otros estudios han mostrado que la regeneración de *P. nigra* también aumenta al aumentar la disponibilidad de agua y el contenido de arena en el suelo (Martínez-Fernández et al. 1997; Tiscar 2003; Fryllas et al. 2008).

Por otro lado, el efecto negativo del magnesio (Modelo 3, **Tabla 3**) sobre el crecimiento podría estar relacionado con su efecto antagonista sobre la absorción de potasio por la planta, catión este último que está ligado positivamente al control estomático y al crecimiento de *P. nigra* (Zöttl y Velasco 1966).

En cambio, el sistema de preparación del terreno no mostró ningún efecto significativo sobre el crecimiento, aunque el número de parcelas estudiadas es demasiado pequeño para poder extraer conclusiones definitivas. Este resultado contrasta con el obtenido por Ortigosa (1991), que muestra un efecto significativo del sistema de preparación, aunque variable en función de otras características del medio. La cuestión, por tanto, requeriría estudios más detallados para acabar de dilucidar esos posibles efectos.

La presencia de las especies de plantas acompañantes en estas plantaciones está relacionada tanto con variables edáficas, caliza activa, arena, y orden taxonómico, como con variables climáticas, intensidad bioclimática fría, y con el sistema de preparación del terreno utilizado para la plantación. Este último factor podría estar relacionado con la capacidad de las diferentes especies para adaptarse tanto a la propia perturbación producida por las labores como a la posterior dinámica geomorfológica inducida por éstas (Ortigosa 1991), si bien en las parcelas estudiadas únicamente se observaron procesos erosivos activos en dos parcelas preparadas mediante fajas.

La presencia de *Quercus pyrenaica* en estas masas está relacionada con fracciones de arena superiores al 40%, y la ausencia de carbonatos y el pH neutro del horizonte mineral superficial del suelo (**Fig. 5**), aunque el rango obtenido de esta última variable (6.6-7.0) es superior al de bosques de esta especie en el Noroeste de la península ibérica (García y Jiménez 2009).

Conclusiones

Los suelos estudiados, Alfisoles, Entisoles, Inceptisoles, y Molisoles, presentan una distribución muy relacionada con la geomorfología y el material original, y pueden distinguirse, además, por diversas características importantes para el uso forestal, como la profundidad enraizable y la CRAD. El crecimiento de pino laricio, cuyo índice de estación a los 30 años varía entre 5.5 m y 11.5 m, depende básicamente de la disponibilidad de agua y oxígeno para las raíces, y disminuye en suelos con niveles altos de magnesio de cambio en el horizonte mineral superficial del suelo. Las características edáficas también son fundamentales para explicar la presencia de la vegetación espontánea.

Agradecimientos

Agradecemos a los revisores sus comentarios y sugerencias a una versión anterior de este trabajo.

Referencias

Baetens, J.M., Verbist, K., Cornelis, W.M., Gabriels, D., Soto, G. 2009. On the influence of coarse fragments on soil water retention. *Water Resources Research* 45: W07408.

Blanco, A., Graña, D., Elena, R., Sánchez, O., Rubio, A., Gómez, V. 2003. Autoecología de los hayedos de La Rioja. *Investigación Agraria. Sistemas y Recursos Forestales* 12(1): 21-38.

CBDSA (Comisión del Banco de Datos de Suelos y Aguas) 1983. *SINEDARES. Manual para la Descripción Codificada de Suelos en el Campo*. Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación, Madrid, España.

Diekmann, M., Michaelis, J., Pannek, A. 2015. Know your limits – the need for better data on species responses to soil variables. *Basic and Applied Ecology* 16: 563-572.

Doblas-Miranda, E., Rovira, P., Brotons, L., Martínez-Vilalta, J., Retana, J., Pla, M., Vayreda, J. 2013. Soil carbon stocks and their variability across the forests, shrublands and grasslands of peninsular Spain. *Biogeosciences* 10: 8353-8361.

Elena, R., Sánchez, O. 1991. *Los Pinares Españoles de Pinus nigra Arn.: Síntesis Ecológica*. Monografías INIA 81. Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación, Madrid, España.

Fryllas, N.M., Dimitrakopoulos, P.G., Troumbis, A.Y. 2008. Regeneration dynamics of a mixed Mediterranean pine forest in the absence of fire. *Forest Ecology and Management* 256: 1552-1559.

Gandullo, J.M., Sánchez, O. 1994. *Estaciones Ecológicas de los Pinares Españoles*. ICONA, Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación, Madrid, España.

García, I., Jiménez, P. 2009. Robledales de *Quercus pyrenaica* y robledales de *Quercus robur* y *Quercus pyrenaica* del Noroeste Ibérico. En: VV.AA., *Bases Ecológicas Preliminares para la Conservación de los Tipos de Hábitat de Interés Comunitario en España*. Ministerio de Medio Ambiente y Medio Rural y Marino, Madrid, España.

Gómez Loranca, J.A. 1996. *Pinus nigra Arn. en el Sistema Ibérico. Tablas de Crecimiento y Producción*. INIA, Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación, Madrid, España.

Gracia, C. 1991. *ECOSIM. Simulación y Análisis de Problemas en Ecología*. Versión 39.01/A. Dept. Ecología, Universidad de Barcelona, Barcelona, España.

Hall, D.G.M., Reeve, M.J., Thomasson, A.J., Wright, V.F. 1977. *Water Retention, Porosity, and Density of Field Soils*. Tech. Mono. No.9. Soil Survey of England and Wales, Harpenden, Reino Unido.

IFN (Inventario Forestal Nacional) 2013. *Cuarto Inventario Forestal Nacional. La Rioja*. Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente, Madrid, España.

Kimmins, H. 1992. *Balancing Act. Environmental Issues in Forestry*. UBC Press, Vancouver, Canadá.

Lebourgeois, F., Lévy, G., Becker, M., Lefevre, Y. 1997. Effects of mineral nutrition and water site conditions on radial growth of Corsican pine in western France. *Annales des Sciences Forestières* 54: 279-300.

Martín-Benito, D., Cherubini, P., Del Río, M., Cañellas, I. 2008. Growth response to climate and drought in *Pinus nigra* Arn. trees of different crown classes. *Trees—Structure and Function* 22: 363-373.

Martínez, J., Núñez, E. 1991. *El Clima de La Rioja. Análisis de Precipitaciones y Temperaturas*. Gobierno de La Rioja. Logroño, España.

Martínez-Fernández, F., Orozco, E., Selva, M. 1997. Estudio de la regeneración del *Pinus nigra* Arnold en las sierras de Cazorla, Segura y Las Villas (Jaén). En: Puertas, F., Rivas, M., (eds), *I Congreso Forestal Hispano-Luso*, vol. 2, pp. 413-418. Gobierno de Navarra, Pamplona, España.

Mod, H.K., Scherrer, D., Luoto, M., Guisan, A. 2016. What we use is not what we know: environmental predictors in plant distribution models. *Journal of Vegetation Science* 27: 1308-1322.

Montero de Burgos, J.L., González, J.L. 1983. *Diagramas Bioclimáticos*. ICONA, Madrid, España.

Muñoz-Rojas, M., Jordán, A., Martínez Zavala, L., de la Rosa, D., Abd-Elmabod, S.K., Anaya Romero, M. 2012. Organic carbon stocks in Mediterranean soil types under different land uses (Southern Spain). *Solid Earth* 3: 375-386.

Ogle, D.H. 2016. FSA: Fisheries Stock Analysis. R package version 0.8.6. [Disponible en: <https://cran.r-project.org/web/packages/FSA/FSA.pdf>].

Oksanen, J., Blanchet, F.G., Kindt, R., Legendre, P., Minchin, P.R., O'Hara, R. B., Simpson, G.L., Solymos, P., Stevens, M.H.H., Wagne, R. H. 2013. *Vegan: Community Ecology Package, Version 2.0-8*. [Disponible en: <http://CRAN.R-project.org/package=vegan>].

Olarieta, J.R., Besga, G., Rodríguez-Ochoa, R., Aizpurua, A., Usón, A. 2006. Land evaluation for forestry: a study of the land requirements for growing *Pinus radiata* D. Don in the Basque Country, northern Spain. *Soil Use and Management* 22: 238-244.

- Olarieta, J.R., Rodríguez-Ochoa, R., Ascaso, E., Antúnez, M. 2016. Rootable depth controls height growth of *Pinus halepensis* Mill. in gypsiferous and non-gypsiferous soils. *Geoderma* 268: 7-13.
- Olarieta, J.R., Bargañés Tobella, A., Rodríguez-Ochoa, R., Antúnez, M. 2017. Soil control over the distribution of Mediterranean oak forests in the Montsec mountains (northeastern Spain). *Geoderma* 291: 11-20.
- Ortigosa, L.M. 1991. *Las Repoblaciones Forestales en La Rioja: Resultados y Efectos Geomorfológicos*. Geoforma Ediciones, Logroño, España.
- Page, A.L., Miller, R.H., Keeney, D.R. 1982. *Methods of Soil Analysis. Part 2. Chemical and Microbiological Properties. Second Edition*. American Society of Agronomy, Soil Science Society of America, Madison, Estados Unidos.
- Pinheiro, J., Bates, D., DebRoy, S., Sarkar, D. and R Core Team 2015. *nlme: Linear and Nonlinear Mixed Effects Models. R package version 3.1-120*. <http://cran.r-project.org/package=nlme>.
- R Development Core Team 2009. *R: A Language and Environment for Statistical Computing*. R Foundation for Statistical Computing, Vienna. [Disponible en: <http://www.R-project.org>].
- Rodríguez-Ochoa, R., Olarieta, J.R., Chocarro, C., Martínez, V., Bilbao, I. 2014. Autoecología y distribución de la encina (*Quercus ilex* subsp. *ballota* (Desf.) Samp.) en la zona norte de Monegros. *Ecosistemas* 23(2): 108-115.
- Sajedi, T., Prescott, C.E., Seely, B., Lavkulich, L.M. 2012. Relationships among soil moisture, aeration and plant communities in natural and harvested coniferous forests in coastal British Columbia, Canada. *Journal of Ecology* 100: 605-618.
- Sánchez, O., Elena, R., Carretero, M.P. 1990. *Caracterización Edáfica de los Pinares Autóctonos Españoles de Pinus nigra Arn.* INIA, Madrid, España.
- Sánchez-Salguero, R., Navarro-Cerrillo, R.M., Camarero, J.J., Fernández-Cancio, A., Swetnam, T.W., Zavala, M.A. 2012. Vulnerabilidad frente a la sequía de repoblaciones de dos especies de pinos en su límite meridional en Europa. *Ecosistemas* 21(3): 31-40.
- S.S.S. (Soil Survey Staff) 1999. *Soil Taxonomy, Second Edition*. NRCS, United States Dept. of Agriculture, Washington.
- Thuiller, W. 2013. On the importance of edaphic variables to predict plant species distributions – limits and prospects. *Journal of Vegetation Science* 24: 591-592.
- Tiscar, P.A. 2003. Condicionantes y limitaciones de la regeneración natural en un pinar oromediterráneo de *Pinus nigra* subsp. *salzmannii*. *Investigación Agraria. Sistemas y Recursos Forestales* 12(2): 55-64.
- Trájer, A., Hammer, T., Bede-Fazekas, Á., Schoffhauzer, J., Padisák, J. 2016. The comparison of the potential effect of climate change on the segment growth of *Fraxinus ornus*, *Pinus nigra* and *Ailanthus altissima* on shallow, calcareous soils. *Applied Ecology and Environmental Research* 14(3): 161-182.
- Valentine, K.W.G. 1986. *Soil Resource Surveys for Forestry*. Clarendon Press, Oxford, Reino Unido.
- van Wessemael, B., Poesen, J., Kosmas, C.S., Danalatos, N.G., Nachtergaele, J. 1996. Evaporation from cultivated soils containing rock fragments. *Journal of Hydrology* 74: 143-154.
- Vennetier, M., Ripert, C., Rathgeber, C. 2018. Autoecology and growth of Aleppo pine (*Pinus halepensis* Mill.): a comprehensive study in France. *Forest Ecology and Management* 413: 32-47.
- Zöttl, H.W., Velasco, F. 1966. Estado nutritivo y crecimiento de diversas repoblaciones del género *Pinus* en España. *Anales de Edafología y Agrobiología* 25: 249-268.