



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



Influencia de las propiedades del suelo en las formas de fósforo y su efecto en la productividad forestal en suelos calcáreos mediterráneos

MARTÍN-SANZ, R.C.^{1,2}, PANDO, V.^{1,3}, BUEIS, T.¹ y TURRIÓN, M.B.^{1,4}

¹ Instituto Universitario de Investigación en Gestión Forestal Sostenible (UVa).

² Centro de Investigación Forestal (INIA, CSIC).

³ Departamento de Estadística e Investigación Operativa, E.T.S. Ingenierías Agrarias (Palencia), Universidad de Valladolid.

⁴ Departamento de Ciencias Agroforestales, E.T.S. Ingenierías Agrarias (Palencia), Universidad de Valladolid.

Resumen

Aunque el fósforo del suelo es esencial para el crecimiento de la vegetación, no siempre se encuentra en formas lámbriles lo que dificulta su absorción por las plantas, siendo limitante en los ecosistemas forestales. Estudiamos el estado y la disponibilidad de P en suelos calcáreos, determinando qué procesos afectan a sus diferentes fracciones y qué parámetros del suelo influyen en la productividad forestal en 32 parcelas de *Pinus halepensis*. La textura del suelo, el contenido de carbonatos, la capacidad de retención de agua y la materia orgánica afectaron sustancialmente a las diferentes fracciones de P en los suelos estudiados. Nuestros resultados indicaron que los procesos de mineralización biológica jugaron un papel clave en el ciclo del P del suelo en las parcelas estudiadas, y que el P total, el contenido de carbonatos, la textura del suelo y la disponibilidad de agua impulsaron la productividad forestal. Avanzar en el conocimiento sobre las dinámicas de suelos forestales y su relación con la productividad de las masas es fundamental, aportando información relevante a la gestión forestal sostenible con el fin de aumentar la productividad de las masas o mejorar el papel de los suelos y los bosques en la mitigación del cambio climático.

Palabras clave

Disponibilidad de fósforo, ecosistema mediterráneo, fraccionamiento de fósforo, parámetros edáficos, suelos calizos.

1. Introducción

El fósforo es esencial para la vida porque está involucrado en muchos procesos vitales en los organismos (ALT et al., 2011). El P disponible en el suelo suele ser bajo en los ecosistemas terrestres (VITOUSEK, 1984) y se considera uno de los nutrientes más limitantes para el crecimiento de las plantas y en consecuencia, para la productividad forestal (ACHAT et al., 2010). Aunque hay abundante P total en el suelo, no siempre se encuentra en formas disponibles debido a su baja solubilidad, fuertemente dependiente del pH del suelo, su lenta difusión y su alta fijación en los suelos, lo que dificulta su absorción por las plantas.

Durante la descomposición de los residuos vegetales, los microorganismos liberan P vía mineralización y capturan P vía inmovilización, controlando las transformaciones de este elemento entre formas orgánicas e inorgánicas y formando un subciclo biológico en el ciclo general del P del suelo (WALBRIDGE, 1991; JALALI & RANJBAR, 2009). Por otro lado, los procesos de precipitación-disolución y adsorción-desorción controlan la transferencia abiótica de P entre la fase sólida y la solución del suelo (WALBRIDGE, 1991; SHEN et al., 2011).

La materia orgánica es clave para la estructura del suelo y para la regulación de los ciclos de nutrientes (TATE, 1984), jugando un papel importante en la disponibilidad de P en los suelos

forestales. La materia orgánica es fuente directa de formas orgánicas de P que se transforman en formas disponibles para la vegetación a través de la mineralización y la liberación de biomasa microbiana (ACHAT et al., 2010). Las actividades microbianas del suelo producen diferentes enzimas que pueden afectar la transformación de formas orgánicas a inorgánicas.

Numerosos estudios han indicado que el cambio climático actual provoca un aumento de las formas de N y de las sequías estivales causando desequilibrios nutricionales y deficiencias de P en los ecosistemas, más pronunciados en las zonas mediterráneas (SARDANS & PEÑUELAS, 2013, entre otros). Por ello, y aunque los procesos generales implicados en la bioquímica y disponibilidad de P son conocidos, es necesario aclarar qué parámetros del suelo afectan más a cada proceso tanto en ecosistemas concretos, principalmente mediterráneos, como en diferentes tipos de suelo (HOU et al., 2014).

Pinus halepensis Mill. tiene una amplia distribución natural circunmediterránea y se ha utilizado ampliamente en repoblaciones debido a su alta tolerancia al estrés hídrico y su baja demanda de nutrientes. Algunos estudios indican que la productividad forestal de *P. halepensis* bajo diferentes condiciones ambientales está estrechamente relacionada con la disponibilidad de agua (DEL RÍO et al., 2014; AGUIRRE et al., 2019) y la cantidad de materia orgánica o elementos como nitrógeno, magnesio o potasio (BUEIS et al. 2017). Sin embargo, estos estudios no consideraron la disponibilidad y estado del fósforo del suelo como un factor que puede afectar a la productividad forestal. Por otro lado, la biodisponibilidad de P está regulada por la interacción entre diferentes fracciones de P (GOMES-COSTA et al., 2016; HOU et al., 2016) y progresiva de tal manera que el P disponible en un momento dado puede ser bajo, pero a largo plazo, todo el P del suelo podría volverse lábil (GUO & YOST, 1998). Por ello, en suelos pobres en P, las plantas pueden obtener el P que inicialmente está en formas recalcitrantes a través de diversas estrategias (HINSINGER, 2001; GUPPY et al., 2005). En consecuencia, determinar la dinámica y biodisponibilidad de P requiere la separación e identificación de las diferentes fracciones de P en el suelo (GOMES-COSTA et al., 2016; HOU et al., 2016).

2. Objetivos

Nuestros objetivos fueron (1) evaluar el estado y la disponibilidad de P en suelos calcáreos bajo plantaciones de *P. halepensis*, (2) evaluar qué propiedades del suelo afectan a las diferentes reservas de P del suelo y cuáles impulsan su disponibilidad, y (3) determinar qué parámetros edáficos influyen en la productividad forestal de las parcelas estudiadas y si la disponibilidad de P del suelo impulsa esta productividad.

3. Metodología

3.1. Área de estudio

Este estudio se ha realizado con suelos de 32 parcelas del Inventario Nacional Forestal español situadas en plantaciones de *P. halepensis* en Castilla y León. La litología se corresponde con calizas y margas, los suelos son Calcixerpts con pH básico (8,0 a 8,9) y textura franco-arcillosa cuyas principales características se pueden consultar en BUEIS et al. (2017).

3.2. Toma de muestras de suelo

Se tomaron muestras de los primeros 10 cm de suelo mineral en todas las parcelas siguiendo el método de JOKELA et al. (1988). En cada parcela, se muestrearon cuatro puntos a 5 m del centro de la parcela (en las direcciones N, S, E y W). Las cuatro muestras se juntaron para

obtener una muestra compuesta de suelo mineral por parcela. Las muestras se secaron al aire y se tamizaron (2 mm) antes de los análisis de laboratorio.

3.3. Fraccionamiento de fósforo

Utilizamos el fraccionamiento secuencial de P de HEDLEY et al. (1982) modificado por TIESSEN & MOIR (1993). Este método se utiliza para caracterizar formas de P que difieren en su disponibilidad para plantas y microorganismos y que participan en transformaciones a corto, medio y largo plazo en el suelo (ALT et al., 2011; GOMES-COSTA et al., 2016; NIEDERBERGER et al., 2019). El procedimiento diferencia entre formas inorgánicas y orgánicas del P en los extractos básicos (extracción con NaHCO_3 0,5 M y con NaOH 1M; CROSS & SCHLESINGER, 2001); Figura 1). Para la determinación de P en los extractos obtenidos se aplicó el método de MURPHY & RILEY (1962) modificado por WATANABE & OLSEN (1965).

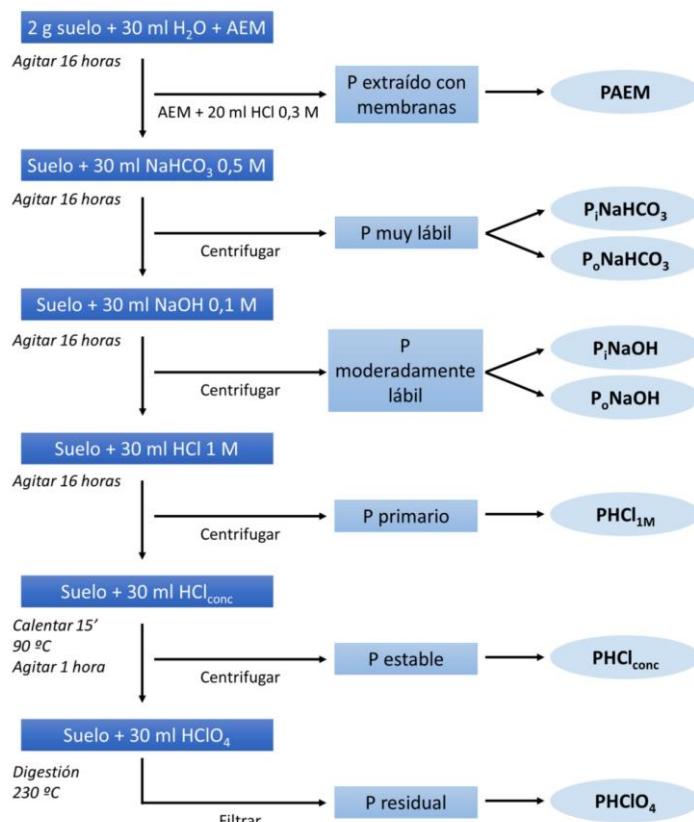


Figura 1. Esquema del procedimiento de extracción secuencial de fósforo utilizado (modificado de TIESSEN & MOIR, 1993). AEM: membrana de intercambio aniónico; P_i : P inorgánico; P_o : P orgánico.

3.4. Parámetros edáficos

Los suelos estudiados han sido caracterizados mediante gran cantidad de parámetros físicos, químicos y bioquímicos en estudios previos (BUEIS et al., 2016a; 2016b; 2017a; 2017b; 2019). Considerando que el alto número de parámetros del suelo disponibles (31) y el número de parcelas estudiadas ($n = 32$) dificulta el estudio estadístico, los parámetros del suelo se agruparon en cinco grupos relacionados con (1) fertilidad física del suelo, (2) fertilidad química, (3) materia orgánica, (4) composición del suelo y (5) actividad enzimática (Tabla 1).

Tabla 1. Parámetros del suelo considerados en el estudio separados en cinco grupos (BUEIS et al., 2016b; 2017b).

Grupo	Parámetro edáfico (abreviatura; unidades)	Media	D.E. ¹	Min	Max
Composición del suelo	Arcilla (Clay; %)	22,4	10,0	4,5	43,2
	Arena USDA (sSandUS; %)	24,4	14,7	1,3	61,1
	Carbonatos (Carb2; %)	54,3	19,5	1,4	79,1
	Caliza activa (ActiveC; %)	1,6	0,8	0,0	3,2
	Yeso (Gypsum; %)	25,3	10,6	8,9	50,6
Fertilidad física	Densidad aparente (BD; g/cm ³)	1,1	0,2	0,8	1,4
	Porosidad (Por; %)	46,1	6,0	37,1	58,7
	Capacidad de campo (FC; %)	23,4	4,8	15,0	31,9
	Punto de marchitez permanente (PWP; %)	15,1	5,4	4,0	26,6
Fertilidad química	pH	8,4	0,2	8,0	8,9
	Capacidad de intercambio catiónico (..CEC; cmol+/kg soil)	21,0	4,8	14,7	38,4
	Hierro disponible (..Fe; mg/kg soil)	7,8	4,6	3,2	26,7
	Cobre disponible (ICu; mg/kg soil)	0,5	0,2	0,2	1,6
	Manganoso disponible (Mn; mg/kg soil)	16,0	6,5	7,0	32,8
	ZZinc disponible (IZn; mg/kg soil)	0,6	0,3	0,2	1,5
	Potasio intercambiable (..K; cmol+/kg soil)	0,8	0,2	0,5	1,4
	Magnesio intercambiable (Mg; cmol+/kg soil)	3,1	1,9	0,6	7,6
	Sodio intercambiable (Na; cmol+/kg soil)	0,1	0,0	0,0	0,2
Materia orgánica	Carbono fácilmente oxidable (..EOC; %)	1,7	0,8	0,9	4,3
	Nitrógeno total (ITN; %)	0,1	0,1	0,0	0,4
	Carbono orgánico total (TOC; %)	2,1	1,1	0,2	5,1
	Carbono mineralizable (Cmin; mg/kg soil)	209,7	82,5	96,0	445,3
	Carbono de biomasa microbiana (ICmic; mg/kg soil week)	34,2	11,7	17,3	62,4
	Nitrógeno de biomasa microbiana (Nmic; mg/kg soil)	26,9	11,6	10,4	50,1
	Fósforo de biomasa microbiana (Pmic; mg/kg soil)	7,7	4,3	1,4	17,2
Actividad enzimática	Hidrólisis de diacetato de fluoresceína (FDA; µg/g*h)	20,4	8,8	5,4	38,2
	Actividad deshidrogenasa (IDHA; µg/g*h)	9,4	4,9	1,9	23,5
	Actividad ureasa (IUre; µg N/g*h)	76,8	42,0	17,9	196,6
	Actividad catalasa (..Cat; ml O ₂ /3min*g)	1,2	0,6	0,5	3,7
	Actividad fosfatasa alcalina (AlkP; µg/g*h)	5,9	3,0	0,2	12,6
	Actividad fosfatasa ácida (AcP; µg/g*h)	4,6	2,4	0,7	10,3

¹D.E.: desviación estándar.

3.5. Productividad forestal

La productividad forestal se estimó utilizando el índice de sitio (altura dominante a una edad de referencia) que está fuertemente correlacionado con la producción de madera (SKOVSGAARD & VANCLAY, 2008). Usamos el índice de sitio estimado por BUEIS et al. (2017a) para las mismas parcelas consideradas aquí. Aunque nuestro objetivo era determinar el efecto de la disponibilidad y el estado del P del suelo sobre la productividad forestal de los rodales estudiados, también incluimos los parámetros del suelo seleccionados en este trabajo y algunas variables climáticas, ya que suelen ser importantes para explicar los índices de sitio. Las variables climáticas seleccionadas se relacionaron con la disponibilidad de agua, siguiendo estudios previos de productividad forestal de esta especie (DEL RÍO et al., 2014; BUEIS et al., 2016a). Así, se han incluido en este análisis el índice de Lang (LANG, 1915) y el índice hídrico anual según Thornthwaite (THORNTHTHWAITE, 1949). Ambos índices clasifican la zona como árida/subhúmeda.

3.6. Análisis estadísticos

Para determinar las relaciones entre las fracciones de P se calcularon los coeficientes de correlación de Spearman (usando el paquete Hmisc (HARREL et al., 2017) en el software R) y se realizó un análisis de componentes principales (PCA; en R: prcomp). Para evaluar las relaciones entre las fracciones de P y cada uno de los cinco grupos de parámetros edáficos utilizamos los coeficientes de correlación de Spearman y análisis de correlación canónica (CCA; paquetes CCA y CCP en R; GONZÁLEZ et al., 2008; MENZEL, 2012). Calculamos la medida de adecuación del muestreo de Kaiser (en R: KMO, paquete psych; REVELLE, 2017) para probar si el tamaño de la muestra era adecuado o no para el CCA. El MSA fue estadísticamente aceptable en todos los CCA realizados. Utilizamos la regresión general de mínimos cuadrados parciales (PLS; en R: plsr del paquete pls; WEHRENS & MEVIK, 2007) para estudiar la relación entre el índice de sitio, las fracciones de P, los parámetros edáficos y las variables climáticas. Antes de realizar los análisis, las variables estudiadas se sometieron a pruebas de linealidad, valores atípicos y normalidad (en R: shapiro.test), y aquellas variables no normales, se transformaron.

4. Resultados

4.1. Fraccionamiento de fósforo

Los suelos estudiados presentaron un contenido medio de P total de 289 mg/kg, variando entre 116 y 611 mg/kg. El P orgánico representó alrededor del 12% del P total (Tabla 2). Como era de esperar, la fracción primaria de P fue la fracción más grande en los suelos estudiados (47% del P total) seguida por la fracción estable de P. La fracción más pequeña fue el P extraído con membrana (Tabla 2).

Tabla 2. Fracciones de fósforo (mg kg⁻¹) en los suelos estudiados.

Fracción de P	Media	D.E. ¹	Min	Max	% de P _{Total}
PAEM	3,4	1,9	1,0	10,6	1,2
P _{NaHCO₃}	6,9	2,8	1,6	15,2	2,4
P _{oNaHCO₃}	5,5	3,6	0,2	15,6	1,9
P _{NaOH}	11,4	9,5	3,2	46,9	3,9
P _{oNaOH}	30,5	20,2	8,6	120,8	10,5
PHCl _{1M}	137,0	94,3	3,7	387,1	47,3
PHCl _{conc}	78,6	44,4	18,9	235,5	27,2
PHClO ₄	16,1	5,6	6,5	32,0	5,6
P _{Total}	289,4	120,8	116,8	611,6	100

¹D.E.: desviación estándar. Abreviaturas como en Figura 1.

De acuerdo con las correlaciones de Spearman, el P extraíble con membrana se correlacionó positivamente con el P inorgánico altamente lóbil (Spearman rho = 0,47, p = 0,007) y con el P orgánico moderadamente lóbil (rho = 0,54, p = 0,001). Las correlaciones más altas se encontraron entre el P inorgánico moderadamente lóbil y las formas primarias de P, y entre las formas de P estable y residual (Tabla 3).

Tabla 3. Correlaciones de Spearman entre las fracciones de fósforo ("-" no significativo).

	PAEM	P _{NaHCO₃}	P _{oNaHCO₃}	P _{NaOH}	P _{oNaOH}	PHCl _{1M}	PHCl _{conc}
P _{NaHCO₃}	0,47**	-	-	-	-	-	-
P _{oNaHCO₃}	-	-	-	-	-	-	-
P _{NaOH}	-	-	-	-	-	-	-
P _{oNaOH}	0,54**	-	0,44*	-	-	-	-
PHCl _{1M}	-	-	-	0,60***	-	-	-
PHCl _{conc}	-	-	0,39*	-	-	-	-
PHClO ₄	-	-	-	-	-	-	0,66***
P _{Total}	-	-	-	0,44*	-	0,82***	0,49**

***p < 0,001; **p < 0,01; *p < 0,05. Abreviaturas como en Figura 1.

4.2. Relación entre las fracciones de P y los parámetros edáficos

4.2.1. Fracciones de P y parámetros de composición del suelo

Dos dimensiones canónicas fueron significativas (lambda de Wilk; $p < 0,001$ y $p = 0,002$, cada una) y presentaron correlaciones de 0,87 y 0,81, respectivamente. La primera dimensión canónica estuvo influenciada por el contenido de arena ($r = 0,97$) y el P primario ($r = -0,91$). La segunda dimensión canónica se correlacionó negativamente con los carbonatos ($r = -0,77$), el contenido de caliza activa ($r = -0,69$) y el P inorgánico altamente labil ($r = -0,54$) y se correlacionó positivamente con el P residual ($r = 0,54$, Figura 2).

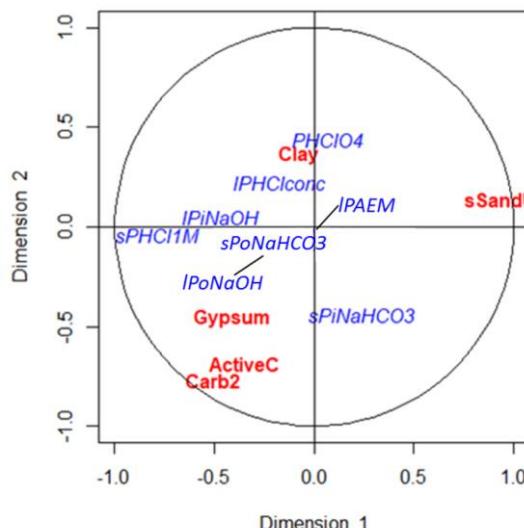


Figura 2. Distribución de variables entre la primera y segunda dimensión canónica del CCA realizado con las fracciones de P y los parámetros de composición del suelo. Abreviaturas como en Figura 1.

El contenido de arcilla se correlacionó positivamente con el P residual pero negativamente con el P extraíble con membrana. El contenido de arena se correlacionó negativamente con el P primario y el P inorgánico moderadamente labil (Tabla 4).

Tabla 4. Correlaciones de Spearman entre las fracciones de P y los parámetros de composición del suelo ("-" no significativo).

	PAEM	P _i NaHCO ₃	P _o NaHCO ₃	P _i NaOH	P _o NaOH	PHCl _{1M}	PHCl _{conc}	PHClO ₄
Arcilla	-0.40*	-	-	-	-	-	-	0.42*
Arena	-	-	-	-0.52**	-	-0.81***	-	-
Caliza activa	-	-	-	-	-	-	-	-
Yeso	-	0.39*	0.46**	-	0.48**	-	-	-
Carbonatos	-	-	-	-	-	-	-	-0.62***

*** $p < 0,001$; ** $p < 0,01$; * $p < 0,05$. Abreviaturas como en Figura 1.

4.2.2. Fracciones de P y parámetros de fertilidad física del suelo

La primera dimensión canónica fue significativa según la prueba lambda de Wilk ($p < 0,001$) con una correlación de 0,89. Esta primera dimensión se correlacionó negativamente con la capacidad de campo, el punto de marchitez permanente, la porosidad del suelo y todas las fracciones de P, y solo se relacionó positivamente con la densidad aparente (Figura 3).

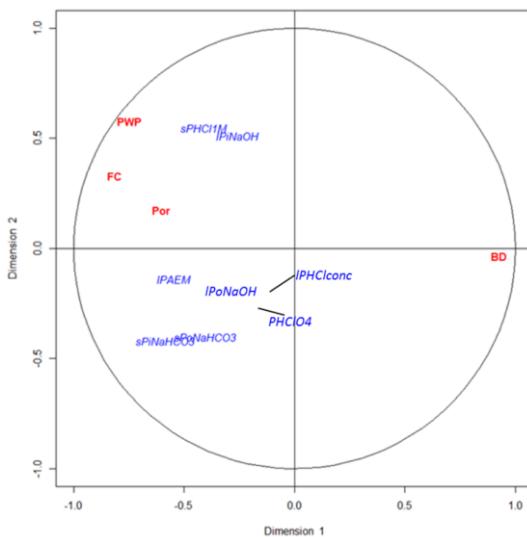


Figura 3. Distribución de variables entre la primera y segunda dimensión canónica del CCA realizado con las fracciones de P y los parámetros de fertilidad física del suelo. Abreviaturas como en Figura 1.

Encontramos correlaciones positivas entre las formas primarias de P, la capacidad de campo y el punto de marchitez permanente (Tabla 5). La fracción de P inorgánico moderadamente lábil y el P extraíble con membrana también se correlacionaron positivamente con los parámetros del suelo antes mencionados. La porosidad solo mostró correlaciones significativas con la fracción inorgánica de P altamente lábil y fue el parámetro menos correlacionado con la primera dimensión canónica del CCA. La densidad aparente se relacionó significativa y negativamente con el P extraíble de la membrana y con la fracción inorgánica altamente lábil, respectivamente.

Tabla 5. Correlaciones de Spearman entre las fracciones de P y los parámetros de fertilidad física del suelo ("-" no significativo).

	PAEM	P _i NaHCO ₃	P _o NaHCO ₃	P _i NaOH	P _o NaOH	PHCl _{1M}	PHCl _{conc}	PHClO ₄
Densidad aparente	-0,36*	-0,58**	-	-	-	-	-	-
Porosidad	-	0,37*	-	-	-	-	-	-
Punto marchitez permanente	0,36*	-	-	0,45*	0,38*	0,49**	-	-
Capacidad de campo	-	-	-	0,44*	-	0,49**	-	-

***p < 0,001; **p < 0,01; *p < 0,05. Abreviaturas como en Figura 1.

4.2.3. Fracciones de P y parámetros de fertilidad química del suelo

El CCA entre las fracciones de P y los parámetros de fertilidad química del suelo produjo dos dimensiones canónicas significativas ($r = 0,95, p < 0,001$ y $r = 0,92, p = 0,011$, respectivamente). La primera dimensión estuvo fuertemente influenciada por la capacidad de intercambio catiónico (1/CEC; $r = 0,81$) y la segunda por el manganeso disponible ($r = -0,72$), el hierro disponible (1/Fe; $r = 0,62$) y el magnesio intercambiable ($r = 0,61$). Para las fracciones de P, la primera dimensión se correlacionó principalmente con el P extraíble de la membrana ($r = -0,63$) y el P orgánico altamente lábil ($r = -0,59$), y la segunda dimensión con el P primario ($r = 0,87$; Figura 4).

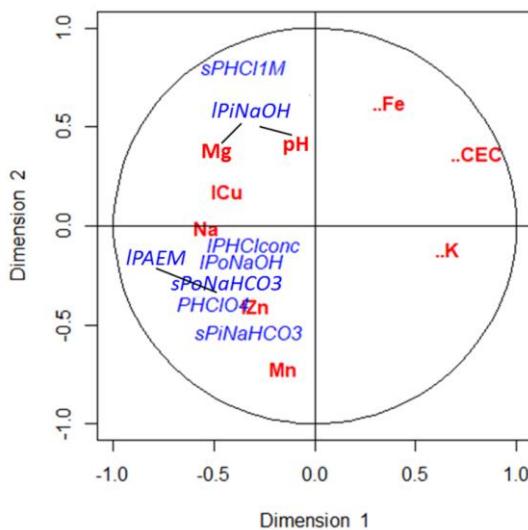


Figura 4. Primera dimensión canónica del CCA realizado con las fracciones de P y los parámetros de fertilidad química del suelo. Abreviaturas como en Figura 1.

Según las correlaciones de Spearman (Tabla 6), las formas de P más lábiles se correlacionaron positivamente con la capacidad de intercambio catiónico y con la cantidad de manganeso disponible. Además, el P fácilmente intercambiable extraído con membranas también se correlacionó positivamente con el potasio intercambiable.

Tabla 6. Correlaciones de Spearman entre las fracciones de P y los parámetros de fertilidad química del suelo (“-” no significativo).

	PAEM	P _{NaHCO₃}	P _{oNaHCO₃}	P _{iNaOH}	P _{oNaOH}	PHCl _{1M}	PHCl _{conc}	PHCl ₄
pH	-	-	-	-	-	0,48**	-	-
CEC	0,55**	0,53**	0,36*	-	0,45*	-	-	-
Fe	-	-	0,40*	-	-	-0,40*	-	0,49**
Cu	-	-	-	-	-	-	-	-
Zn	-	-	0,52**	-	0,44*	-	-	-
Mn	0,43*	0,52**	-	-0,43*	-	-0,55**	-	-
Mg	-	-	-	0,48**	-	0,61***	-	-
K	0,54**	-	-	-	0,39*	-	-	-
Na	-	-	-	-	-	-	-	-

***p < 0,001; **p < 0,01; *p < 0,05. Abreviaturas: fracciones de P en Figura 1; parámetros edáficos en Tabla 1.

4.2.4. Fracciones de P y materia orgánica del suelo

Las correlaciones explicadas por las dos primeras dimensiones del CCA basado en las fracciones de P y las variables de materia orgánica son 0,92 ($p < 0,001$) y 0,81 ($p = 0,041$), respectivamente. La primera dimensión canónica (Figura 5) se correlacionó negativamente con todos los parámetros relacionados con la materia orgánica, así como con todas las fracciones de P excepto con el P inorgánico moderadamente lábil y con el P primario, dos fracciones fuertemente relacionadas entre sí. La segunda dimensión canónica estuvo influenciada de forma negativa por el C fácilmente oxidable y el N de la biomasa microbiana, y positivamente por las formas de P más recalcitrantes (P estable y residual).

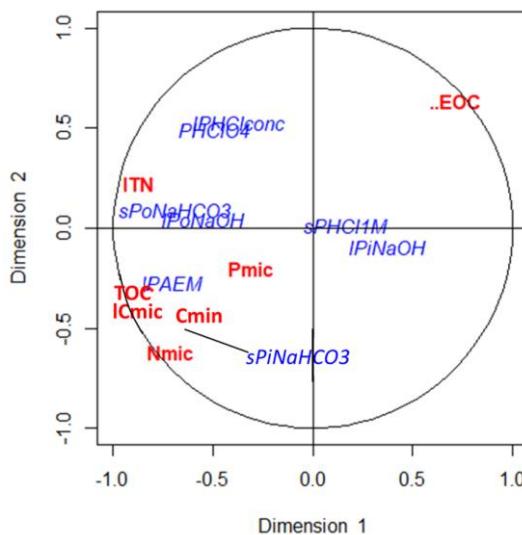


Figura 5. Primera dimensión canónica del CCA realizado con las fracciones de P y los parámetros relacionados con la materia orgánica del suelo. Abreviaturas como en Figura 1.

Encontramos fuertes correlaciones entre el P intercambiable extraído con membrana y todos los parámetros relacionados con la materia orgánica (Tabla 7). Estas correlaciones fueron todas positivas. Las formas de P estable y residual se correlacionaron positivamente con el nitrógeno total, pero la forma de P primario no mostró ninguna correlación significativa.

Tabla 7. Correlaciones de Spearman entre las fracciones de P y los parámetros relacionados con la materia orgánica del suelo ("-" no significativo).

	PAEM	P _{NaHCO₃}	P _{0NaHCO₃}	P _{NaOH}	P _{0NaOH}	PHCl _{1M}	PHCl _{conc}	PHCl ₄
TOC	0,54**	0,64***	0,40*	-	0,45*	-	-	-
EOC	0,73***	0,70***	-	-	0,45*	-	-	-
TN	0,60***	-	0,49**	-	0,51**	-	0,36*	0,49**
Cmic	0,51**	0,62***	0,43*	-	0,50**	-	-	-
Cmin	0,46**	0,61***	-	-	-	-	-	-
Nmic	0,59***	0,74***	-	-	0,40*	-	-	-
Pmic	0,36*	-	-	-	-	-	-	-

***p < 0,001; **p < 0,01; *p < 0,05. Abreviaturas: fracciones de P en Figura 1; parámetros edáficos en Tabla 1.

4.2.5. Fracciones de P y actividad enzimática del suelo

La primera dimensión canónica en el CCA basado en las fracciones de P y las variables relacionadas con la actividad enzimática del suelo fue significativa (prueba lambda de Wilk; $p < 0,001$) y su correlación canónica fue de 0,93. Estuvo influenciada negativamente por todos los parámetros de actividad enzimática del suelo (Figura 6). Además, la mayoría de las fracciones de fósforo se correlacionaron también negativamente con esta primera dimensión canónica, excepto el P inorgánico moderadamente lóbil y el P primario.

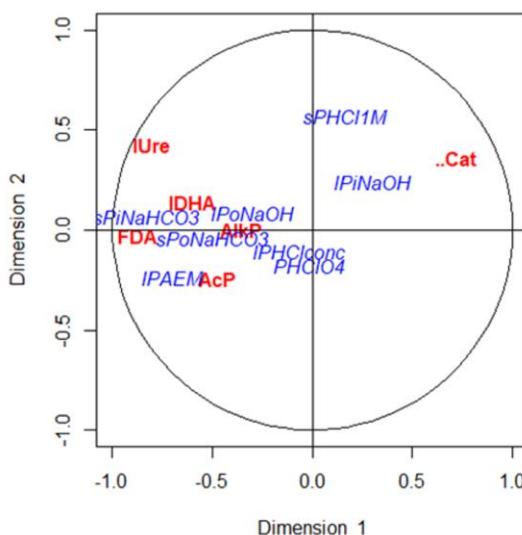


Figura 6. Primera dimensión canónica del CCA realizado con las fracciones de P y los parámetros relacionados con la actividad enzimática del suelo. Abreviaturas como en Figura 1.

Como era de esperar, encontramos correlaciones significativas entre los parámetros del suelo relacionados con la actividad enzimática y las fracciones de fósforo más lábiles y disponibles para las plantas (Tabla 8).

Tabla 8. Correlaciones de Spearman entre las fracciones de P y los parámetros relacionados con la actividad enzimática del suelo (“-” no significativo).

	PAEM	$P_i NaHCO_3$	$P_o NaHCO_3$	$P_i NaOH$	$P_o NaOH$	$PHCl_{1M}$	$PHCl_{conc}$	$PHClO_4$
FDA	0,43*	0,69***	0,41*	-	-	-	-	-
DHA	0,55**	0,51**	0,40*	-	0,44*	-	-	-
Ureasa	0,47**	0,76***	-	-	0,41**	-	-	-
Catalasa	0,77***	0,54**	0,38*	-	0,36*	-	-	-
AlkP	-	-	-	-	0,36*	-	-	-
AcP	0,46**	-	-	-	-	-	-	-

*** $p < 0,001$; ** $p < 0,01$; * $p < 0,05$. Abreviaturas: fracciones de P en Figura 1; parámetros edáficos en Tabla 1.

4.2.6. Relación entre productividad forestal, fracciones de P y parámetros edáficos

El análisis PLS incluyó el índice de sitio como variable respuesta y todos los parámetros edáficos, las fracciones de fósforo y dos variables climáticas relacionadas con la disponibilidad de agua como variables predictivas. El PLS resultó en la selección de dos componentes que explicaron el 67,5% de la variación del índice de sitio. El primer componente se relacionó con la composición del suelo (carbonatos totales, caliza activa y textura del suelo explicaron el 87,8% de la varianza del componente). El pH del suelo y el punto de marchitez permanente también fueron variables importantes en este componente, así como la fracción de P primario. El primer componente solo utilizó el 11,4% de la información de los predictores y pudo predecir el 35,9% de la variabilidad del índice de sitio. El segundo componente se asoció con variables relacionadas con el agua del suelo y su fertilidad química (25,2% de la varianza del componente). Aunque las variables climáticas no explicaron un alto porcentaje de la variación en ninguno de los dos componentes, sí mejoraron sustancialmente el porcentaje de variación del índice de sitio explicado por el modelo (67,5% frente al 47,7% sin las variables climáticas), manteniéndose los resultados.

5. Discusión

5.1. Estado del fósforo del suelo y su disponibilidad

El PAEM fue la fracción más baja en los suelos estudiados. Como era de esperar, encontramos correlaciones positivas entre el PAEM y el Pi altamente lábil, ya que esta fracción incluye compuestos de P fácilmente intercambiables y simula la acción de las raíces de las plantas para disolver los minerales de P (TURRIÓN et al., 2000). Por lo tanto, la fracción de Pi altamente lábil en estos suelos podría actuar como una fuente de P disponible a corto plazo. La suma de PoNaHCO₃ y PoNaOH representó alrededor del 12% del P total, siguiendo resultados previos en inceptisoles o en suelos de bosques mediterráneos (CROSS & SCHLESINGER, 1995; BUEIS et al., 2019). Las formas más refractarias de P (PHClconc y PHClO₄) se correlacionaron positivamente con la fracción de P orgánico altamente lábil, corroborando que las fracciones más estables y residuales pueden ser fuentes de P disponible a largo plazo (TRASAR-CEPEDA et al., 1991).

Las fracciones primaria y estable fueron las formas predominantes de P en los suelos estudiados como se ha observado en otros suelos calcáreos (TRASAR-CEPEDA et al., 1991; ALT et al., 2011). El P primario solo se correlacionó con el Pi moderadamente lábil y con el P total, lo que indica que en estos suelos calcáreos el P total está formado principalmente por el P incluido en los minerales de Ca. La relación entre P primario y el inorgánico moderadamente lábil merece un estudio en profundidad para comprender su importancia en la dinámica del P en suelos calizos con alto contenido de carbonatos. Algunos estudios han indicado que la extracción de HCl 1M elimina no solo el Ca-P sino también las formas de P relacionadas con el Fe y el Al (BARROW et al., 2021), lo que podría explicar esta correlación. La concentración de P total en los suelos estudiados fue baja, pero en el rango de otros suelos forestales similares (TRASAR-CEPEDA et al., 1991; CROSS & SCHLESINGER, 1995; GOMES-COSTA et al., 2016).

5.2. Relación entre las fracciones de P y los parámetros edáficos

Las características específicas de cada suelo determinan la solubilidad y biodisponibilidad de los nutrientes, y afectan de manera diferente a las diversas formas de P del suelo (BUEIS et al., 2019; NIEDERBERGER et al., 2019).

Las correlaciones altamente significativas de los parámetros relacionados con la composición del suelo se establecieron con las fracciones de P ligadas al Ca. Aunque importante, el efecto directo de la textura sobre la distribución de las fracciones de P en suelos forestales ha sido poco estudiado (ZEDERER & TALKNER, 2018; NIEDERBERGER et al., 2019). Se encontraron correlaciones negativas entre el contenido de arena y el P primario, fracción que representa la mayor parte del contenido total de P en los suelos estudiados. La influencia negativa del contenido de arena en las concentraciones de P primario y P total se ha demostrado previamente en suelos de áreas climáticas muy diferentes (CROSS & SCHLESINGER, 1995). Esta influencia podría interpretarse como la reducción de las superficies a las que se puede unir el fósforo, como las superficies del complejo arcillo-húmico y, en el caso concreto de los suelos calizos, al menor contenido de caliza activa, un material con tamaño de limo y arcilla que muestra una gran actividad química en el suelo y, a menudo, es un mejor predictor del comportamiento del P que el contenido total de carbonatos totales en el suelo (TAALAB et al., 2019).

La aireación del suelo y la capacidad de retención de agua son factores importantes que afectan a la dinámica del P porque juegan un papel clave en la mineralización e inmovilización de este elemento (ARENBERG & ARAI, 2019). En este estudio se ha considerado el efecto de la aireación del suelo en las fracciones de P a través de la densidad aparente y la porosidad. Nuestros resultados indicaron que las fracciones de P lábil se redujeron con el aumento de la

densidad aparente del suelo, es decir, con la reducción de su aireación. Una menor aireación del suelo podría implicar una menor actividad microbiana y una disminución de la mineralización. La razón por la que la densidad aparente afecta a las formas disponibles de P en el suelo puede deberse, por un lado, al contenido de materia orgánica (mayor cantidad de materia orgánica, menor densidad aparente) y por otro, a aspectos relacionados con la clase textural.

Como esperábamos, los parámetros relacionados con la retención de agua en el suelo se correlacionaron positivamente con el P disponible y lábil, ya que la humedad del suelo es esencial para la supervivencia de los microorganismos del suelo y la producción de fosfatasas (ARENBERG & ARAI, 2019), aumentando así las concentraciones de las fracciones de P lábil. Las parcelas estudiadas se encuentran bajo clima mediterráneo donde la precipitación anual es baja (< 500 mm) y la sequía estival es intensa y prolongada. En consecuencia, la escasez de precipitaciones y la baja humedad del suelo, junto con una baja capacidad de retención de agua, pueden reducir las actividades enzimáticas en el suelo y, por tanto, la mineralización de P (BUEIS et al., 2018; 2019).

Las tasas de mineralización del fósforo, así como su solubilidad, fijación y concentración de sus diferentes fracciones están influenciadas por el pH del suelo (HINSINGER, 2001; TURNER & BLACKWELL, 2013). Sin embargo, a diferencia de estudios previos, nuestros resultados no mostraron un fuerte efecto del pH en las fracciones de P, lo que probablemente se deba a la baja variabilidad del pH entre los suelos estudiados.

Las diferentes fracciones de fósforo, principalmente el P lábil, se relacionaron positivamente con la capacidad de intercambio catiónico y la cantidad de potasio intercambiable, lo que podría explicarse por la fuerte relación de estos parámetros con la cantidad y calidad de la materia orgánica del suelo (MOS). La disponibilidad a corto plazo de P para la vegetación está fuertemente influenciada por procesos bioquímicos que afectan a la MOS, mientras que su estado a largo plazo generalmente está determinado por transformaciones geoquímicas (GOMES-COSTA et al., 2016; HOU et al., 2016). Además, el P primario se relacionó negativamente con el hierro y el manganeso asimilables, ya que cuando aumenta el contenido de carbonatos o caliza activa en el suelo, disminuye la cantidad de Fe y Mn asimilables, mientras que aumenta el P primario ligado a los minerales de Ca (TURRIÓN et al., 2018).

Las fracciones más lábiles de P tanto inorgánico (PAEM y PiNaHCO₃) como orgánico (PoNaHCO₃) estuvieron se correlacionaron con los parámetros del suelo relacionados con la MOS y la actividad enzimática. Esto indica que en los suelos estudiados el ciclo biológico del P tiene gran importancia en la disponibilidad de este elemento. La disponibilidad de P a partir de formas orgánicas puede deberse a dos causas: (1) la mineralización de la MOS, que está regulada por la demanda energética de los microorganismos (BHATTACHARYYA & JHA, 2012). Los resultados del CCA y las correlaciones de Spearman realizadas con el grupo de parámetros edáficos relacionados con la MOS mostraron la relevancia de esta mineralización biológica del P en los suelos estudiados, siguiendo resultados previos (BUEIS et al., 2018). (2) La segunda posible causa de la disponibilidad de P a partir de formas orgánicas podría ser la liberación específica de P debido a la acción de enzimas concretas, fosfatasa ácida y, especialmente en los suelos estudiados, fosfatasa alcalina (SHARMA et al., 2013). En general se considera que, a menor disponibilidad de P en el suelo, mayor es la actividad de la fosfatasa, ya que esta enzima se libera cuando los niveles de P disponibles son limitantes TAPIA-TORRES & GARCÍA-OLIVA, 2013). Sin embargo, la fosfatasa alcalina no mostró ninguna correlación con las formas asimilables de fósforo ni tampoco tuvo alta relevancia en el primer eje canónico del CCA. La ausencia de importancia en el CCA y de correlación entre las formas de P disponibles y la fosfatasa alcalina podría indicar que en estos suelos calcáreos la concentración de P asimilable, aunque baja, puede ser suficiente para satisfacer la demanda de la vegetación y los microorganismos del suelo. Las poblaciones microbianas, además de participar en la mineralización y solubilización del P del suelo, también

son una reserva de P orgánico que se libera cuando los microorganismos mueren (NANNIPIERI et al., 2002; ACHAT et al., 2010). Nuestros resultados mostraron que la biomasa microbiana C, N y P se correlacionó significativamente con el fósforo más lábil y la biomasa microbiana C también con el P orgánico. La correlación positiva encontrada entre el P de la biomasa microbiana y el P extraíble con membrana está en consonancia con estudios previos (ZAMUNER et al., 2008; BUEIS et al., 2019) y con el hecho de que la biomasa microbiana regula la disponibilidad de P del suelo a través de la liberación de su contenido de P. Por tanto, todos estos resultados parecen indicar que la mineralización biológica de P en estos suelos juega un papel más importante en la liberación de P que la mineralización bioquímica.

Aunque en los suelos estudiados, las formas orgánicas de P representaron un bajo porcentaje del P total en comparación con otros estudios (NIEDERBERGER et al., 2019), cabe esperar una fuerte influencia del carbono total del suelo (TOC) y del carbono fácilmente oxidable (EOC) en la distribución de P. Siguiendo estudios previos, encontramos correlación positiva entre el P orgánico, el P disponible y el P inorgánico altamente lábil con el C orgánico del suelo (ZEDERER & TALKNER, 2018; BUEIS et al., 2019), ya que estas formas solubles y lábiles de P provienen de la mineralización de la MOS (HOU et al., 2014). La relación positiva entre el P inorgánico y el EOC puede deberse a que la MOS podría actuar como fuente de P inorgánico lábil en los suelos estudiados (CONDRON et al., 2005).

5.3. Relación entre la productividad forestal, las fracciones de P y los parámetros edáficos

Usando el gran conjunto de parámetros edáficos considerados en este trabajo (incluidas las diferentes formas de P del suelo), explicamos alrededor del 67% de la varianza del índice de sitio calculado por BUEIS et al. (2017a) para los rodales de *P. halepensis* estudiados. Nuestros resultados indicaron que el índice de sitio en las parcelas estudiadas está condicionado por parámetros relacionados con la textura del suelo y el contenido de carbonatos, así como por el P primario. Los parámetros relacionados con la retención de agua en el suelo también explicaron gran parte de la variación del índice de sitio. Estos resultados están en línea con los obtenidos por otros autores para *P. halepensis* ya que el crecimiento de esta especie (asociado a su índice de sitio y productividad) está impulsado principalmente por la disponibilidad de agua, considerando tanto su suministro como su retención en el suelo (DEL RÍO et al., 2014; AGUIRRE et al., 2019). Sorprendentemente, las variables climáticas incluidas en el modelo, relacionadas con el suministro de agua, no influyeron en el índice del sitio tanto como se esperaba. Esto puede deberse a que en estas parcelas los parámetros de composición del suelo, principalmente la elevada presencia de Ca, modula en gran medida el crecimiento de los árboles. Sin embargo, la inclusión de variables climáticas mejoró considerablemente la explicación de la variación del índice de sitio. Además, la fertilidad química del suelo relacionada con el suministro de macronutrientes también fue importante para explicar el índice de sitio. Esto puede deberse a la alta disponibilidad de macronutrientes como K y Mg que podrían favorecer la resistencia a la sequía ya que los árboles con un buen suministro de estos nutrientes reducen la pérdida de agua por transpiración (BRADBURY & MALCOLM, 1977; DEL RÍO et al., 2014). Generalmente, la descomposición de la MOS afecta a la productividad de los ecosistemas, particularmente en bosques pobres en nutrientes como los bosques mediterráneos (MUSCOLO et al., 2007). Sin embargo, los parámetros relacionados con la MOS no parecieron influir en el índice de sitio. Esto podría deberse a que la liberación de nutrientes de la hojarasca depende no solo de la actividad de los microorganismos sino también y principalmente, de la calidad de la hojarasca y de factores ambientales. En nuestro caso, la calidad de la hojarasca es la misma en todas las parcelas: misma especie de pino con la misma composición química en acículas, mismas estrategias para la conservación de nutrientes en sus tejidos y mismas tasas de descomposición (CARRASCO et al., 2017). Además, las parcelas se encuentran en zonas con condiciones ambientales muy similares por lo que los factores

ambientales tampoco supondrían grandes diferencias en el proceso de liberación de nutrientes entre parcelas.

6. Conclusiones

Los procesos de mineralización biológica jugaron un papel clave en el ciclo del P, por lo que los parámetros relacionados con la MOS y la actividad enzimática promovieron principalmente la disponibilidad de ese elemento. Sin embargo, la fracción mayoritaria en estos suelos (el P primario ligado al Ca) estuvo ligada al contenido de carbonatos y arena, y podría actuar como fuente de P disponible a medio plazo. La concentración de P disponible, aunque baja, puede ser suficiente para satisfacer las demandas de la vegetación y los microorganismos en estos suelos. El índice de sitio de *Pinus halepensis* en las parcelas estudiadas no se vio afectado por el P disponible en el suelo, lo que indica que el crecimiento de esta especie y por ende su productividad, no está tan limitado por los nutrientes y otros parámetros del suelo, sino por la disponibilidad de agua, normalmente escasa en su distribución. Avanzar en el conocimiento sobre la dinámica interna de los suelos forestales y su relación con la productividad forestal es clave para aportar información relevante a la gestión forestal sostenible.

7. Agradecimientos

Los autores agradecen a C. Blanco y J.C. Arranz por su asesoramiento técnico en los análisis de laboratorio. Este trabajo ha sido financiado por la Junta de Castilla y León mediante el proyecto VA096G19 “Servicios ecosistémicos de suelos bajo masas forestales mixtas versus masas puras. Efecto del tipo de rodal sobre la fertilidad del suelo, la retención de agua y el secuestro de carbono”. El autor R.M.S, contó con el apoyo de la iniciativa de la UE Garantía Juvenil.

8. Bibliografía

- ACHAT, D.L.; BAKKER, M.R.; ZELLER, B.; PELLERIN, S.; BIENAIMÉ, S.; MOREL, C.; 2010, Long-term organic phosphorus mineralization in Spodosols under forests and its relation to carbon and nitrogen mineralization, *Soil Biol. Biochem.* 42 1479–1490.
- AGUIRRE, A.; DEL RÍO, M.; CONDÉS, S.; 2019. Productivity estimations for monospecific and mixed pine forests along the Iberian Peninsula aridity gradient, *Forests* 10.
- ALT, F.; OELMANN, Y.; HEROLD, N.; SCHRUMPF, M., WILCKE, W.; 2011, Phosphorus partitioning in grassland and forest soils of Germany as related to land-use type, management intensity, and land use-related pH, *J. Plant Nutr. Soil Sci.* 174 195–209.
- ARENBERG, M.R.; ARAI, Y.; 2019, Uncertainties in soil physicochemical factors controlling phosphorus mineralization and immobilization processes, Elsevier Inc.
- BARROW, N.J.; SEN, A.; ROY, N.; DEBNATH, A.; 2021, The soil phosphate fractionation fallacy, *Plant Soil* 459 1–11.
- BAHTTACHARYYA, P.N.; JAH, D.K.; 2012, Plant growth-promoting rhizobacteria (PGPR): Emergence in agriculture, *World J. Microbiol. Biotechnol.* 28 1327–1350.

BRADBURY, I.K.; MALCOM, D.C.; 1977, The effect of phosphorus and potassium on transpiration, leaf diffusive resistance and water- use efficiency in Sitka spruce (*Picea sitchensis*) seedlings, *J. Appl. Ecol.* 14 631–641.

BUEIS, T.; BRAVO, F.; PANDO, V.; KISSI, Y.A.; TURRIÓN, M.B.; 2019, Phosphorus availability in relation to soil properties and forest productivity in *Pinus sylvestris* L. plantations, *Ann. For. Sci.* 76.

BUEIS, T.; BRAVO, F.; PANDO, V.; TURRIÓN, M.B.; 2016a, Database of site factors in *Pinus halepensis* Mill. plantations in Spain. [dataset] doi:10.5281/zenodo.198522.

BUEIS, T.; BRAVO, F.; PANDO, V.; TURRIÓN, M.B.; 2016b; Relationship between environmental parameters and *Pinus sylvestris* L. site index in forest plantations in northern Spain acidic plateau, *iForest* 9 394–401.

BUEIS, T.; BRAVO, F.; PANDO, V.; TURRIÓN, M.B.; 2017a, Site factors as predictors for *Pinus halepensis* Mill. productivity in Spanish plantations, *Ann. For. Sci.* 74.

BUEIS, T.; TURRIÓN, M.B.; BRAVO, F.; PANDO, V.; MUSCOLO, A.; 2017b, Dataset of soil, climatic and stand variables in *Pinus sylvestris* and *Pinus halepensis* plantations in Spain. [Dataset]. doi:10.5281/zenodo.345791.

BUEIS, T.; TURRIÓN, M.B.; BRAVO, F.; PANDO, V.; MUSCOLO, A.; 2018, Factors determining enzyme activities in soils under *Pinus halepensis* and *Pinus sylvestris* plantations in Spain: a basis for establishing sustainable forest management strategies, *Ann. For. Sci.* 75.

CARRASCO, B.; CABANEIRO, A.; FERNANDEZ, I.; 2017, Exploring potential pine litter biodegradability as a natural tool for low-carbon forestry, *For. Ecol. Manage.* 401 166–176.

CONDRON, L.M.; TURNER, B.L.; CADE-MENUN, B.J.; 2005, Chemistry and dynamics of soil organic phosphorus, *Agric. Environ.* 87–121.

CROSS, A.F.; SCHLESINGER, W.H.; 1995, A literature review and evaluation of the Hedley fractionation: Applications to the biogeochemical cycle of soil phosphorus in natural ecosystems, *Geoderma* 64 197–214.

CROSS, A.F.; SCHLESINGER, W.H. 2001, Biological and geochemical controls on phosphorus fractions in semiarid soils, *Biogeochemistry* 52 155–172.

DEL RÍO, M.; RODRÍGUEZ-ALONSO, J.; BRAVO-OVIEDO, A.; RUÍZ-PEINADO, R.; CAÑELLAS, I.; GUTIÉRREZ, E.; 2014, Aleppo pine vulnerability to climate stress is independent of site productivity of forest stands in southeastern spain *Trees - Struct. Funct.* 28 1209–1224.

GOMES-COSTA, M.; GAMA-RODRIGUES, A.C.; GONÇALVES, J.L.D.M.; GAMA-RODRIGUES, E.F.; SALES, M.V.D.S.; ALEIXO, S.; 2016, Labile and non-labile fractions of phosphorus and its transformations in soil under eucalyptus plantations, Brazil, *Forests* 7 15.

GONZÁLEZ, I.; DÉJEAN, S.; MARTIN, P.; BACCINI, A.; 2008, CCA: An R package to extend canonical correlation analysis, *J. Stat. Softw.* 23 1–14.

GUO, F.; YOST, R. S.; 1998, Partitioning soil phosphorus into three discrete pools of differing availability, *Soil Sci.* 163 822–832.

GUPPY, C.N.; MENZIES, N.W.; MOODY, P.W.; BLAMEY, F.P.C.; 2005, Competitive sorption reactions between phosphorus and organic matter in soil: A review, *Aust. J. Soil* 43 189–202.

HARREL, F.E.J. et al.; 2017, Hmisc: Harrell Miscellaneous. R package version 4.0-3. Available at: <https://cran.r-project.org/package=Hmisc>.

HEDLEY, M.J.; STEWART, J.W.B.; CHAUHAN, B.S.; 1982, Changes in Inorganic and Organic Soil Phosphorus Fractions Induced by Cultivation Practices and by Laboratory Incubations, *Soil Sci. Soc. Am. J.* 46 970–976.

HINSINGER, P.; 2001, Bioavailability of soil inorganic P in the rhizosphere as affected by root-induced chemical changes: a review, *Plant Soil* 237 173–195.

HOU, E.; CHEN, C.; KUANG, Y.; ZHANG, Y.; HEENAN, M.; WEN, D.; 2016, A structural equation model analysis of phosphorus transformations in global unfertilized and uncultivated soils, *Global Biogeochem. Cycles* 30 1300–1309.

HOU, E., CHEN, C.; WEN, D.; LIU, X.; 2014, Relationships of phosphorus fractions to organic carbon content in surface soils in mature subtropical forests, Dinghushan, China, *Soil Res.* 52, 55–63.

JALALI, M.; RANJBAR, F.; 2009, Rates of decomposition and phosphorus release from organic residues related to residue composition, *J. Plant Nutr. Soil Sci.* 172, 353–359.

JOKELA, E.J.; WHITE, E.H.; BERGLUND, J.V.; 1988, Predicting Norway Spruce Growth From Soil and Topographic Properties in New York, *Soil Sci. Soc. Am. J.* 52, 809–815.

LANG, R.; 1915, Versuch einer exakten Klassifikation der Böden in klimatischer und geologischer Hinsicht. *Intern. Mitt. f. Bodenkd.* 5, 312–346.

MENZEL, U.; 2012, CCP: Significance tests for canonical correlation analysis (CCA). R package version, 1.

MURPHY, J.; Riley, J.P.; 1962, A modified single solution method for the determination of phosphate in natural waters. *Anal. Chim. Acta* 27, 31–36.

MUSCOLO, A.; SIDARI, M.; MERCURIO, R.; 2007, Influence of gap size on organic matter decomposition, microbial biomass and nutrient cycle in Calabrian pine (*Pinus laricio*, Poiret) stands. *For. Ecol. Manage.* 242, 412–418.

NANNIPIERI, P.; KANDELER, E.; RUGGIERO, P.; 2002, *Enzyme activities and microbiological and biochemical processes in soil. Enzymes in the environment*. New York: Marcel Dekker.

NIEDERBERGER, J.; KOHLER, M.; BAUHUS, J.; 2019, Distribution of phosphorus fractions with different plant availability in German forest soils and their relationship with common soil properties and foliar P contents. *Soil* 5, 189–204.

REVELLE, W.; 2017, psych: Procedures for Personality and Psychological Research. Available at: <https://cran.r-project.org/package=psych>.

SARDANS, J.; PEÑUELAS, J.; 2013, Tree growth changes with climate and forest type are associated with relative allocation of nutrients, especially phosphorus, to leaves and wood. *Glob. Ecol. Biogeogr.* 22.

SHARMA, S.B.; SAYYED, R.Z.; TRIVEDI, M.H.; GOBI, T.A.; 2013, *Phosphate solubilizing microbes: sustainable approach for managing phosphorus deficiency in agricultural soils*. Springer Plus.

SHEN, J.; YUAN, L.; ZHANG, J.; LI, H.; BAI, Z.; CHEN, X.; et al.; 2011, Phosphorus dynamics: From soil to plant. *Plant Physiol.* 156, 997–1005.

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

TAALAB, A.S.; AGEEB, G.W.; SIAM, H.S.; MAHMOUD, S.A.; 2019. Some Characteristics of Calcareous soils. A review. *Middle East J. Agric. Res.* 1, 96–105.

TAPIA-TORRES, Y.; GARCÍA-OLIVA, F.; 2013, La disponibilidad del fósforo es producto de la actividad bacteriana en el suelo en ecosistemas oligotróficos: Una revisión crítica. *Terra Latinoam.* 31, 231–242.

TATE, K.R.; 1984, The biological transformation of P in soil, En: *Biological processes and soil fertility*, 245-256, Springer, Dordrecht.

THORNTHWAITE, C.; 1949, A rational approach to the classification of climate. *Geogr. Rev.* 38, 55–94.

TIESSEN, H.; MOIR, J.; 1993, Characterization of available P by sequential extraction, En: CARTER, M. (eds): *Soil sampling and methods of analysis*, Canadian Society of Soil Science. Lewis publishers.

TRASAR-CEPEDA, M.C.; CARBALLAS, T.; GIL-SOTRES, F.; DE BLAS, E.; 1991, Liming and the phosphatase activity and mineralization of phosphorus in an andic soil. *Soil Biol. Biochem.* 23, 209–215.

TURNER, B.L.; BLACKWELL, M.S.A.; 2013, Isolating the influence of pH on the amounts and forms of soil organic phosphorus. *Eur. J. Soil Sci.* 64, 249–259.

TURRIÓN, M.B.; BUEIS, T.; LAFUENTE, F.; LÓPEZ, O.; SAN JOSÉ, E.; ELEFTHERIADIS, A.; et al.; 2018, Effects on soil phosphorus dynamics of municipal solid waste compost addition to a burnt and unburnt forest soil. *Sci. Total Environ.* 642, 374–382.

TURRIÓN, M.B.; GLASER, B.; SOLOMON, D.; NI, A.; ZECH, W.; 2000, Effects of deforestation on phosphorus pools in mountain soils of the Alay Range, Kyrgyzstan. *Biol. Fertil. Soils* 31, 134–142.

VITOUSKE, P.M.; 1984, Litterfall, nutrient cycling, and nutrient limitation in tropical forest. *Ecol. Lett.* 65, 285–298.

WALBRIDGE, M.R.; 1991, Phosphorus availability in acid organic soils of the lower North Carolina Coastal Plain. *Ecology* 72, 2083–2100.

WATANABE, F.S.; OLSEN, S.R.; 1965, Test of an ascorbic acid method for determining phosphorus in water and NaHCO_3 extracts from soil. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 29, 677–678.

WEHRENS, R.; MEVIK, B.H.; 2007, The pls package: principal component and partial least squares regression in R.

ZAMUNER, E.C.; PICONE, L.I.; ECHEVERRIA, H.E.; 2008, Organic and inorganic phosphorus in Mollisol soil under different tillage practices. *Soil Tillage Res.* 99, 131–138.

ZEDERER, D.P., TALKNER, U; 2018, Organic P in temperate forest mineral soils as affected by humus form and mineralogical characteristics and its relationship to the foliar P content of European beech. *Geoderma* 325, 162–171.