



UNIVERSIDAD DE VALLADOLID

Campus de Palencia

Escuela Técnica Superior de Ingenierías Agrarias

Máster en Investigación en Ingeniería para la Conservación y Uso Sostenible de Sistemas Forestales

**Influencia de la dinámica del fósforo edáfico en el índice de
sitio para *Pinus sylvestris* L. en las masas de León y
Palencia.**

Estudiante: Yaovi Abel Kissi

Tutora: M^a Belén Turrión Nieves

Julio de 2013

RESUMEN

El objetivo del presente trabajo fue determinar el papel del P edáfico en rodales de *Pinus sylvestris* L. en los páramos ácidos de León y Palencia. Se utilizaron datos de 35 parcelas permanentes representando tres índices de sitio (IS). Se llevó a cabo el fraccionamiento secuencial del P edáfico de Tiessen y Moir (1993). Utilizando un análisis discriminante sobre las formas del fósforo se seleccionó un modelo que permitió predecir el IS utilizando las formas de P altamente disponible P-MIA y el P ligado al Ca (P-HCl_{1M}). La validación cruzada del modelo permitió clasificar correctamente el 83% de las parcelas. Las regresiones entre las formas del fósforo y los parámetros edáficos (físicos, químicos y bioquímicos) fueron significativas. Se obtuvieron para las formas de P lábiles regresiones con parámetros relacionados con la cantidad y calidad de la materia orgánica y la eficiencia metabólica de los microorganismos edáficos y para las formas de P estables con parámetros texturales y el pH.

Palabras claves: *Pinus sylvestris* L., índice de sitio, fraccionamiento secuencial de P, formas del fósforo edáfico, parámetros edáficos.

ABSTRACT

The aim of this study was to determine the role of edaphic P in *Pinus sylvestris* L. stands on León and Palencia moorland acids. We used data from 35 permanent plots representing three Site index (IS). Was performed sequential edaphic phosphorus fractionation of Tiessen and Moir (1993). Using discriminant analysis on phosphorus forms a model that allows predicting the IS using the highly available P forms P-MIA and P linked to Ca (P-HCl_{1M}) was selected. The model Cross-validation classified correctly 83% of the plots. The regressions between phosphorus forms and soil parameters (physical, chemical and biochemical) were significant. Were obtained for labile P forms regressions with parameters related to quality and quantity of organic matter and metabolic efficiency and to soil microorganisms and P forms stable with textural parameters and pH.

Keywords: *Pinus sylvestris* L., site index, sequential P fractionation, edaphic phosphorus forms, soil parameters.

1- INTRODUCCIÓN

El fósforo (P) es un nutriente limitante para el crecimiento de las plantas en muchos suelos forestales (Achat *et al.*, 2010; Slazak *et al.*, 2010). Algunos suelos son limitados debido a un bajo contenido del P total (Slazak *et al.*, 2010), pero otros suelos tienen bajo contenido en P disponible, a pesar de un considerable contenido de P total (Muhammad *et al.*, 2008).

El P está presente en el suelo en formas de compuestos inorgánicos (P_i) y orgánicos (P_o). En suelos ácidos, la presencia de sesquióxidos de Fe y Al justifica el bajo contenido de P disponible para las plantas, por ejemplo, en Andosoles (Redel *et al.*, 2008).

Los microorganismos del suelo transforman el P orgánico en P disponible para las plantas, pero almacenan cantidades significativas de más de 40% en su biomasa, especialmente bajo condiciones de limitación por P (Achat *et al.*, 2010; Brake *et al.*, 1999), previniendo su fijación por los coloides inorgánicos del suelo (Ayaga *et al.*, 2006).

Para conocer las diferentes formas del P edáfico, se ha utilizado el método de fraccionamiento secuencial de Hedley *et al.* (1982), modificado por Tiessen y Moir (1993). Ese fraccionamiento secuencial del P responde a la necesidad de conocer la disponibilidad de ese elemento para las plantas a corto, medio y largo plazo y se caracteriza por la cuantificación para diferentes grados de disponibilidad de las formas inorgánicas (P_i) y las formas orgánicas (P_o) sucesivamente, sin informar sobre la composición estructural de las diferentes formas del P edáfico (Turrión *et al.*, 2001).

De acuerdo con los extractantes empleados, las fracciones obtenidas en el fraccionamiento secuencial de Tiessen y Moir (1993) se agrupan y se denominan de la siguiente forma:

- P directamente asimilable para las plantas denominado P-MIA y extraído utilizando la membrana de intercambio aniónico.
- P altamente lábil extraído con NaHCO_3 y que incluye formas inorgánicas, $P_i\text{-NaHCO}_3$ y orgánicas $P_o\text{-NaHCO}_3$.
- P moderadamente lábil asociado a los óxidos de Fe y Al, que es extraído con NaOH e incluye formas inorgánicas y orgánicas $P_i\text{-NaOH}$ y $P_o\text{-NaOH}$.
- P ligado al Ca, relativamente lábil $P\text{-HCl}_{1M}$,
- P estable ligado al Ca denominado $P\text{-HCl}_{\text{conc}}$.
- P más recalcitrante obtenido tras digerir la muestra del suelo en caliente con ácido perclórico $P\text{-HClO}_4$.

La productividad de un sitio forestal es un elemento clave en la gestión forestal sostenible ya que permite una mejor planificación de las actividades selvícolas. Su determinación es costosa cuando está basada sobre la medición repetida del crecimiento, del volumen extraído y la mortalidad de la masa a lo largo del turno. Para la determinación de la calidad de estación, se ha utilizado frecuentemente la altura de las masas que está fuertemente correlacionada con la producción maderable (Ortega y Montero, 1988; Skovsgaard y Vanclay, 2008). Cuando se utiliza la altura dominante (altura de los 100 árboles más gruesos por hectárea) a una edad típica, el índice de calidad de sitio se denomina índice de sitio (IS). La calidad de la estación es un índice numérico relacionado con la productividad en madera de una estación.

Trabajos previos como el realizado por De los Bueis (2012) en los páramos ácidos de Castilla y León han puesto de manifiesto la posible existencia de problemas de disponibilidad de algunos nutrientes, principalmente el P para las masas de *Pinus sylvestris* L. Este hecho ha llevado a plantear la necesidad de profundizar en el conocimiento de la dinámica del fósforo edáfico en los suelos de los páramos ácidos de Castilla y León bajo estas masas forestales y el utilizar las formas de este elemento como una herramienta de predicción del índice de sitio.

El objetivo de este trabajo es determinar el comportamiento del fósforo edáfico en función del índice de sitio en masas de *Pinus sylvestris* L. en los páramos ácidos de Castilla y León.

Para lograr ese objetivo se ha fijado las siguientes tareas:

- Determinar las diferentes formas de P edáfico en el área de estudio.
- Establecer las relaciones existentes entre las formas del P edáfico y los valores de índice de sitio para el *Pinus sylvestris* L. y buscar una ecuación que permita predecir la calidad de sitio partiendo de las formas del fósforo edáfico.
- Determinar las relaciones existentes entre las características del suelo y las formas del P edáfico, estudiando para ello las correlaciones existentes entre las formas del fósforo edáfico y distintos parámetros edáficos (físicos, químicos y bioquímicos) en las masas de *Pinus sylvestris* L. del páramo ácido de Castilla y León.

2- MATERIALES Y MÉTODOS

2-1 Descripción del sitio y tipo de muestreo

2-1-1 Características del sitio y parcelas

El presente trabajo se ha realizado en dos provincias de la comunidad de Castilla y León (León y Palencia) donde las masas de *Pinus sylvestris* L. crecen en altitudes comprendidas entre 800 y 1600 msnm y ocupan, según los datos del Tercer Inventario Forestal Nacional (IFN3), 56785 y 22429 ha respectivamente (DGCN, 2002).

Se tuvieron en cuenta un total de 35 parcelas (17 parcelas en Palencia y 18 en León) pertenecientes a la red de parcelas del Instituto Universitario de Investigación en Gestión Forestal Sostenible (Universidad de Valladolid-INIA) (Figura 1 y 2).

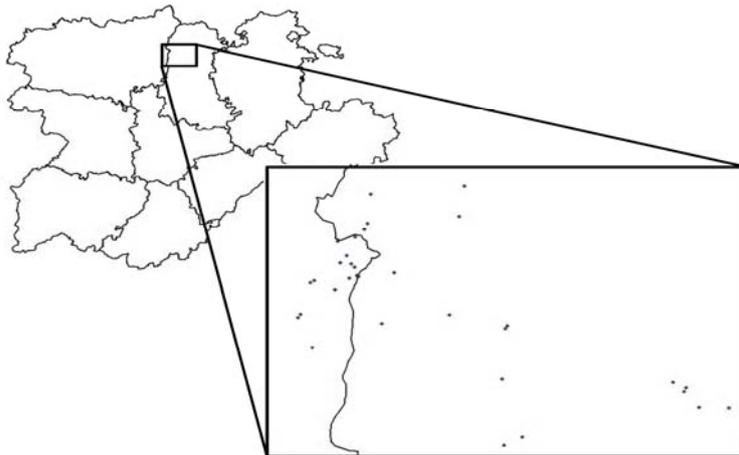


Figura1: Localización del área de estudio y las parcelas (Fuente: De los Bueis et al., 2012)

La altura dominante de los Pinos existentes en las parcelas estudiadas es de 22,8 m y la edad de las masas objeto de estudio oscila entre 28 y 54 años. Los datos silvícolas de las parcelas se resumen en la (tabla 1).

Los suelos de la zona fueron clasificados como Humic Hapludults por López (2003) y de Typic Dystroxerept y Typic Dystrudept por Herrero (2010).

Las curvas de calidad para *Pinus sylvestris* L. en Castilla y León fueron desarrolladas por Del-Río et al. (2006) utilizando la siguiente ecuación:

$$H_{02} = \frac{40,3331}{1 - \left[\left(1 - \frac{40,3331}{H_{01}} \right) \left(\frac{T_1}{T_2} \right)^{1,5003} \right]} \quad [\text{Ec. 1}]$$

donde H01 y H02 son las alturas dominantes a las edades T1 y T2 respectivamente. La aplicación de esta ecuación da lugar a cinco clases de calidades (24, 21, 18, 15, 12) basadas sobre el IS a la edad típica de 50 años. Partiendo de la altura dominante en cada parcela estudiada, de su edad actual y de la ecuación 1, se ha determinado el índice de sitio (altura dominante a la edad típica de 50 años) correspondiente a cada una de las parcelas. De este modo, las 35 parcelas de estudio fueron clasificadas de la siguiente manera: una parcela en la clase 24, 12 parcelas en la clase 21, 8 parcelas en la clase 18, 13 parcelas en la clase 15 y una parcela en la clase 12. Debido a que las clases extremas presentan una única parcela, la clase 24 se agrupó con la 21 y la clase 12 con la 15, obteniéndose finalmente la siguiente distribución: 13 parcelas en la clase 21; 8 parcelas en la clase 18 y 14 parcelas en la clase 15 (De los Bueis, 2012).

Tabla 1. Media, desviación típica, valor mínimo y máximo que presentan las principales variables dasométricas en las parcelas de estudio.

Variable	Media	Desviación típica	Mínimo	Máximo
Edad (años)	39,8	7,4	28,0	54,0
Densidad (pies/ha)	1102,9	423,0	400,0	2083,3
Ho (m)	14,5	3,6	8,5	22,8
Hm (m)	13,6	3,7	7,3	22,9
Dg (cm)	20,3	4,1	13,9	34,7
G (m2/ha)	33,1	8,2	16,8	53,6
IS (m)	18,0	2,8	12,6	22,6

Nota: Ho: altura dominante, Hm: altura media, Dg: diámetro medio cuadrático, G: área basimétrica; IS: índice de sitio.

2-1-2 Topografía y Clima

Las parcelas estudiadas se encuentran a altitudes comprendidas entre los 926 y los 1180 msnm. La tabla 2 muestra las características topográficas de las parcelas objeto de estudio.

Tabla 2: Datos topográficos de las parcelas de estudio (de los Bueis, 2012). Media, desviación típica, valor mínimo y máximo que presentan los parámetros topográficos analizados en las parcelas de estudio.

Parámetros Topográficos	Media	Desviación típica	Mínimo	Máximo
Altitud (m)	1067,4	72,0	926,0	1180,0
Latitud (°)	42,7	0,1	42,6	42,8
Pendiente (%)	2,3	3,2	0,0	12,0

Los datos climáticos del área de estudio se han obtenido a partir del Atlas Climático Digital de la Península Ibérica (Ninyerola *et al.*, 2005).

Las masas de *Pinus sylvestris* L. para su mejor crecimiento, requieren de una precipitación mínima de 100 mm en el periodo estival y una precipitación media-anual entre 600 y 1200 mm.

La zona de estudio cuenta con una pluviometría media anual de unos 730 mm, con valores que oscilan entre los 600 mm y los 950 mm, siendo la precipitación estival media de la zona de 108 mm. Su temperatura media-anual es de unos 9,5 °C, con valores que oscilan entre los 8,8 °C y los 10,5 °C.

Según los índices de Lang (Lang, 1915) y De Martonne (1926) el clima de la zona de estudio se clasifica como húmedo.

2-1-3 Diseño experimental y toma de muestras

El estudio se llevó a cabo a partir de 35 parcelas rectangulares de 20 x 30 m que pertenecen a la red de parcelas del Instituto Universitario de Investigación en Gestión Forestal Sostenible (Universidad de Valladolid-INIA).

En cada parcela, se ha considerado cuatro puntos de muestreo ubicados sucesivamente a 5 m al N, S, E y O del centro de la parcela. En cada punto se ha tomado una muestra de los 10 primeros centímetros de suelo mineral. Las muestras de los cuatro puntos fueron posteriormente mezcladas para obtener una muestra única del suelo mineral para cada parcela. El muestreo del suelo mineral se ha limitado a los 10 primeros cm de acuerdo con la metodología propuesta por Jokela *et al.* (1998).

Los parámetros físicos, químicos y bioquímicos fueron determinados en las muestras de suelo mineral.

2-1-4 Preparación de las muestras de suelo para su análisis en el laboratorio

El suelo recogido en cada parcela se introdujo en bolsas de plástico identificadas según su origen. Las muestras tomadas del campo se trasladaron al laboratorio donde fueron secadas al aire durante unos días. Se tamizaron con un tamiz de 2mm y se determinó el porcentaje de elementos gruesos. La tierra fina se introdujo en bolsas de plástico bien identificadas para su posterior análisis físico, químico y bioquímico.

2-2 Métodos analíticos

2-2-1 Fraccionamiento del fósforo edáfico

Para la determinación de las distintas formas de P en las muestras de suelo, se aplicó el método de fraccionamiento secuencial del fósforo edáfico de Hedley *et al.* (1982), modificado por Tiessen y Moir (1993). La figura 3 presenta las diferentes fracciones determinadas mediante este método.

La filosofía del método pretende desglosar del P total que se encuentra en el suelo en una serie de fracciones o reservorios. La diferenciación entre estas fracciones la establece el grado de disponibilidad para ser absorbidas por las raíces de las plantas, de tal forma que la primera fracción extraída corresponde al reservorio más ligado a los componentes del suelo y la última al reservorio más estable y que con más fuerza está retenido por los componentes edáficos y que, por tanto, con más dificultad podrá ser tomado por las raíces.

En el presente estudio se han diferenciado 6 fracciones del reservorio total de P extraído del suelo. Para ello se ha puesto en contacto a las muestras edáficas con distintos extractantes, que de forma secuencial extraerán el P del suelo.

Los extractantes empleados de forma sucesiva usando en cada caso un volumen de 30 ml fueron: membranas de intercambio aniónico (MIA); NaHCO_3 0,5 M ajustado a pH 8,5; NaOH 0,1M; HCl 0,1M y HCl concentrado al 37% y HClO_4 concentrado en caliente (230°C). La segunda y tercera fracción, fracciones alcalinas, permiten además una posterior separación entre el P inorgánico (P_i) y el orgánico (P_o). El P_i en esos dos extractos se determinó después de la precipitación de la materia orgánica por acidificación, con H_2SO_4 concentrado, de sendas alícuotas hasta llegar a pH 1,5. La determinación del P orgánico extraído con NaHCO_3 0,5M y con NaOH 0,1M se calculó por diferencia entre el P total y el P inorgánico extraído para cada uno de esos extractantes. Para la determinación del P total extraído con NaHCO_3 0,5 M y con NaOH 0,1M se ha seguido el método de digestión con persulfato potásico en medio ácido

(Greenberg, 1980), para lo cual se tomó en cada uno de los dos casos una alícuota de los extractos y se les añadió 5 ml de H_2SO_4 0,5 M y 0,5 g de persulfato potásico en un tubo de ensayo con tapón hermético, se cerraron y se homogeneizaron. Se llevaron los tubos a una autoclave a $120^\circ C$ durante 1 hora. De esta manera se consiguió oxidar toda la materia orgánica del extracto y concretamente el P orgánico del mismo se transformó en formas inorgánicas.

Para la determinación de la concentración de P en cada extracto, se ha utilizado el procedimiento colorimétrico descrito por Murphy y Riley (1962) modificado por Watanabe y Olsen (1965). Ese procedimiento se basa en la formación de un complejo coloreado al reducir con ácido ascórbico el compuesto formado por el molibdato amónico y el ión fosfato presente en el extracto. Para un desarrollo adecuado del color, es necesario que para cada fracción, se ajuste del pH en torno a 5,5, a partir de una gota del indicador paranitrofenol y la cantidad de base y de ácido necesario para que se produzcan los virajes.

El P total extraído (P_T) se ha calculado por la sumatoria del P obtenido en todas las extracciones del fraccionamiento, mientras que el P inorgánico total (P_{IT}) y el P orgánico total (P_{OT}) se obtuvieron respectivamente a partir de la sumatoria del fósforo inorgánico (P_i) y de la sumatoria del P orgánico (P_o) obtenido en todas las extracciones del fraccionamiento.

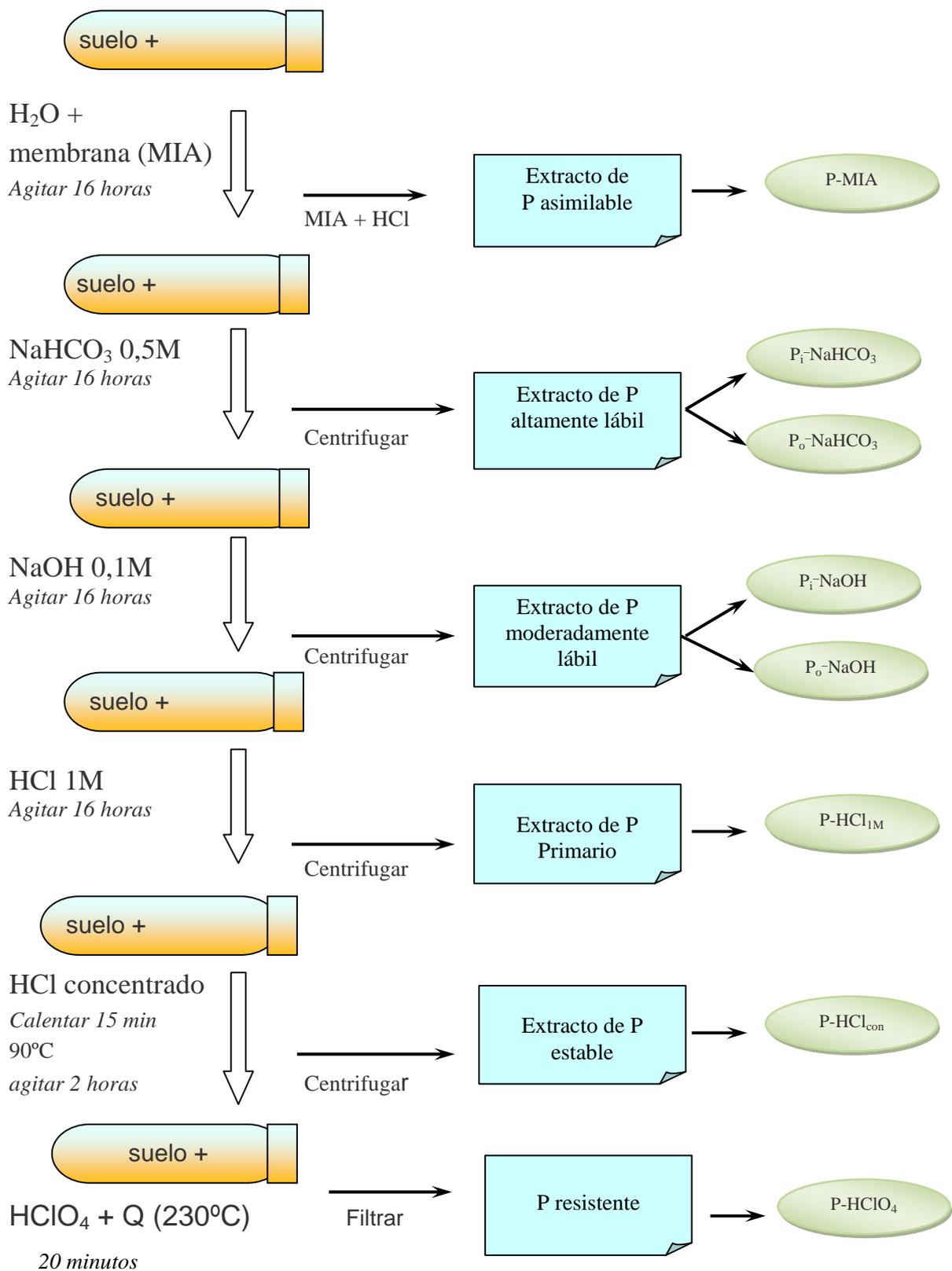


Figura 3: Esquema del fraccionamiento secuencial de P edáfico utilizado (Tiessen y Moir, 1993)

2-2-2 Análisis de los parámetros físicos, químicos y bioquímicos de los suelos

Los análisis de los parámetros bioquímicos, físicos y químicos fueron realizados por De los Bueis (2012) y en el presente trabajo se utilizarán para el posterior estudio de correlaciones con las fracciones de P edáfico obtenidas. A continuación se van a indicar las características más relevantes de los suelos utilizados como material. Las metodologías seguidas para la determinación de los parámetros edáficos que se muestran a continuación pueden encontrarse en De los Bueis (2012).

Los suelos estudiados presentan texturas que van desde francas, franco-arenosas a franco arcillosas (Tabla 3). Los parámetros químicos y bioquímicos obtenidos están ilustrados en las tablas 4 y 5.

Tabla 3: Media, desviación típica, valor mínimo y máximo que presentan los parámetros edáficos físicos analizados en las parcelas de estudio.

Parámetros Físicos	Media	Desviación típica	Mínimo	Máximo
Finos (<2mm) (%)	72,9	16,3	43,6	99,6
Gruesos (>2mm) (%)	27,1	16,3	0,4	56,4
Arcilla (%)	15,9	3,3	9,0	26,4
ArenaISSS (%)	70,3	7,4	55,1	83,7
ArenaUSDA (%)	58,8	10,7	40,2	75,5
LimoISSS (%)	13,8	5,7	6,1	28,0
LimoUSDA (%)	25,4	9,5	13,4	45,7

Nota: Arena/Limo ISSS: arena/limo según sistema International Society of Soil Science; Arena/Limo USDA: arena/limo según sistema United States Department of Agriculture).

El pH de los suelos oscila entre 3,7 y 5,6, son por lo tanto suelos ácidos, en los que sólo un 7,5 % de las posiciones de cambio están ocupadas por cationes básicos. Esa acidez de los suelos tiene efectos directos sobre la actividad microbiana y la disponibilidad de los nutrientes.

Los contenidos en Ca de los suelos estudiados se encuentran en el rango de valores observados habitualmente en los suelos forestales y que varían entre los 50 y 1000 mg kg⁻¹ (Pritchett, 1986). Éste suele ser el catión más abundante en los suelos forestales, a excepción de los suelos muy ácidos donde pasa a serlo el Al.

Las concentraciones de Mg suelen ser de entre el 20 y el 50% de las del Ca en la mayoría de los suelos (Fisher y Binkley, 1999) y en los suelos estudiados están en ese rango.

Tabla 4: Media, desviación típica, valor mínimo y máximo que presentan los parámetros edáficos químicos analizados en las parcelas de estudio.

Parámetros Químicos	Media	Desviación típica	Mínimo	Máximo
CCC (cmol(+)-kg-1)	18,8	3,1	11,8	24,2
pH	4,6	0,5	3,7	5,6
Ca (cmol(+)-kg-1)	0,9	0,7	0,2	2,9
Mg (cmol(+)-kg-1)	0,1	0,1	0,0	0,5
K (cmol(+)-kg-1)	0,2	0,1	0,1	0,6
Fe _A (mg-g-1)	4	1,5	1,7	7,9
Fe _M (mg-g-1)	4,6	1,7	1,8	7,7
Al _E (mg-g-1)	0,6	0,4	0,0	1,3
Mn _A (mg-g-1)	0,8	1,4	0,0	6,6
Al _A (mg-g-1)	6,6	2,5	2,5	11,6
Al _I (mg-g-1)	2,4	2,0	0,0	8,8
Sat (%)	7,5	5,4	2,4	21,1

Nota: CCC: capacidad de cambio catiónico; Fe_A: formas amorfas de Fe; Al_A: formas amorfas de Al; Al_E: Al intercambiable; Al_I: Al inorgánico; Fe_M: formas de Fe complejadas con la materia orgánica; Mn_A: formas amorfas de Mn; Sat: saturación de bases.

Los suelos estudiados poseen concentraciones de C total (C_T) que oscilan entre el 2,4 % y el 5,3 %, el C fácilmente oxidable en estos suelos es de un 2,2 % de media, lo que corresponde a un 56% del C_T edáfico. La relación C_T/N_T de estos suelos es alta, cercana a 30, valor bastante normal en suelos forestales bajo masas de coníferas, lo cual implica una materia orgánica recalcitrante y de no muy alta calidad y de mineralización lenta (Cobertera, 1993).

Tabla 5: Media, desviación típica, valor mínimo y máximo que presentan los parámetros edáficos bioquímicos analizados en las parcelas de estudio.

Parámetros Bioquímicos	Media	Desviación típica	Mínimo	Máximo
CFO (%)	2,2	0,5	1,3	3,4
CFO/C _T	0,6	0,1	0,4	0,7
C _{mic} (mg·kg-1)	115,1	47,8	45,5	232,9
C _{min} (mg·kg-1·semana-1)	56,7	21,4	22,0	112,1
C _T (%)	3,9	0,78	2,4	5,3
C _T /N _T	29,6	5,0	19,2	41,3
N _{min} (mg·kg-1·semana-1)	7,6	5,8	0,3	26,0
N _T (%)	0,1	0,0	0,0	0,2
qCO ₂ (C _{min} /C _{mic}) (g·semana-1·g ⁻¹)	0,6	0,2	0,1	1,2
P _{mic} (mg·kg-1)	11,1	5,7	4,6	32,2

Nota: C_{mic}: C microbiano; N_{mic}: N microbiano; C_T: C total; C_{min}: C mineralizable; N_{min}: N mineralizable; P_{mic}: P microbiano

El estudio de los parámetros relacionados con la actividad y biomasa de los microorganismos del suelo es fundamental para conocer la actividad metabólica del suelo responsable de procesos capitales como la mineralización y humificación de la materia orgánica (García *et al.*, 2003) y por lo tanto también de las transformaciones entre las formas orgánicas y las inorgánicas del P edáfico.

2-2-3 Análisis estadísticos

Para el estudio de las relaciones existentes entre las diferentes formas del P edáfico y los valores del IS para el *Pinus Sylvestris* L., se ha aplicado un análisis discriminante donde los tres niveles de IS (21,18 y 15) constituyen el factor de clasificación de las variables correspondientes a las distintas formas del P edáfico. La finalidad de este procedimiento es la búsqueda de una serie de funciones discriminantes que puedan ayudar a predecir el IS de nuevas parcelas a partir de los valores hallados para las formas del P edáfico en esas parcelas. Para ese fin, se ha utilizado los datos de las formas del P de los suelos de las 35 parcelas para desarrollar un modelo capaz de diferenciar los 3 niveles de IS. El análisis discriminante se fundamenta en la clasificación de cada individuo (cada parcela caracterizada por las variables "formas de P edáfico") en un grupo de característica conocida (cada nivel de IS).

Se ha utilizado un algoritmo de selección paso a paso, para determinar de todas las formas de P edáfico, las formas que predicen significativamente el IS para un nivel de 5%.

Los valores de IS fueron asignados en función de la distancia que existe entre esos valores y los centroides de los diferentes grupos. Cada individuo ha sido asignado al grupo con el cual mantiene la menor distancia. Finalmente se ha realizado una validación cruzada del modelo a partir de los datos de las 35 muestras que fueron utilizados para el ajuste del modelo.

Por otro lado, se ha planteado conocer las funciones capaces de predecir las diferentes formas del P edáfico en el páramo ácido de Castilla y León partiendo de los parámetros físicos, químicos y bioquímicos que caracterizan a estos suelos. Se ha realizado una matriz de correlación 2 a 2 entre las formas del P edáfico y los parámetros edáficos. Una vez detectada las relaciones significativas existentes entre cada forma del P edáfico y los diferentes parámetros edáficos, se ha buscado una serie de funciones de correlación entre cada fracción del P edáfico y los parámetros edáficos con los cuales las correlaciones sean significativas. Mediante el ajuste de modelos de

regresión, se ha podido elegir el mejor modelo de todas las combinaciones posibles entre las diferentes formas de P edáfico y los parámetros edáficos. En cada caso, se ha seleccionado como mejor modelo aquel cuyo valor del estadístico Cp de Mallows es el más pequeño y cuyo R-Cuadrado ajustado es el mayor. Partiendo del mejor modelo seleccionado para cada fracción del fósforo edáfico, se ha realizado una regresión múltiple obteniendo una ecuación de regresión cuando las correlaciones son estadísticamente significativas para un nivel de significación de 5%.

Para los diferentes análisis estadísticos, se ha utilizado el paquete estadístico STATGRAPHICS Plus 5.1.

3- RESULTADOS

3-1 Fraccionamiento del fósforo edáfico

Siguiendo la metodología del fraccionamiento secuencial del P edáfico de Hedley et al. (1982), modificado por Tiessen y Moir (1993), se ha diferenciado de manera sucesiva 8 fracciones que se muestran en la Tabla 6.

El P_{0T} obtenido representa 70% del P_T en las parcelas de clase de calidad 15 y en las parcelas de clase de calidad 18 mientras que el P_{0T} representa 65% del P_T en las parcelas de clase de calidad 21.

Las fracciones P-MIA y P-HCl_{1M} muestran valores más bajos (inferiores a 1% del P_T) para las tres clases de calidad de sitio.

La fracción P-HCl_{conc} correspondiente a la clase de calidad 15 muestra valor máximo que representa 70% del P_T

Tabla 6: Concentraciones medias, desviación típica y valores mínimos y máximos de las formas de P en los suelos bajo *Pinus sylvestris* L. con distintas clases de calidad de estación.

Clases de índice de sitio	Formas del P [mg P kg ⁻¹]	MEDIA	Desviación típica	Mínimo	Máximo
15	P-MIA	1,4	0,7	0,4	2,5
	P _i -NaHCO ₃	8,4	2,8	5,1	12,8
	P _o -NaHCO ₃	10,2	5,1	3,8	23,0
	P _i -NaOH	22,8	11,4	15,4	60,7
	P _o -NaOH	32,4	20,6	4,0	69,5
	P-HCl _{1M}	3,1	3,2	0,6	11,7
	P-HCl _{conc}	84,7	119,7	28,5	495,6
	P-HClO ₄	11,5	8,4	2,6	35,8
	P _{iT}	131,9	13,7	68,2	611,5
	P _{oT}	42,6	24,1	7,8	92,5
P _T	174,5	158,2	76	704	
18	P-MIA	3,4	0,87	2,3	4,9
	P _i -NaHCO ₃	7,5	2,6	5,1	12,6
	P _o -NaHCO ₃	10,5	3,51	5,7	15,2
	P _i -NaOH	22,1	5,04	17	31,1
	P _o -NaOH	30,8	20,4	1,2	65,4
	P-HCl _{1M}	1,6	0,9	0,5	3,5
	P-HCl _{conc}	59,2	27,8	13,8	88,2
	P-HClO ₄	8	3,7	3,9	15
	P _{iT}	102,0	7	55,1	132,4
	P _{oT}	41,4	23,5	6,9	80,6
P _T	143,4	55,1	62	213	
21	P-MIA	6,1	1,92	2,4	8,6
	P _i -NaHCO ₃	12,5	5,7	5,6	24,2
	P _o -NaHCO ₃	14,5	7,2	4	27,2
	P _i -NaOH	31,2	12	16,1	53,6
	P _o -NaOH	49,3	21,1	6,7	87,3
	P-HCl _{1M}	5,1	3,5	1,6	12,8
	P-HCl _{conc}	57,1	22,3	17	101,5
	P-HClO ₄	11	3	6	19,1
	P _{iT}	123,2	20	67,3	184,4
	P _{oT}	63,9	25,7	12,7	100,6
P _T	187,1	58	80	285	

Nota: P-MIA: P extraído con membrana de intercambio aniónico; P_i-NaHCO₃: P inorgánico extraído con NaHCO₃; P_o-NaHCO₃: P orgánico extraído con NaHCO₃; P_i-NaOH: P inorgánico extraído con NaOH; P_o-NaOH: P orgánico extraído con NaOH; P-HCl_{1M}: P extraído con HCl_{1M}; P-HCl_{conc}: P extraído con HCl concentrado; P-HClO₄: P extraído con ácido perclórico; P_{iT}: P inorgánico total; P_{oT}: P orgánico total; P_T: P total extraído.

3-2 Análisis discriminante

El análisis discriminante ha permitido desarrollar funciones que pueden ayudar a predecir el valor del IS de otras parcelas conociendo los valores de las diferentes formas del P edáfico. Se ha analizado los valores de las 8 formas de P edáfico obtenidas en cada una de las 35 muestras y se ha logrado con un 95% de confianza diferenciar entre los 3 niveles de IS. El análisis discriminante ha permitido desarrollar una serie de funciones discriminantes mediante el algoritmo de selección paso a paso. Dos variables (P-MIA y P-HCl_{1M}) fueron predictoras significativas del IS para un nivel de significación de 5%. La magnitud relativa de los coeficientes en la ecuación determina cómo se están utilizando las variables independientes para diferenciar entre los grupos.

Se ha obtenido una función de clasificación para cada uno de los 3 niveles de IS, por lo que a partir de esas funciones se puede predecir a que nivel de IS pertenecen las nuevas observaciones (nuevas parcelas). La tabla 7 muestra los coeficientes de las tres funciones de clasificación obtenidas para cada nivel de IS.

Tabla 7: Coeficientes de las funciones de clasificación obtenidas para cada uno de los tres índices de sitio (15,18 y 21)

	15	18	21
P-HCl_{1M}	0,206668	-0,371575	-0,349189
P-MIA	0,541825	2,35333	3,89874
CONSTANTE	-1,7938	-4,73156	-12,1282

Los datos de las 35 parcelas fueron utilizados tanto para el ajuste y la valoración interna del modelo de clasificación mediante la validación cruzada.

Como se puede observar en la tabla 8; de las 35 muestras utilizadas, 29 de ellas (83%) fueron correctamente clasificadas; las parcelas de IS 15 son clasificadas correctamente a 92,9% y los casos mal clasificados son asignados a la clase siguiente; las parcelas de IS 18 son clasificadas correctamente a 87,5% y los casos mal clasificados son asignados a la clase 21 mientras que las parcelas de IS 21 son clasificadas correctamente a 69,2% y los casos mal clasificados son asignados a la clase 18.

Tabla 8: Valoración cruzada (interna) del modelo discriminante.

Índice de Sitio	Grupo-Tamaño	Clase de calidad pronosticada		
		15	18	21
15	14	13 (92,86%)	1 (7,14%)	0 (00%)
18	8	0 (0,00%)	7 (87,50%)	1 (12,5%)
21	13	0 (0,00%)	4 (30,77%)	9 (69,23%)

Nota: 83% de las variables fueron bien clasificadas

3-3 Correlaciones entre las formas de P y los parámetros edáficos

Las matrices de correlación de Pearson (Tabla 9) entre pares de variables (Formas del P y parámetros edáficos) ponen en evidencia con un nivel de significación de 5% la existencia de relaciones entre formas del P edáfico y los parámetros edáficos de esos suelos. En la tabla 9 sólo se muestran aquellos parámetros edáficos que mostraron al menos una correlación significativa con alguna de las formas del P estudiadas. Los valores en letra negrita corresponden a las correlaciones significativas.

Tabla 9: Matriz de correlación entre Formas de P edáfico y Parámetros edáficos

a) Matriz: Formas del fósforo edáfico frente a parámetros físicos

	Arcilla	Arena _{ISSS}	Arena _{USDA}	Limo _{ISSS}	Limo _{USDA}
P-MIA	0,02	-0,25	-0,70	0,26	0,07
P_i-NaHCO₃	0,04	-0,18	-0,11	0,19	0,11
P_o-NaHCO₃	0,27	-0,25	-0,08	0,20	0,04
P_i-NaOH	0,05	-0,15	-0,01	0,15	0,01
P_o-NaOH	0,49	-0,71	-0,59	0,66	0,54
P-HCl_{1M}	-0,10	-0,31	-0,30	0,36	0,33
P-HCl_{conc}	006	-0,40	-0,41	0,42	0,42
P-HClO₄	0,17	-0,70	-0,71	0,72	0,71

Nota: ISSS: sistema International Society of Soil Science ; USDA: sistema United States Department of Agriculture

b) Matriz: Formas del P edáfico frente a parámetros químicos

	CCC	Al _A	Al _E	Al _I	Ca	Fe _A	Fe _M	K	Mg	pH	Sat
P-MIA	0,15	0,08	-0,35	0,09	0,31	0,29	-0,02	0,30	0,29	0,25	0,21
P_i-NaHCO₃	0,13	0,16	-0,13	0,16	0,09	0,29	0,15	0,08	0,09	0,15	0,07
P_o-NaHCO₃	0,50	0,04	0,01	0,02	0,04	0,20	0,45	0,28	-0,006	0,002	-0,08
P_i-NaOH	0,40	0,11	-0,27	0,11	0,07	0,20	0,19	0,43	0,04	0,07	-0,02
P_o-NaOH	0,37	-0,01	0,03	-0,02	0,29	0,16	0,32	0,51	0,31	0,42	0,21
P-HCl_{1M}	-0,05	-0,22	-0,39	-0,22	0,45	-0,01	-0,29	0,65	0,44	0,52	0,44
P-HCl_{conc}	0,09	-0,24	-0,10	-0,25	0,31	-0,26	-0,15	0,77	0,38	0,39	0,28
P-HClO₄	-0,2	-0,33	-0,07	-0,34	0,55	-0,20	-0,20	0,81	0,61	0,67	0,54

Nota: CCC: capacidad de cambio catiónico; Fe_A: formas amorfas de Fe; Al_A: formas amorfas de Al; Al_E: Al intercambiable; Al_I: Al inorgánico; Fe_M: formas de Fe complejadas con la materia orgánica; Sat: saturación de bases.

c) Matriz: Formas de P edáfico-Parámetros bioquímicos

	CFO	CFO/C _T	C _{mic}	C _{min}	C _T	C _T /N _T	N _{min}	N _T	qCO ₂
P-MIA	0,16	0,21	0,55	-0,02	0,02	-0,42	0,39	0,24	-0,52
P_i-NaHCO₃	0,07	0,21	0,34	-0,18	-0,10	-0,39	0,52	0,02	-0,35
P_o-NaHCO₃	0,44	0,38	0,27	-0,24	0,29	-0,28	0,03	0,49	-0,52
P_i-NaOH	0,28	0,25	0,44	-0,31	0,15	-0,33	0,20	0,39	-0,61
P_o-NaOH	0,38	0,56	0,55	-0,07	0,13	-0,68	0,43	0,49	-0,48
P-HCl_{1M}	-0,11	0,01	0,49	0,15	-0,15	-0,51	0,03	0,18	-0,40
P-HCl_{conc}	0,06	0,19	0,30	0,11	0,01	-0,43	-0,02	0,30	-0,16
P-HClO₄	-0,82	0,19	0,40	0,25	-0,09	-0,60	0,11	0,35	-0,16

Nota: AC: acidez de cambio; CFO: carbono fácilmente oxidable; C_T: carbono total; N_T: nitrógeno total; C_{mic}: C microbiano; C_{min}: C mineralizable; N_{min}: N mineralizable; qCO₂: eficiencia metabólica.

Para determinar las correlaciones entre cada fracción del P edáfico y los parámetros edáficos, se han ajustado modelos de regresión múltiple utilizando el estadístico Cp de Mallows y el R-Cuadrado para seleccionar el mejor modelo, la tabla 10 muestra el mejor modelo obtenido para cada fracción del P edáfico.

Tabla 10: Selección del mejor modelo de regresión para cada fracción del P edáfico.

Fracción del P	MSE	R-Cuadrado (%)	R-Cuadrado Ajustado(%)	Cp	Parámetros edáficos
P-MIA	3,98	40,49	34,73	2,51	C_{mic} , C_T/N_T , qCO_2
$P_i-NaHCO_3$	15,53	33,42	26,97	3,23	C_T/N_T , N_{min} , qCO_2
$P_o-NaHCO_3$	21,80	43,68	38,23	1,15	N_T , qCO_2 , Fe_M
P_i-NaOH	59,79	57,51	51,85	1,42	C_{min} , qCO_2 , CCC, K
P_o-NaOH	109,64	80,54	77,19	3,03	CFO, C_T/N_T , qCO_2 , $Arena_{USDA}$, $Limo_{USDA}$
P-HCl _{1M}	4,65	62,46	55,99	2,81	qCO_2 , $Limo_{ISSS}$, K, Mg, pH
P-HCl _{conc}	1864,76	72,52	68,86	3,02	$Arena_{USDA}$, $Limo_{ISSS}$, K, Mg
P-HClO ₄	9,53	76,28	73,12	-1,40	$Arena_{USDA}$, Al _A , Al _I , K

Nota: MSE: Erro cuadrático medio; Cp: Estadístico de Mallows.

Se ha realizado un análisis de regresión con dichas variables, se ha reducido el modelo proporcionado por el Cp utilizando el método BACK WARD-STEPWISE. La tabla 11 muestra las ecuaciones de regresión obtenidas.

Tabla 11: Las ecuaciones de regresión para cada fracción del P edáfico

Fracción del P edáfico	Ecuaciones de regresión	R-Cuadrado	P-Valor asociado
P-MIA	$P-MIA = 10,86 - 0,16 * C_T/N_T - 8,53 * qCO_2$	0,38	0,0005*
$P_i-NaHCO_3$	$P_i-NaHCO_3 = 6,59 + 0,41 * N_{min}$	0,27	0,0013*
$P_o-NaHCO_3$	$P_o-NaHCO_3 = 11,28 + 44,86 * N_T - 17,73 * qCO_2$	0,38	0,0005*
P_i-NaOH	$P_i-NaOH = 30,18 - 46,23 * qCO_2 + 0,12 * K$	0,47	0,0000*
P_o-NaOH	$P_o-NaOH = 410,96 + 15,71 * CFO - 3,04 * C_T/N_T - 3,69 * Arena_{USDA} - 3,55 * Limo_{USDA}$	0,78	0,0000*
P-HCl _{1M}	$P-HCl_{1M} = -8,77 - 9,18 * qCO_2 - 0,20 * Limo_{ISSS} + 0,06 * K + 3,03 * pH$	0,59	0,0000*
P-HCl _{conc}	$P-HCl_{conc} = -117,86 + 3,04 * K - 1,17 * Mg$	0,70	0,0000*
P-HClO ₄	$P-HClO_4 = 11,78 - 0,17 * Arena_{USDA} + 0,12 * K$	0,72	0,0000*

Nota: * correlación significativa a nivel 0,05.

Se ha obtenido correlaciones significativas en todos los casos para un nivel de significación de 5%. Los valores de R-cuadrado de las correlaciones detectadas entre las fracciones P-MIA, P_i-NaHCO₃, P_o-NaHCO₃, P_i-NaOH y los parámetros edáficos oscilan entre 0,3 y 0,5 mientras que los valores de R-cuadrado de las correlaciones detectadas entre las fracciones P_o-NaOH, P-HCl_{1M}, P-HClconc, P-HClO₄ y los parámetros edáficos oscilan entre 0,5 y 0,8.

4- DISCUSIÓN

La dinámica del P en las masas forestales es una relación entre la capacidad del árbol para extraer el P del suelo y el ciclo del P entre los componentes de los ecosistemas, y la capacidad del suelo para suministrar P en una forma biológicamente disponible (Richter *et al*, 2006).

La fracción del P inorgánico extraído con la membrana de intercambio aniónico representada por P-MIA se corresponde con la fracción de este elemento biológicamente disponible para las plantas (Sibbesen, 1978). Los valores obtenidos de esa fracción de P edáfico para los suelos estudiados oscilan entre 0,4 y 2,5 mg P kg⁻¹ para las parcelas de IS 15; entre 2,3 y 4,9 mg P kg⁻¹ para las parcelas de IS 18 y entre 2,4 y 8,6 mg P kg⁻¹ para las parcelas de IS 21. Esos resultados obtenidos son normales en los suelos forestales ácidos donde el contenido de P disponible para las plantas es limitada y coinciden con el valor de 5 mg P kg⁻¹ obtenido por Turrión *et al.* (2000) en suelos forestales ácidos de la Sierra de Gata (Sistema Central Español). Se ha observado un aumento del valor del contenido de P-MIA de las parcelas de índice de sitio 15 a las parcelas de IS superior, lo que implica un mayor contenido de P inmediatamente disponible para los pinos de los rodales IS alto justificando el mayor crecimiento vegetal obtenidos en los mismos. Se ha obtenido una ecuación de regresión altamente significativa entre P-MIA y los parámetros edáficos C_T/N_T y qCO₂, con signos positivo y negativo, respectivamente. Esta regresión pone de manifiesto por un lado el efecto de la calidad de la materia orgánica edáfica, de tal manera que a mayores valores de la relación C_T/N_T tenemos una materia orgánica de peor calidad (Cobertera, 1993) y por otro lado el papel que juegan los microorganismos y más concretamente la eficiencia metabólica en la disponibilidad del P edáfico en los suelos estudiados. Valores bajos de qCO₂ implican una mayor eficiencia en la actividad de los microorganismos (Anderson y Domsch, 1993).

Las fracciones $P_i\text{-NaHCO}_3$, y $P_o\text{-NaHCO}_3$ representan las formas más lábiles o rápidamente reciclables y susceptibles de ser utilizadas por las plantas a corto plazo (Qualls y Richardson, 1995). Los valores obtenidos de esas fracciones de P para los tres niveles de IS (15,18 y 21) fueron similares a los obtenidos por otros investigadores en suelos ácidos bajo masas forestales y oscilan entre 5,1 a 24,2 mg P kg⁻¹ para el $P_i\text{-NaHCO}_3$ y entre 3,8 a 27,2 mg P kg⁻¹ para el $P_o\text{-NaHCO}_3$. Esos resultados coinciden con lo obtenido por Turrión *et al.* (2000) en suelos anteriormente citados y similares a los encontrados por Slazak *et al.* (2010) en rodales mixtos pinos-robles en el Noreste de Alemania. Para ambas fracciones, los mayores valores fueron encontrados en las parcelas de IS 21 mientras que los valores más bajo fueron encontrados en las parcelas de IS 15. El contenido de esas fracciones siguen una distribución similar a la fracciones del P inmediatamente disponible para las plantas (P-MIA). Una alta actividad microbiana así como una buena eficiencia metabólica, se manifestará en un menor valor de la $q\text{CO}_2$ en esos suelos y convertirá esa fracción en forma lábil y favoreciendo una mayor disponibilidad de P y por lo tanto valores más altos de las formas lábiles (Tablas 10 y 11).

La fracción inorgánica del P extraído con la solución de NaOH ($P_i\text{-NaOH}$) contiene formas inorgánicas asociadas a los hidróxidos de Fe y Al y adsorbidas a la superficie de las arcillas (Frossard *et al.*, 1989). La fracción $P_o\text{-NaOH}$ representa las formas orgánicas menos lábiles con baja posibilidad para ser convertidas por los microorganismos en formas biológicamente activas. Los contenidos de esas dos fracciones de P edáfico para los tres niveles de IS (15, 18 y 21) se encuentran dentro de los valores obtenidos por otros autores para suelos ácidos bajo masas forestales, concretamente se encuentran en el rango de 15,4 a 60,7 mg P kg⁻¹ para el $P_i\text{-NaOH}$ y en el rango de 1,2 a 87,3 mg P kg⁻¹ para el $P_o\text{-NaOH}$. Esos resultados coinciden con los valores de 11,4 y 51,1 mg P kg⁻¹ para las formas $P_i\text{-NaOH}$ y $P_o\text{-NaOH}$, respectivamente obtenidos por Turrión *et al.* (2007) en suelos forestales del Norte de Palencia. Los valores mayores de $P_i\text{-NaOH}$ fueron observados en parcelas de IS bajo (IS15) mientras que los valores mayores de $P_o\text{-NaOH}$ fueron encontrados en las parcelas de IS más alto (IS 21). En el caso del $P_o\text{-NaOH}$, se ha obtenido una regresión altamente significativa con el carbono fácilmente oxidable (signo positivo), con la relación C_T/N_T (signo negativo) y con los contenidos de arena y limo (ambos negativos). El primero de los términos de esa regresión representa la cantidad de materia orgánica edáfica, el segundo la calidad de esa materia orgánica de manera que valores mayores de este cociente implican peor

calidad y las correlaciones negativas observadas con los contenidos de arena y Limo indican la relación entre esta fracción del P y la arcilla (a menores % de arena y limo mayores de arcilla).

El HCl 1M extrae principalmente el P inorgánico asociado al Ca y una pequeña proporción del P_i ocluido, pero nada o muy poco P orgánico (Williams et al., 1980, Blake et al., 2003). Su contenido en los suelos estudiados oscila entre 0,6 y 12,8 mg P kg⁻¹ y el valor medio coincide con los resultados obtenidos por (Khan y Joergensen, 2012) en suelos forestales de Alemania. Los valores más altos fueron observados en parcelas de IS 21 mientras que los valores más bajos fueron observados en parcelas de IS 15. Khan y Joergensen (2012) sugieren que esta fracción (P-HCl_{1M}) es la mayor fuente de P lábil. Se ha obtenido una ecuación de regresión altamente significativa entre P-HCl_{1M} y el pH. El P_i lábil (P-HCl_{1M}) está muy relacionado con el pH del suelo de tal manera que los suelos de pH básicos presentarían valores de P-HCl_{1M} altos.

La fracción P-HCl_{conc} es según Tiessen y Moir (1993) el P estable y se deriva de residuos orgánicos particulados que no son extraíbles con reactivos alcalinos, y sobre todo de formas de P inorgánico estables ligadas al Ca no extraíbles con el HCl diluido. Sin embargo, en los extractos de ácido clorhídrico concentrado estudiados no se diferenció la fracción orgánica de la inorgánica. El rango de los valores obtenidos oscila entre 13,8 y 495,6 mg P kg⁻¹. El valor máximo obtenido es superior a lo obtenido por (Khan y Joergensen, 2012) en suelos forestales de Alemania. El suelo en el que se ha encontrado ese valor alto de P-HCl_{conc} pertenece al IS 15. En esa parcela específicamente, se encontró el valor más alto del contenido de calcio intercambiable (839,9 mg kg⁻¹ cuando el valor medio de todas las parcelas es de 100 mg kg⁻¹), un valor alto del % de saturación de bases por encima del valor medio encontrado, además de un valor de pH alto. Ese alto contenido de P-HCl_{conc} observado podría justificarse por posible fertilización a las que ese suelo fue sometido antes de ser convertido en suelo forestal.

La fracción P-HClO₄ es la más recalcitrante y está constituida por minerales primarios (Syers et al., 1976), tiene formas orgánicas muy estables y no extraíbles con los extractantes alcalinos previamente utilizados en el fraccionamiento secuencial. Los valores hallados representan entre 5 y 25 % del P_T , observándose valores más altos en las parcelas de IS 15. Esa fracción del P edáfico no es disponible para las plantas por ser estable. Los valores existentes en estos suelos son similares a los encontrados por

Khan y Joergensen (2012) en suelos forestales de Alemania cuyos valores estaban entre el 14 y 42%

El P_{oT} respecto al P_T representó en las parcelas de IS 15 el 26%, en las parcelas de IS 18 el 31% y en las parcelas de índice de sitio 21 el 33%. Nuestros resultados no mostraron diferencias significativas en el $\%P_{oT}$, entre parcelas con distinto IS, por lo que en estos suelos el P orgánico no parece jugar un papel importante en la dinámica de este elemento, aspecto que se ve corroborado con la selección de parámetros que el modelo discriminante desarrollado ha utilizado.

En relación con el índice de sitio y las formas de fósforo edáfico, en el presente trabajo, se ha desarrollado un modelo que relaciona las fracciones de P edáfico con el IS. La bibliografía consultada muestra que hasta la fecha, se han desarrollado varios trabajos que relacionan la calidad de estación con parámetros del medio, siendo los aplicados a *Pinus sylvestris* L. (Bravo y Montero, 2001) menor número que los que se centran en especies más productivas como *Pinus pinaster* Ait.; (Sharma *et al.*, 2012).

El análisis discriminante ha permitido obtener las funciones capaces de predecir los 3 niveles de IS a partir de las fracciones del P edáfico. De las 8 fracciones de partida, las fracciones P-MIA y P-HCl_{1M} fueron las predictoras del IS.

Desde un punto de vista práctico, la determinación de la fracción P-MIA ofrece una relativa facilidad y es de gran interés ya que su valor informa sobre la disponibilidad inmediata de ese macronutriente para las plantas y por consiguiente es un factor de valoración de la calidad de un suelo a ofrecer una buena posibilidad de desarrollo para las plantas. El P-MIA representa la fracción del P_i biológicamente disponible para las plantas (Sibbesen, 1978). Para los 3 niveles de IS, el signo positivo del factor multiplicador del P-MIA justifica la importancia de esa fracción del P edáfico en la clasificación de las parcelas según los niveles de IS.

La fracción inorgánica P-HCl_{1M} es una de las principales fuentes de las fracciones lábiles del P (Khan y Joergensen, 2012). Esas dos fracciones que se corresponden por tanto a formas inmediatamente disponibles para las plantas y disponibles a medio plazo condicionan el crecimiento en los rodales de pinos (*Pinus sylvestris* L.) del páramo ácido Castellano-leonés. El aporte considerable en fósforo disponible para las plantas podría ser el justificativo de la selección de esas dos fracciones como predictoras de IS en los rodales de pinos. Resulta reseñable que las fracciones orgánicas del P no aparecen seleccionadas en el modelo como predictoras del IS en estos suelos. Este hecho

confirma lo indicado anteriormente en relación al pequeño papel que el P orgánico parece jugar en la dinámica del P en estos suelos.

De la validación cruzada, se ha observado que 83% de las parcelas fueron correctamente clasificadas según el IS al que pertenecen. No se ha observado ninguna parcela de IS inferior que esté asignada al IS superior. El porcentaje de aciertos obtenidos con este modelo es muy superior al presentado en otros trabajos similares en los que se tienen valores en torno al 60% de aciertos (Bravo y Montero, 2001).

5- CONCLUSIONES

El método de fraccionamiento secuencial de Tiessen y Moir (1993) ha permitido realizar un análisis del comportamiento de las diferentes fracciones del P edáfico en el páramo ácido de Castilla y León. Se ha observado una proporcionalidad directa entre los valores del índice de sitio y los contenidos de P edáfico disponible para las plantas a corto o a medio plazo. De este modo, a mayor valor IS, se ha observado mayores valores de las fracciones de P disponible para las plantas.

Las fracciones P-MIA y P-HCl_{1M} fueron los mejores predictoras del IS en las masas de *Pinus sylvestris* L. del páramo ácido de Castilla y León. El modelo de clasificación ajustado ha permitido una clasificación correcta de 29 parcelas (83%) sobre un total de 35. Las parcelas de IS 15 fueron las mejores clasificadas con un 93% de acierto.

Entre los parámetros edáficos y las fracciones del P edáfico, se han obtenido regresiones significativas que justifican el comportamiento de cada fracción del fósforo edáfico en cada caso. Las regresiones obtenidas fueron significativas para todas las formas del P edáfico; se ha observado valores de R-cuadrado inferiores a 0,50 para las correlaciones entre las fracciones lábiles del P edáfico (P-MIA, P_i-NaHCO₃, P_o-NaHCO₃, P_i-NaOH), y los parámetros edáficos, siendo estos principalmente parámetros relacionados con la cantidad y calidad de la materia orgánica y la eficiencia metabólica de los microorganismos edáficos. Por otro lado, los valores de R-cuadrado fueron superiores a 0,50 para las regresiones entre las fracciones más estables del P edáfico (P_o-NaOH, P-HCl_{1M}, P-HCl_{conc}, P-HClO₄) y los parámetros edáficos, estando estos principalmente relacionados con parámetros texturales y con el pH.

BIBLIOGRAFÍA

- ACHAT DL, MOREL C, BAKKER MR, AUGUSTO L, PELLERIN S, GALLET-BUDYNEK A, GONZALEZ M. 2010. Assessing turnover of microbial biomass phosphorus: combination of an isotopic dilution method with a mass balance model. *Soil Biol. Biochem.* 42, 2231–2240.
- ANDERSON T, DOMSCH KH. 1993. The metabolic quotient for CO₂ (qCO₂) as a specific activity parameter to assess the effects of environmental conditions, such as pH, on the microbial biomass of the soil. *Soil Biol. Biochem.* 36, 859-868.
- AYAGA G, TODD A, BROOKES PC. 2006. Enhanced biological cycling of phosphorus increases its availability to crops in low-input sub-Saharan farming systems. *Soil Biol. Biochem.* 38, 81–90.
- BLAKE L, JOHNSTON AE, POULTON PR, GOULDING KWT. 2003. Changes in soil phosphorus fractions following positive and negative phosphorus balances for long periods. *Plant and Soil* 254:245-261.
- BRAKE M, HÖPER H, JOERGENSEN RG. 1999. Land use-induced changes in activity and biomass of microorganisms in raised bog peats at different depths. *Soil Biol. Biochem.* 31, 1489–1497.
- BRAVO F, MONTERO G. 2001. Site index estimation in Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) stands in the High Ebro Basin (northern Spain) using soil attributes. *Forestry* 74, 395-406.
- COBERTERA E. 1993. *Edafología Aplicada*. Editorial CATEDRA, 326 pp.
- DE LOS BUEIS TM. 2012. Influencia de los parámetros edáficos, topográficos y climáticos sobre el índice de sitio de *Pinus sylvestris* L. en las masas de León y Palencia. Tesis de Master. Universidad de Valladolid.
- DE MARTONNE E. 1926. Une nouvelle fonction climatologique: L'Indice d'aridité. *La Météorologie* 2, 449–458.
- DEL-RÍO M, LÓPEZ-SENEPLEDA E, MONTERO G. 2006. Manual de gestión para masas procedentes de repoblación de *Pinus pinaster* Ait., *Pinus sylvestris* L. y *Pinus nigra* Arn. en Castilla y León. Serie Técnica. Consejería de Medio Ambiente. Junta de Castilla y León. 76 pp + anexos.
- DGCN. 2002. El Tercer Inventario Forestal Nacional. MMA-DGCN, Madrid, España.
- FISHER RF, BINKLEY D. 1999. *Ecology and management of forest soils*. Wiley. New York. 489 pp.
- FROSSARD EJ, STEWART WB, ARNAUD RJ. 1989. Distribution and mobility of phosphorus in grassland and forest soils of Saskatchewan. *Can. J. of Soil Sci.* 69, 401-416.
- GARCÍA C, GIL F, HERNÁNDEZ T, TRASAR C. (Eds.) 2003. *Técnicas de Análisis de Parámetros Bioquímicos en Suelos: Medida de Actividades Enzimáticas y Biomasa Microbiana*. Mundi-Prensa, Madrid. 371 pp.
- GREENBERG AE. 1980. *Standard methods for the examination of water and wastewater*. APHA/AWNA/WPCF, Washington.
- HEDLEY MJ., STEWART J.WB, CHAUHAN BS. 1982. Changes in inorganic and organic soil phosphorus fractions induced by cultivation practices and laboratory incubations. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 46: 970-976.
- HERRERO C, 2010. Cuantificación de Carbono en Pinares (*Pinus nigra* Arn., *Pinus pinaster* Ait., *Pinus sylvestris* L.) y Rebollares (*Quercus pyrenaica* Willd.) Mediterráneos. Tesis Doctoral.
- JOKELA EJ, WHITE EH, BERGLUND JV. 1988. Predicting Norway spruce growth from soil and topographic properties in New York. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 52 (3), 809-815.

- KHAN KS, JOERGENSEN R. 2012. Relationships between P fractions and the microbial biomass in soils under different land use management. *Geoderma*, 174, 274-281.
- LANG R. 1915. Versuch einer exakten Klassifikation der Boden in klimatischer und geologischer Hinsicht. *International Mittelingen Bodenkunde* 5, 312–346.
- LÓPEZ O, 1993. Efectos del uso agroforestal sobre distintas propiedades edáficas en suelos desarrollados sobre una superficie de raña al norte de Palencia. Tesis Doctoral.
- MUHAMMAD S, MÜLLER T, JOERGENSEN RG. 2008. Relationships between soil biological and other soil properties in saline and alkaline arable soils from the Pakistani Punjab. *J. Arid Environ.* 72, 448–457.
- MURPHY J, RILEY JP. 1962. A modified single solution method for the determination of phosphorus in natural waters. *Anal. Chem. Acta.* 27, 31-36.
- NINYEROLA M, PONS X, ROURE JM 2005. Atlas Climático Digital de la Península Ibérica. Metodología y aplicaciones en bioclimatología y geobotánica. ISBN 932860-8-7. Universidad Autónoma de Barcelona, Bellaterra.
- ORTEGA A, MONTERO G. 1988. Evaluación de la calidad de las estaciones forestales. Revisión bibliográfica. *Ecología* 2, 155-184.
- PRITCHETT WL 1986. Suelos Forestales. Propiedades, conservación y mejoramiento. Limusa, México D.F. 635 pp.
- QUALLS RG, RICHARDSON CJ 1995. Forms of soil phosphorus along a nutrient enrichment gradient in the northern everglades. *Soil Science*, 16, 183-198.
- REDEL Y, RUBIO R, GODOY R, BORIE F. 2008. Phosphorus fractions and phosphatase activity in an Andisol under different forest ecosystems. *Geoderma* 145, 216–221.
- RICHTER DD, ALLEN HL, LI J, MARKEWITZ D, RAIKES J. 2006. Bioavailability of slowly cycling soil phosphorus: major restructuring of soil phosphorus over four decades in an aggrading forest. *Oecología* 150 (2), 259-271.
- SIBBESSEN E. 1978. An investigation of the anion-exchange resin method for soil phosphate extraction. *Plant Soil*, 50, 305-321.
- SKOVGAARD JP, VANCLAY JK. 2008. Forest site productivity: a review of the evolution of dendrometric concepts for even-aged stands. *Forestry* 81 (1) , 13-31.
- SLAZAK A, FREESE D, DA SILVAMATOS E, HÜTTI RF. 2010. Soil organic phosphorus fraction in pine-oak forest stands in Northeastern Germany. *Geoderma* 156–162.
- SHARMA RP, BRUNNER A, EID T. 2012. Site index prediction from site and climate variables for Norway spruce and Scots pine in Norway. *Scandinavian Journal of Forest Research*. DOI:10.1080/02827581.2012.685749
- SYERS JK, SHAH R, WALKER TW 1969. Fractionation of phosphorus in two alluvial soils and particle-size separates. *Soil Sci.* 103, 283-289.
- TIESSEN H, MOIR JO, 1993. Characterization of available P by sequential extraction. *Soil En: M.R Carter. (Ed). Sampling and Methods of Analysis. Ed. Lewis Publishers. Boca Raton. EE.UU. pp. 75-86.*
- TURRIÓN MB, GALLARDO JF, GONZÁLEZ MI. 2000. Distribution of P formas in natural and fertilized forest soils of the central western Spain: Plant response to superphosphate fertilization. *Arid Soil Research and Rehabilitation*, 14, 159-173.

- TURRIÓN MB, GALLARDO JF, HAUMAIER L, GONZÁLEZ MI, ZECH W. 2001. Characterization of phosphorus fractions in natural and fertilized forest soils. *Ann For Sci.* 58, 89–98.
- TURRIÓN MB, LÓPEZ O, LAFUENTE F, MULAS R, RUIPÉREZ C, PUYO A 2007. Soil phosphorus forms as quality indicators of soils under different vegetation covers. *Sci. Total Environ.* 36, 399-207.
- VANCLAY JK. 1994. *Modelling Forest Growth and Yield: Applications to Mixed Tropical Forests.* CAB International, Wallingford, U.K.
- WATANABE FS; OLSEN SR. 1965. Test of an ascorbic acid method for determining phosphorus in water and NaHCO₃ extracts from soil. *Soil Sci. Soc. Am. Proc.* N°29, pp. 677-678.
- WILLIAMS JDH, MAYER T, NRIAGU JO. 1980. Extractability of phosphorus from phosphorus from phosphate minerals common in soils and sediments. *Soil Sci. Soc. Am. Proc.* 35, 250-255.

AGRADECIMIENTOS

Quisiera expresar mis sinceros agradecimientos a:

- La Agencia de Cooperación Internacional para el Desarrollo (**AECID**) por haberme dado la oportunidad de cursar el Máster en Conservación y Uso Sostenible en Sistemas Forestales en la Universidad de Valladolid.
- Al proyecto **AGL2011-29701-C02-02** financiado por el Ministerio de Ciencia e Innovación de España en cuyo marco se encuadra este trabajo.
- Mi Tutora **M^a Belén TURRIÓN NIEVES** por su apoyo metodológico inestimable, sus consejos y por su total disponibilidad a atender y a aclarar todas mis dudas a lo largo del desarrollo del presente trabajo.
- Al profesor Felipe **BRAVO OVIEDO** que confió en mi capacidad de enfrentar las tareas y las exigencias inherentes al curso de Máster, facilitando los trámites necesarios para que mi llegada a España fuera posible.
- Al colectivo de los profesores del curso de Máster por la calidad de la docencia y por su disponibilidad.
- Al profesor **Valentín PANDO OVIEDO** por su apoyo incondicional para la realización de los análisis estadísticos de este trabajo.
- La profesora **Olga LÓPEZ CARCELÉN** por su apoyo en el trabajo de campo y por animarme en todo momento.
- La especialista del laboratorio **M^a del carmen BLANCO DE CASTRO** por su ayuda incondicional en el trabajo de laboratorio.
- Al especialista de laboratorio **Juan Carlos ARRANZ MORAL** por su ayuda durante el desarrollo del trabajo de laboratorio.
- **Teresa de los BUEIS MELLADO** por la ayuda prestada y por poner a mi disposición los materiales necesarios para el desarrollo del presente trabajo.
- todos mis **compañeros de aula** por la acogida y por la ayuda que me han ofrecido durante mi estancia en esta Universidad.
- Mi **Familia** en Benin sin la cual nada hubiera sido posible en mi vida.