

COMPORTAMIENTO DEL CARBONO ORGÁNICO Y LAS FRACCIONES DE FÓSFORO EN UN KANDIUDULT CON DISTINTOS MANEJOS DE RESIDUOS FORESTALES

NATALIA ANDREA MÓRTOLA^{1*} & OLGA SUSANA HEREDIA²

Recibido: 18-09-14

Recibido con revisiones: 01-04-15

Aceptado: 05-04-15

RESUMEN

El objetivo de este trabajo fue evaluar los efectos de diferentes sistemas de manejo de residuos de cosecha en una plantación de *Pinus taeda* (L) sobre las distintas fracciones de fósforo (P) del suelo y el carbono orgánico total (COT), en un suelo Kandiuult de la provincia de Misiones, con el fin de establecer estrategias de manejo para el mantenimiento y la mejora de estas variables en sistemas forestales. Se realizó un ensayo con los siguientes tratamientos: 1) Sin Residuos: extracción de residuos y mantillo - plantación con *Pinus taeda*; 2) Quema: quema de residuos y rastra - plantación con *P. taeda*; 3) Plantación Directa: conservación de residuos de la cosecha - plantación con *P. taeda* y 4) Capuera: conservación de residuos - desarrollo del bosque secundario. A los seis y nueve años de aplicados los tratamientos se muestreó a dos profundidades (0-5 cm y 5-15 cm), se evaluó el COT y se realizó el fraccionamiento secuencial de P de Hedley. El manejo que presentó el mayor impacto negativo sobre el P orgánico, tanto lábil como moderadamente lábil en la capa superficial del suelo, fue la extracción total de residuos, asociado a las menores concentraciones de COT en este tratamiento. La quema no afectó negativamente al COT en la capa superficial del suelo. Sin embargo, se observó una mayor adsorción de P a los seis años, indicando una menor disponibilidad de dicho nutriente. No se observó efecto de los tratamientos sobre el P total en ambas profundidades y años estudiados. Según los resultados obtenidos, la conservación superficial de los residuos forestales resultó ser una práctica de manejo apropiada para preservar y mejorar el COT y el P orgánico en estos suelos.

Palabras clave. Fracciones de fósforo; suelos rojos.

ORGANIC CARBON AND PHOSPHORUS FRACTIONS IN A KANDIUDULT WITH DIFFERENT FORESTRY RESIDUE MANagements

ABSTRACT

The aim of our work was to evaluate the effects of different forestry residue managements of *Pinus taeda* (L) on different soil phosphorus (P) fractions and total organic carbon (TOC) in an Ultisol, belonging to the great group of Kandiuult, in Misiones province. The experiment consisted of the following treatments: 1) without residues: residue and forest floor extraction - *Pinus taeda* plantation; 2) burning: prescribed forestry residue burning and soil dragging - *P. taeda* plantation; 3) direct plantation: forestry residue conservation - *P. taeda* plantation and 4) secondary forest: forestry residue conservation without plantation - growth of natural forest. Soil samples were taken at 0-5 and 5-15 cm after six and nine years of treatment application. TOC and the Hedley P fractionation was carried out. Residue extraction was the treatment that presented the most negative effect on available and moderately available organic P at the topsoil, associated with the lesser content of TOC. The burning treatment did not affect adversely TOC in the topsoil, but a larger P adsorption was observed after six years indicating a reduction in P availability. There was no effect of the different treatments on total P at both depths. Taking into account these results, conservation of superficial forest residues is an appropriate management practice to preserve and improve TOC and organic P in these soils.

Key words. Phosphorus fractions; red soils.

1 Instituto de Suelos INTA Castelar, Hurlingham, Provincia de Buenos Aires, Argentina.

2 Cátedra de Edafología, Facultad de Agronomía, UBA. Buenos Aires, Argentina.

*Autor de contacto: mortola.natalia@inta.gob.ar

INTRODUCCIÓN

El manejo silvícola con fines de producción de madera implica una alta movilidad de los nutrientes y su salida del sistema con las cosechas. El grado de impacto de estos sistemas de producción sobre el ambiente depende, en parte, del tipo de prácticas de manejo que se adopten. Dentro de estas prácticas, la preparación del terreno antes de la implantación de un monte adquiere gran importancia debido al manejo que se realiza de los residuos de la cosecha anterior (e.g., quema, extracción, conservación de residuos). Goya *et al.* (2003) estudiaron el impacto de diferentes sistemas de manejo de residuos forestales sobre el capital de nutrientes y concluyeron que la elección del tipo de aprovechamiento y las prácticas culturales aplicadas a los residuos resultan de gran importancia para la estabilidad en el corto plazo de las rotaciones futuras de *Pinus taeda* (L.). Flinn *et al.* (1980) y Fernández *et al.* (2000b) demostraron que las prácticas de postcosecha de apilado en escolleras y quema de residuos causan pérdida de materia orgánica (MO) y de nutrientes. Por su parte, Carter & Foster (2004) manifestaron que cuando se produce la quema de residuos existe la posibilidad de que los nutrientes perdidos durante la misma resulten en una reducción de la producción primaria neta (PPN) y de la producción de madera de la rotación posterior. Por otro lado, técnicas como la conservación de los residuos pueden resultar una alternativa para mantener el capital de nutrientes y sostener o aumentar el crecimiento de las plantaciones (Jones *et al.*, 1999). De esta manera, Entry *et al.* (1987) recomendaron mantener la mayor cantidad de MO posible, luego de la tala, en suelos donde puede haber una limitación nutricional.

Los suelos rojos altamente desarrollados del noreste de la Argentina constituyen una de las zonas forestales más relevantes del país y presentan como característica bajo contenido de COT (< 3%), por lo cual resulta importante estudiar los cambios en su contenido con los distintos manejos aplicados. Estos suelos también presentan baja disponibilidad de fósforo (P) con valores en promedio menores a 4 mg kg^{-1} (Bray y Kurtz II) (Pettri *et al.*, 1996; Vázquez & Morales, 2000) y alta capacidad de adsorción de este nutriente (capacidad relativa de adsorción de P: parámetro *a* de Freundlich entre 230 y 782 mg P kg^{-1}) (Vázquez & Morales, 2000). Esto hace sumamente interesante estudiar otras fracciones de P menos disponibles presentes en estos suelos.

La metodología secuencial de Hedley *et al.* (1982) permite determinar las concentraciones de todas las frac-

ciones inorgánicas y orgánicas de P presentes en el suelo, desde las más lábiles hasta las menos disponibles para las plantas, utilizando diferentes extractantes.

En nuestro país los trabajos existentes relacionados con la evaluación del ciclo del P han sido realizados mayoritariamente en sistemas agrícolas, evidenciándose una carencia importante en la evaluación de las fracciones de P del suelo en sistemas forestales, lo cual constituye una limitación para el conocimiento del ciclo de este nutriente en estos sistemas productivos. En suelos como los de este estudio, las investigaciones realizadas se han concentrado mayormente en la evaluación del P disponible (López Camelo *et al.*, 1996; Giuffré *et al.*, 2001, 2002) y el fraccionamiento de este elemento ha sido orientado a la caracterización de los distintos tipos de suelos rojos (Fernández López *et al.*, 2002).

El objetivo de este trabajo fue evaluar los efectos de los sistemas de manejo de residuos de cosecha en una plantación de *Pinus taeda* (L.) sobre el COT y las distintas fracciones de P del suelo, en un Kandiuult de la provincia de Misiones.

MATERIALES Y MÉTODOS

El ensayo se localizó en Colonia Wanda, Misiones, Argentina ($26^{\circ} 00 \text{ lat. S.}$ y $54^{\circ} 30 \text{ de long. O.}$). El suelo fue identificado como Kandiuult con arcillas del tipo de las caolinitas y óxidos de Fe y Al, medianamente ácido (pH 5,8). El clima es subtropical húmedo con precipitaciones del orden de los 2000 mm anuales, con régimen isohigro. La temperatura media anual es de alrededor de 20° C y la amplitud térmica media anual es de 11° C .

El área proviene de una primera rotación de *Pinus elliotti* Eng. de veinticinco años de edad, la cual fue cosechada a inicios del año 1996. Los residuos de la cosecha fueron cuantificados llegando a 40 t ha^{-1} (Fernández *et al.*, 2000a). En el mes de julio de 1996 se aplicó doble pasada de un rolo de 2 Mg. En el mes de agosto del mismo año se aplicaron los siguientes tratamientos con un diseño de bloques al azar con cuatro repeticiones, en parcelas de 480 m^2 (80 plantas): 1) **sin residuos:** eliminación de los residuos remanentes de la cosecha y del piso forestal y plantación de *Pinus taeda* L.; 2) **quema:** quema de los residuos y roturación del suelo con rastra y plantación de *P. taeda* L. (es el sistema aplicado tradicionalmente en la región); 3) **plantación directa:** mantenimiento de los residuos post-cosecha sobre la superficie del suelo y plantación de *P. taeda* L. y 4) **capuera:** mantenimiento de los residuos post-cosecha sobre la superficie del suelo y no reforestada, con regeneración de la vegetación secundaria.

La plantación del *P. taeda* L fue realizada en septiembre de 1996. A los seis y nueve años, luego de aplicados los tratamientos (2002 y 2005 respectivamente), se realizaron muestreos compuestos de suelo al azar en las entrelíneas de la plantación, en los espesores 0-5 cm y 5-15 cm, con el objetivo de evaluar el carbono orgánico total (COT) por el método de combustión seca utilizando un analizador elemental automático (LECO CN Analyzer St. Joseph, Michigan), el P total (sumatoria de las fracciones) y las distintas fracciones de P con el método de Hedley *et al.* (1982) modificado por Tiessen & Moir (1993). Las fracciones estudiadas fueron: **P inorgánico y orgánico lábil (Pil y Pol)**: involucra el P inorgánico (Pi) directamente intercambiable con la solución del suelo y el adsorbido débilmente, y el P orgánico (Po) fácilmente hidrolizable; **P inorgánico moderadamente lábil (Piml)**: P unido a la superficie de las arcillas o de los óxidos e hidróxidos de hierro (Fe) y aluminio (Al); **P orgánico moderadamente lábil (Poml)**: P asociado a compuestos orgánicos tales como ácidos fúlvicos y húmicos; **P unido a calcio (Pca)**: P inorgánico relativamente insoluble ligado al calcio (Ca) y P ocluido en suelos meteorizados; **P residual (Pres)**: P inorgánico y P orgánico químicamente muy estable e insoluble y **P total**: sumatoria de todas las fracciones de P.

Finalmente, los datos obtenidos fueron analizados mediante un ANOVA y las medias comparadas mediante el test LSD de Fisher a un nivel de significancia del 0,01. En el análisis se consideró que las observaciones fueron obtenidas a través del tiempo (seis y nueve años) y no sustentan el supuesto de independencia, por lo cual se aplicaron técnicas de análisis de medidas repetidas en el tiempo (Weber & Skilling, 2000). Los cálculos fueron realizados en un entorno R (2012), utilizando el paquete nlme (Pinheiro *et al.*, 2011).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Carbono orgánico total (COT)

En la capa superficial de suelo (0-5 cm), a los seis y nueve años, el tratamiento sin residuos fue el que presentó el

menor valor de COT, los tratamientos quema y plantación directa presentaron concentraciones intermedias y la capuera presentó el mayor valor para esta variable, con diferencias significativas ($p < 0,01$) entre los tratamientos sin residuos y capuera (Tabla 1).

El menor contenido de COT ($p < 0,01$) en el tratamiento sin residuos se relaciona con la extracción de los residuos orgánicos de la cosecha anterior realizada en este tratamiento antes de la implantación del cultivo de pino. En tanto que, la mayor concentración ($p < 0,01$) observada en el tratamiento capuera se vincula a la diferente calidad de los residuos orgánicos que llegan al suelo en este tratamiento con diversidad de especies vegetales presentes por regeneración de la vegetación secundaria.

En estudios realizados por otros autores (Fernández *et al.*, 2000b; Giuffré *et al.*, 2002; Lupi *et al.*, 2003), en este mismo ensayo en distintas edades del cultivo (dieciséis meses, dos y cuatro años), también fueron observadas diferencias significativas en el contenido de COT y C oxidable (CO Walkley & Black). En coincidencia con los resultados encontrados en este estudio, todos estos autores observaron menores valores en el tratamiento sin residuos. Esto indica que en el mediano plazo (seis y nueve años) se mantiene el efecto de los tratamientos sobre el COT.

No se encontraron diferencias significativas en los valores de COT entre los 5 y 15 cm, por lo cual no hubo efecto de los diferentes manejos sobre ésta variable estudiada en dicha profundidad (Tabla 1).

Fracciones de P en la capa superficial (0-5 cm)

En la Tabla 2 se presentan las pruebas de comparaciones múltiples de los valores promedio de las distintas fracciones de P y del P total en la capa superficial del suelo (0-5 cm) a los seis y nueve años de aplicados los tratamientos.

En dicha tabla se observa que, para el Pil a los seis años, los tratamientos con presencia de pinos (sin residuos,

Tabla 1. Prueba de comparaciones múltiples de valores promedio de carbono orgánico total para los tratamientos, en las capas superficial (0-5 cm) y subsuperficial (5-15 cm) del suelo, a los seis y nueve años.
Table 1. Multiple comparison tests of total organic carbon average for the treatments, in the 0-5 cm and 5-15 cm layers of the soil, at six and nine years of its application.

COT (g kg ⁻¹)	Promedio 6 y 9 años			
	Sin Residuos	Quema	Plantación directa	Capuera
Superficial (0-5 cm)	28,6 b	35,0 ab	33,4 ab	38,2 a
Superficial (5-15 cm)	21,6	23,6	21,3	21,3

Letras distintas indican diferencias estadísticas significativas (LSD, $p < 0,01$) entre tratamientos.

COT: carbono orgánico total, total organic carbon Different letters indicate significant statistical differences (LSD, $p < 0,01$) among treatments.

quema y plantación directa) presentaron niveles significativamente menores en la capa superficial, respecto al tratamiento capuera donde ésta especie no fue implantada. Estas diferencias se relacionan con varios factores, entre ellos, la diferente demanda de esta fracción de P disponible y la distinta cantidad y calidad de los residuos orgánicos aportados por cada tipo de vegetación presente y su posterior mineralización. En cuanto a la cantidad de residuos orgánicos aportados por la vegetación, se observó que en las parcelas con presencia de pino se produce un efecto de sombreo debido al cierre del dosel que provoca una disminución del volumen del sotobosque, junto a otros efectos como ser el alelopático, disminuyendo de esta manera la cantidad de residuos orgánicos aportados por este estrato (Lindh, 2008; Aubin *et al.*, 2008). En cuanto a la calidad de los residuos orgánicos aportados por las coníferas es conocido que estas especies tienen una biomasa con menor riqueza en nutrientes, entre ellos el P, respecto al del bosque secundario o capuera. Adicionalmente, los tejidos del género *Pinus* poseen una alta relación C/N y un alto contenido de compuestos recalcitrantes (Barnola *et al.*, 1997) que afectan la mineralización de sus restos vegetales (Martins *et al.*, 1999). En plantaciones de pino, la mineralización (Lilienfein *et al.*, 2001) y la tasa de ciclado de P

(Zou *et al.*, 1992) de los residuos caídos es más baja que en montes naturales.

Según se observa en la Tabla 2, para esta fracción de Pil, a los nueve años en la capa superficial del suelo (0-5 cm), continúa observándose una tendencia (aunque sin diferencias estadísticas significativas ($p < 0,01$)) a mayores valores de Pil en capuera respecto a dos de los tratamientos con pino (quema y plantación directa). Sin embargo, el tratamiento sin residuos presentó un mayor valor de Pil con diferencias significativas ($p < 0,01$) respecto de los otros dos tratamientos con cultivo de *Pinus taeda*. Esta diferencia se asocia a que en el tratamiento sin residuos el menor contenido de COT induce a la existencia de una comunidad microbiana menor, la cual provoca una menor demanda de nutrientes entre ellos el P. Por lo tanto, el Pil proveniente de la solubilización por parte de exudados radicales (ácidos orgánicos y enzimas) aumenta su concentración respecto de los otros tratamientos con presencia de pinos. Chen *et al.* (2002) en un estudio realizado en suelos de Nueva Zelanda, encontraron aumentos de la exudación de raíces en la rizósfera de *Pinus radiata* comparado con ryegrass, quedando demostrada de esta manera la capacidad del género *Pinus* de solubilizar compuestos fosforados.

Tabla 2. Prueba de comparaciones múltiples de valores promedio de las fracciones de fósforo y del fósforo total para los tratamientos, en la capa superficial (0-5 cm) del suelo, a los seis y nueve años.

Table 2. Multiple comparison tests of phosphorus fractions and total phosphorus of the treatments, in the 0-5 cm layer of the soil, at six and nine years of its application.

Tratamientos	Superficial (0-5 cm)							
	6 años				9 años			
	Sin Residuos	Quema	Plantación Directa	Capuera	Sin Residuos	Quema	Plantación Directa	Capuera
	<i>Fracciones Lábil</i>				<i>Fracciones Lábil</i>			
Pil (mg kg ⁻¹)	2,7 bc	2,3 c	1,8 c	5,0 a	4,3 ab	2,7 c	2,5 c	3,4 abc
Pol (mg kg ⁻¹)	19,7 d	30,0 bc	35,5 b	27,0 c	11,8 e	31,1 bc	29,8 bc	42,3 a
	<i>Fracciones Moderadamente Lábil</i>				<i>Fracciones Moderadamente Lábil</i>			
Piml (mg kg ⁻¹)	51,5 ab	63,6 a	44,3 b	44,8 b	56,7 ab	46,2 b	44,6 b	54,4 ab
Poml (mg kg ⁻¹)	42,4 d	91,0 c	44,0 d	94,5 c	81,9 c	115,9 b	108,7 b	131,4 a
Pca (mg kg ⁻¹)	7,8	8,9	6,4	8,4	7,5	8,6	8,1	8,7
Pres (mg kg ⁻¹)	469,9	373,0	457,2	456,5	406,7	376,2	350,1	311,0
Ptotal (mg kg ⁻¹)	594,0	568,8	589,2	636,2	568,9	580,7	543,8	551,2

Letras distintas indican diferencias significativas (LSD, $p < 0,01$) entre tratamientos.

Pil: fósforo inorgánico lábil, available inorganic phosphorus; Pol: fósforo orgánico lábil, available organic phosphorus; Piml: fósforo inorgánico moderadamente lábil, moderately available inorganic phosphorus; Poml: fósforo orgánico moderadamente lábil, moderately available organic phosphorus; Pca: fósforo unido a calcio, phosphorus bound to calcium; Pres: fósforo residual, residual phosphorus y Ptotal: fósforo total, total phosphorus. Different letters indicate significant statistical differences (LSD, $p < 0,01$) among treatments.

En ambos años estudiados, el Pol presentó el menor valor en el tratamiento con extracción de residuos con diferencias significativas ($p < 0,01$) respecto de los demás tratamientos (Tabla 2). Coincidentemente, como fue mencionado anteriormente, también fueron observados menores valores de COT en este tratamiento (Tabla 1). Además, en la capuera se observó un aumento significativo ($p < 0,01$) de esta fracción durante el transcurso de los tres años, manteniéndose relativamente constantes las concentraciones de Pol para los tratamientos quema y plantación directa, y presentándose una disminución significativa ($p < 0,01$) en el tratamiento sin residuos. Las diferencias en las concentraciones de Pol a nivel superficial en los distintos tratamientos se asocian principalmente a dos factores: a) diferente cantidad de biomasa aportada por aplicación de distintas prácticas de implantación (remoción, quema o mantenimiento de residuos en superficie) y b) diferente calidad y cantidad de residuos orgánicos aportados por la vegetación presente en cada uno de los tratamientos estudiados. Con respecto al primer factor mencionado (diferente cantidad de biomasa aportada según tratamiento) se observó que, a nivel superficial, esta fracción presentó altas concentraciones en los tratamientos plantación directa y capuera, lo cual se asocia con la mayor permanencia de residuos en ambos tratamientos evaluados. En relación a la diferente calidad y cantidad de residuos orgánicos aportados por la vegetación presente, las diferencias en el manejo de los residuos realizada en los distintos tratamientos (remoción, quema o mantenimiento de residuos en superficie) provocan un efecto sobre la diversidad de especies establecidas posteriormente tanto en el sotobosque del cultivo de pino como en la capuera (Jones *et al.*, 1999; Shaoqing *et al.*, 2010).

A los seis años el Piml en la capa superficial de suelo (0-5 cm), presentó en el tratamiento con quema el máximo valor con diferencias significativas ($p < 0,01$) respecto de los tratamientos con conservación de residuos, plantación directa y capuera (Tabla 2). El P liberado durante la quema se une con las arcillas y óxidos e hidróxidos de Fe y Al luego de la aplicación del fuego (Romanyá *et al.*, 1994; Galang *et al.*, 2010). Sin embargo, este efecto no fue observado en dicha profundidad después de transcurridos tres años más, observándose que durante este período, a la vez que disminuyó el Piml aumentó el Poml, debido al pasaje de Pi moderadamente adsorbido hacia formas de P orgánicas moderadamente estables.

Algunos autores encontraron disminución de las fracciones orgánicas después de la quema (Romanyá *et al.*, 1994). Sin embargo, según se observa en la Tabla 2, a los seis años,

el tratamiento con fuego, presentó un valor alto significativo ($p < 0,01$) en la concentración de Poml. Tal situación es atribuida a que el Pi liberado durante la quema es transformado a Po a través de procesos de síntesis de biomasa microbiana y vegetal después de aplicada dicha práctica. Según Bünemann *et al.* (2008), los microorganismos del suelo sintetizan y liberan P orgánico. A su vez, a través del tiempo parte de este Po es estabilizado como resultado del proceso de humificación y por interacciones con compuestos inorgánicos del suelo (Hagedorn *et al.*, 2003).

El mayor valor ($p < 0,01$) de Poml observado en el tratamiento capuera en el estrato superficial, tanto a los seis como a los nueve años, se relaciona con la mayor calidad de los residuos orgánicos aportados en este tratamiento, provocando un incremento de las fracciones orgánicas moderadamente lábiles vía biomasa microbiana. En los primeros 5 cm se observó un aumento de esta fracción en todos los tratamientos después de transcurridos tres años (entre los seis y nueve años). Los aumentos observados fueron de 27% en quema, 39% en capuera, 93% en sin residuos y 147% en plantación directa. El proceso de estabilización del Po se produce a través de la humificación y de las interacciones con compuestos inorgánicos del suelo durante los tres años transcurridos. Según Sharpley *et al.* (1987) a través del tiempo ambos procesos, biológico y geoquímico, transforman el P inorgánico en formas más estables de P orgánico e inorgánico en el suelo.

Para la fracción Pca se observaron valores muy bajos, menores a 11 mg kg^{-1} para todos los tratamientos en ambas profundidades y años estudiados sin diferencias significativas entre los mismos, sugiriendo que existe poco P unido a Ca, tal como es esperado en este tipo de suelos altamente intemperizados (Smeck, 1985).

En el suelo de este estudio el Pres presentó las concentraciones más altas en todos los tratamientos, tanto a nivel superficial como subsuperficial, constituyendo entre el 55% y el 79% del P total, indicando la importancia de esta fracción en estos suelos. Tanto para el Pres como para el P total en el estrato de 0 a 5 cm del suelo, en ambos años estudiados (seis y nueve años) no se observaron diferencias significativas entre los distintos tratamientos.

Fracciones de P en la capa subsuperficial (5-15 cm)

En la Tabla 3 se presentan las pruebas de comparaciones múltiples de los valores promedio de las distintas fracciones de P y del P total, en la capa subsuperficial del suelo (5-15 cm) a los seis y nueve años de aplicados los diferentes tratamientos.

En la capa subsuperficial del suelo (5-15 cm) a los nueve años, se observa una menor concentración de Pil ($p < 0,01$) en capuera, lo cual es atribuido a una alta demanda de esta fracción de P disponible debido a un gran desarrollo de la vegetación natural secundaria presente, diferente al bosque de pino implantado.

Por otra parte, entre los seis y nueve años, se observó una tendencia general a la disminución del Pil en todos los tratamientos, siendo estadísticamente significativa en los tratamientos de quema y capuera. Este hecho es debido, por un lado, a la absorción de esta fracción de P disponible por parte de la vegetación en activo crecimiento con composición de especies diferentes según tratamiento; y por otro lado, a la menor transformación de los residuos a Pil a través de una menor mineralización en esta profundidad. Según Hadas *et al.* (1986), quienes evaluaron la mineralización en perfiles de suelos con diferentes manejos, informaron que la mineralización disminuyó con la profundidad y que hay una relación consistente entre ésta y la tasa de mineralización.

Es importante mencionar que, a pesar de las diferencias estadísticas observadas en las concentraciones de Pil en los distintos tratamientos en ambas profundidades, ellas

son consideradas agrónomicamente bajas. Este hecho se debe a la alta capacidad de adsorción de este elemento en este tipo de suelo.

Para el Pol, en ambos años estudiados, los dos tratamientos con conservación de residuos, plantación directa y capuera, presentaron las mayores concentraciones de esta fracción con diferencias significativas respecto del tratamiento sin residuos donde estos fueron extraídos (Tabla 3).

En la capa subsuperficial del suelo, a los 6 años, los tratamientos de quema y capuera presentaron valores significativamente menores de Piml respecto de los demás tratamientos. Por un lado, el bajo valor de Piml observado en el tratamiento con uso del fuego indica que, a diferencia de lo observado en la capa superficial (0-5 cm), la quema de residuos no tuvo efecto sobre esta fracción en el suelo subsuperficial (5-15 cm). Por otro lado, estos menores valores observados tanto en quema como en capuera, se relacionan con un efecto de desorción de P producido por una mayor demanda de este elemento en subsuperficie por parte de las especies vegetales presentes en estos tratamientos. Durante el proceso de quema se produce una liberación de nutrientes que aumenta la fertilidad del sitio (Neary *et al.*, 1999; Carter & Foster, 2004) y genera un mayor

Tabla 3. Prueba de comparaciones múltiples de valores promedio de las fracciones de fósforo y del fósforo total para los tratamientos, en la capa subsuperficial (5-15 cm) del suelo, a los seis y nueve años.

Table 3. Multiple comparison tests of phosphorus fractions and total phosphorus average values of the treatments, in the 5-15 cm layer of the soil, at six and nine years of its application.

Tratamientos	Subsuperficial (5-15 cm)							
	6 años				9 años			
	Sin Residuos	Quema	Plantación Directa	Capuera	Sin Residuos	Quema	Plantación Directa	Capuera
	<i>Fracciones Lábil</i>				<i>Fracciones Lábil</i>			
Pil (mg kg ⁻¹)	2,8 ab	3,4 a	2,7 ab	2,8 ab	2,1 b	2,0 b	2,1 b	1,0 c
Pol (mg kg ⁻¹)	14,0 b	19,5 ab	25,7 a	25,2 a	28,7 b	31,4 ab	31,5 a	34,03 a
	<i>Fracciones Moderadamente Lábil</i>				<i>Fracciones Moderadamente Lábil</i>			
Piml (mg kg ⁻¹)	48,7 a	36,5 b	49,6 a	32,4 b	42,3 ab	42,6 ab	41,7 ab	32,5 b
Poml (mg kg ⁻¹)	61,5 c	75,0 bc	65,7 c	94,0 b	63,3 c	142,5 a	66,8 c	79,1 b
Pca (mg kg ⁻¹)	10,7	7,2	8,1	9,2	5,1	9,9	8,0	6,9
Pres (mg kg ⁻¹)	425,0 a	410,2 ab	408,1 ab	410,3 ab	375,0 b	282,0 c	392,7 ab	414,3 ab
Ptotal (mg kg ⁻¹)	572,7	551,8	559,9	573,9	516,5	510,4	542,8	567,8

Letras distintas indican diferencias significativas (LSD, $p < 0,01$) entre tratamientos.

Pil: fósforo inorgánico lábil, available inorganic phosphorus; Pol: fósforo orgánico lábil, available organic phosphorus; Piml: fósforo inorgánico moderadamente lábil, moderately available inorganic phosphorus; Poml: fósforo orgánico moderadamente lábil, moderately available organic phosphorus; Pca: fósforo unido a calcio, phosphorus bound to calcium; Pres: fósforo residual, residual phosphorus y Ptotal: fósforo total, total phosphorus.

Different letters indicate significant statistical differences (LSD, $p < 0,01$) among treatments.

crecimiento de las especies vegetales que se establecen luego del fuego. Por su parte, en la capuera al no existir el bosque implantado con pinos, no se genera el efecto de sombreo, favoreciendo estas condiciones un mayor desarrollo de la vegetación secundaria en este tratamiento. Este importante desarrollo de la vegetación genera una mayor demanda de nutrientes entre ellos el P. En un estudio realizado por Rebottaro y Cabrelli (2007) informaron que luego de seis años la regeneración natural de la vegetación posterior a una tala rasa de *Pinus elliottii* (semejante al tratamiento capuera de este estudio) acumuló mayor volumen de biomasa por ha respecto a una plantación de *Pinus elliottii*.

A nivel subsuperficial el P_{oml} presentó un aumento ($p < 0,01$) en su concentración del 90% entre el sexto y noveno año sólo en el tratamiento con quema (Tabla 3), lo cual puede explicarse por el pasaje desde P residual a P_{oml} a través de distintos mecanismos de solubilización (actividad de ácidos orgánicos y fosfatasas ácidas de raíces, bacterias solubilizadoras de P de vida libre y micorrización), ya que se observa una marcada disminución del P residual a esta profundidad para este mismo período.

La concentración de P_{res} en la capa subsuperficial de 5 a 15 cm, fue similar para todos los tratamientos a los seis años. Después de transcurridos tres años más se observó, una significativa disminución de esta fracción en los tratamientos sin residuos y quema, y es de destacar que, como fue presentado anteriormente, paralelamente se observó un mayor aumento del P_{ol} en estos tratamientos, debido al pasaje del P más recalcitrante hacia esta última fracción. En estos dos tratamientos, la composición de especies vegetales diferentes del sotobosque puede ejercer un efecto diferencial de solubilización de las formas del P_{res} a través de exudados de raíces y composición de la población microbiana y fúngica del suelo.

El P total en este estrato del suelo no fue significativamente diferente en los tratamientos evaluados, sin embargo, sí se observó una disminución significativa en todos los tratamientos evaluados entre el sexto y noveno año (Tabla 4). Esta disminución se explica por el movimiento del P desde el suelo hacia la biomasa arbórea debido a la activa absorción de este nutriente por parte de la vegetación presente, haciendo que pase a formar parte de la biomasa vegetal dejando de ser parte del P del suelo.

Tabla 4. Prueba de comparaciones múltiples de valores promedio de fósforo total de todos los tratamientos, en las capas superficial (0-5 cm) y subsuperficial (5-15 cm) de suelo, a los seis y nueve años.

Table 4. Multiple comparison tests of and total phosphorus average values of all the treatments, in the 0-5 cm and 5-15 cm layers of the soil, at six and nine years of its application.

	P total (mg kg ⁻¹)	
	6 años	9 años
Superficial (0-5 cm)	597,1	561,2
Subsuperficial (5-15 cm)	564,2 a	533,9 b

Letras distintas indican diferencias estadísticas significativas (LSD, $p < 0,01$) entre años.

P_{total}: fósforo total, total phosphorus.

Different letters indicate significant statistical differences (LSD, $p < 0,01$) among years.

CONCLUSIONES

El contenido de COT en los primeros 5 cm se incrementó significativamente con el mantenimiento de residuos y la regeneración natural del bosque secundario, observándose valores intermedios con la quema y la conservación de residuos con posterior implantación del *Pinus taeda*. La extracción de residuos fue el único tratamiento que provocó una disminución en los valores de COT en los suelos en estudio.

La extracción total de residuos afectó negativamente los contenidos de P orgánico, tanto lábil como moderadamente lábil en la capa superficial del suelo. También se observó que ninguna de las prácticas de manejo aplicadas produjo cambios en el contenido de P total del suelo en ambas profundidades estudiadas.

La quema no provocó un efecto negativo sobre el COT. Sin embargo, se observó una mayor adsorción de P a los seis años, lo cual indica una menor disponibilidad de dicho nutriente para las plantas.

De acuerdo a los resultados obtenidos, la conservación superficial de los residuos forestales resulta ser una práctica de manejo apropiada para preservar y mejorar el COT y el P orgánico en este tipo de suelos.

BIBLIOGRAFÍA

- Aubin, I; C Messier & A Bouchard. 2008. Can plantations develop understory biological and physical attributes of naturally regenerated forests? *Biological Conservation* 141(10): 2461-2476.
- Barnola, LF; M Hasegawa & A Cedeño. 1997. Mono and sesquiterpene variation in *Pinus caribea* and its relationship to *Atta laevigata* herbivory. *Biochem. Syst. Ecol.* 22(5): 437-445.

- Bray, RH & LT Kurtz. 1945. Determination of total, organic and available forms of phosphorus in soils. *Soil Sci.* 59(1): 39-46.
- Bünemann EK; RJ Smernik; P Marschner & AM McNeill. 2008. Microbial synthesis of organic and condensed forms of phosphorus in acid and calcareous soils. *Soil Biology & Biochemistry* 40(4):932-946.
- Carter, MC & CD Foster. 2004. Prescribed burning and productivity in southern pine forest: a review. *Forest Ecol. Manag.* 191(1): 93-109.
- Chen, CR; LM Condrón; MR Davis & RR Sherlock. 2002. Phosphorus dynamics in the rhizosphere of perennial ryegrass (*Lolium perenne* L) and radiata pine (*Pinus radiata* D. Don.). *Soil Biol. Biochem.* 34 (4): 487-499.
- Entry, JA; NM Stark & H Loewenstein. 1987. Effect of timber harvesting on extractable nutrients in a northern Rocky Mountain forest soil. *Can. J. For. Res.* 17(7): 735-739.
- Fernández, R; AM Lupi; N Pahr; H Reis; H O' Lery; M Gelid & S Martínez. 2000a. Técnicas de manejo de residuos de cosecha para el establecimiento forestal y su impacto sobre la condición química de los suelos rojos del Noreste de Argentina. *Avances en Ingeniería Agrícola*. Pp. 243-248.
- Fernández, RA; AM Lupi; F Rodríguez Aspillada; M Gemid; R Pezzutti; N Pahr; A Hernández; H Delgado & P Cortez. 2000b. Técnicas de manejo de suelo y de residuos para el establecimiento de plantaciones de coníferas en el noreste argentino. *Jornadas Forestales Silvoargentinas, Virasoro, Corrientes, Argentina*.
- Fernández López, C; S Vázquez & H Dalurzo. 2002. Formas de P en suelos altamente meteorizados del sur de la Provincia de Misiones. *Ciencia del Suelo* 20(2): 81-86.
- Flinn, DW; RO Squire & PW Farrell. 1980. The role of organic matter in the maintenance of productivity on sandy soils. *New Zeal. J. For.* 25(2): 229-236.
- Galang, MA; D Markewitz & LA Morris. 2010. Soil phosphorus transformations under forest burning and laboratory heat treatments. *Geoderma* 155(3): 401-408.
- Giuffré, L; G Piccolo; R Rosell; C Pascale; OS Heredia & E Ciarlo. 2001. Anthropogenic effect on soil phosphorus dynamics in tropical ecosystems. *Comm. in Soil Sci. and Plant Analysis* 32(9y10): 1621-1628.
- Giuffré, L; R Fernández; AM Lupi; OS Heredia & C Pascale. 2002. Efecto de diferentes técnicas de manejo de residuos de la cosecha forestal en algunas propiedades de un suelo Kandiuult en el Noreste Argentino. *Agric. Tec.* 62(1): 143-149.
- Goya, JF; C Perez; JL Frangi & R Fernández. 2003. Impacto de la cosecha y destino de los residuos sobre la estabilidad del capital de nutrientes en plantaciones de *Pinus taeda* (L). *Ecología Austral* 13(2): 139-150.
- Hadas, A; S Feigenbaum; A Feigin & R Portnoy. 1986. Nitrogen mineralization in profiles of differently managed soil types. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 50(2): 314-319.
- Hagedorn, F; D Spinnler; M Bundt; P Blaser & R Siegwolf. 2003. The input and fate of new C in two forest soils under elevated CO₂. *Global Change Biology* 9(6): 862-872.
- Hedley, MJ; JWB Stewart & BS Chauhan. 1982. Changes in inorganic and organic soil phosphorus fraction induced by cultivation practices and by laboratory incubations. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 46(5): 970-976.
- Jones, HE; M Madeira; L Herraes; J Dighton; A Fabiao; F González-Río; M Fernández Marcos; C Gómez; M Tomé; H Feith; MC Magalhaes & G Howson. 1999. The effect of organic matter management on the productivity of *Eucalyptus globulus* stands in Spain and Portugal: tree growth and harvest residue decomposition in relation to site and treatment. *Forest Ecol. Manag.* 122(1-2): 73-86.
- Lilienfein, J; W Wilcke; R Thomas; L Vilela; S do Carmo Lima & W Zech. 2001. Effects of *Pinus caribaea* forests on the C, N, P and S status of Brazilian savanna Oxisols. *Forest Ecol. Manag.* 147(2-3): 171-182.
- Lindh, BC. 2008. Flowering of understory herbs following thinning in the western cascades, Oregon. *Forest Ecol. Manag.* 256(5): 929-936.
- López Camelo, LG de; G Piccolo; R Rosell & OS Heredia. 1996. Sustentabilidad del fósforo en un suelo rojo laterítico. Serie Informe técnico N° 65. ISSN: 0326-0135, EEA Cerro Azul-INTA, 11p., C.R. Misiones, Argentina.
- Lupi, AM; R Fernández & M Conti. 2003. Calidad del suelo como respuesta a la aplicación de prácticas de implantación forestal. IX Jornadas Técnicas Forestales. INTA-FCF-MEYRNYT. El Dorado, Misiones, Argentina. Actas en disco compacto.
- Martins, A; S Azevedo & L Carvalho. 1999. Dynamics of leaf litter structural compounds in *C. sativa* and *P. pinaster* forest ecosystems during decomposition processes: Interactions with soil organic matter and nutrient release. *Acta Hort.* 494: 161-166.
- Neary, DG; CC Klopatek; LF DeBano & PF Folliott. 1999. Fire effects on belowground sustainability: a review and synthesis. *Forest Ecol. Manag.* 122(1-2): 51-71.
- Pettri, MD; MG Acuña & AD Sosa. 1996. Isotermas de adsorción de fósforo, ensayos de maceta y campo en un Alfisol. Pp 145-146. Actas XV Congreso Argentino Ciencia del Suelo, Santa Rosa, La Pampa, Argentina.
- Pinheiro, J; D Bates; S DebRoy; D Sarkar & The R Development Core Team. 2011. nlme: Linear and Nonlinear Mixed Effects Models. R package version 3.1-102.
- Rebottaro, SL & D Cabrelli. 2007. Crecimiento y rendimiento comercial de *Pinus elliottii* en plantación y en regeneración natural manejada con raleos en Entre Ríos, Argentina. *Bosque* 28(2): 152-161.
- Romanyá, J; PK Khana & RJ Raison. 1994. Effects of slash burning on soil phosphorus fractions and sorption and desorption of phosphorus. *Forest Ecol. Manag.* 65(2-3): 89-103.
- Shaoqing, C; P Shaolin; P Baoming; C Danting & C Juhua. 2010. Effects of fire disturbance on the soil physical and chemical properties and vegetation of *Pinus massoniana* forest in south subtropical area. *Acta Ecologica Sinica* 30(3): 184-189.
- Sharpley, AN; H Tiessen & CV Cole. 1987. Soil phosphorus forms extracted by soil tests as a function of pedogenesis. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 51(2): 362-365.
- Smeck, NE. 1985. Phosphorus dynamics in soils and landscape. *Geoderma* 36(3-4): 185-199.
- Tiessen, H & JO Moir. 1993. Characterization of available phosphorus by sequential extraction. *En: Carter, MR (ed). Soil Sampling and Methods of Analysis*, M. R. Canadian Society of Soil Science. Pp. 75-86. Lewis Publishers.
- Vázquez, S & LA Morales. 2000. Adsorción de P por suelos ácidos de Misiones (Argentina). *Ciencia del suelo* 18(2): 89-94.
- Weber, DC & JH Skilling (eds). 2000. A first course in the design of experiments. A linear models approach. CRC Press, Boca Raton.
- Zou, XM; D Binkley & KG Doxtader. 1992. A new method for estimating gross phosphorus mineralization and immobilization rates in soils. *Plant Soil* 147(2): 243-250.