

DESCOMPOSICIÓN DE RAÍCES DE *Pinus taeda* L. BAJO UN SISTEMA SILVOPASTORIL EN LA PROVINCIA DE MISIONES, ARGENTINA

DECOMPOSITION OF *Pinus taeda* L. ROOTS UNDER A SILVOPASTORAL SYSTEM IN MISIONES, ARGENTINA

Fecha de recepción: 12/12/2014 // Fecha de aceptación: 31/07/2015

Martín A. Pinazo

INTA EEA Montecarlo.
Av. Libertador 2472.
Montecarlo, Misiones,
Argentina. email:
pinazo.martin@inta.gob.ar.
Tel: +54-3751-480057.

Otto E. Knebel

INTA EEA Montecarlo.
Av. Libertador 2472.
Montecarlo, Misiones,
Argentina.

RESUMEN

Se evaluaron durante 1 año las tasas de descomposición y tasas de mineralización de nitrógeno y fósforo en raíces de diferentes tamaños de *Pinus taeda* L. bajo sistema silvopastoril. Las tasas de descomposición (K) estimadas fueron mayores respecto a los valores citados por la bibliografía con una pérdida de peso seco que alcanzó el 70 % respecto al peso inicial. El fósforo presentó tasas de mineralización elevadas con valores de K mayores a 4 y una marcada inmovilización en los meses invernales. Al finalizar el estudio al menos el 80 % del fósforo original fue mineralizado. El nitrógeno fue inmovilizado durante todo el estudio excepto el de las raíces más finas, en las que presentó mineralización del 38 % y 60 %. Tanto el tamaño de las raíces como las concentraciones iniciales de fósforo y nitrógeno presentaron valores altos de correlación con la tasa diaria de descomposición de las raíces. Las raíces pueden significar una fuente de fósforo dentro del esquema de manejo silvopastoril y tendrían un papel importante en la dinámica del nitrógeno como inmovilizadores temporales de este elemento.

Palabras clave: mineralización, fósforo, nitrógeno, pino taeda, Argentina.

SUMMARY

Decomposition and Nitrogen and Phosphorous mineralization rates in different diameter roots of *Pinus taeda* plants growing in a silvopastoral system were evaluated along 1 year. The estimated decomposition rates (K) were larger than those values cited in the bibliography with a dry weight loss that reached the 70% of the initial mass. Phosphorous had high mineralization rates with K values higher than 4 and a marked immobilization in winter time. At the end of the study, at least 80 % of the initial P was mineralized. Nitrogen was immobilized during the whole study except in the finest roots in which mineralization of 38 % to 60 % was presented. Daily root decomposition rate had high correlation coefficients with the root diameter and P and N initial concentrations. Tree roots can be a significant P source in a silvopastoral system, and they could also play an important role in temporary soil N immobilization.

Keywords: mineralization, phosphorous, nitrogen, loblolly pine, Argentina.

INTRODUCCIÓN

Gran parte de la producción primaria neta de las plantas son destinadas a órganos subterráneos como las raíces, pudiéndose alcanzar valores de más del 20% de la biomasa aérea (MILLER et al. 2006) y en el caso de *Pinus taeda* L. se reportan valores de 19-24 % (MILLER et al. 2006). A pesar de ello la mayoría de los estudios de descomposición se centran en el mantillo o litter forestal. La descomposición es un paso crítico dentro del ciclo del carbono y además tiene gran importancia en la nutrición de las plantas y en la capacidad de intercambio catiónico de muchos suelos (VAN LEAR et al. 2000). Como consecuencia de los altos valores de biomasa de raíces, estas constituyen una entrada importante al momento de analizar el ciclado de nutrientes y carbono al suelo (FAHEY et al. 1988; CAIRNS et al. 1997; SILVER y MIYA 2001; CHEN et al. 2001).

Diversos factores regulan la descomposición de los tejidos vegetales pudiéndose citar al tipo de sustrato, composición química del sustrato, tamaño del material, humedad y temperatura (CHAPIN III et al. 2002). La descomposición de raíces difiere a la del mantillo ya que representa un tipo de sustrato diferente y por las condiciones ambientales bajo las cuales se desarrolla el proceso. Las raíces, como cualquier tejido vegetal, presentan diferentes concentraciones de nutrientes y otros compuestos que determinarían diferencias en las tasas de descomposición. Diversos autores mencionan relaciones entre los contenidos de nutrientes como N, P, los contenidos de lignina y las tasas de descomposición de las raíces (YANG et al. 2004), sin embargo no es posible encontrar patrones generales aplicables a todas las especies (CAMIRÉ et al. 1991; SCHEU y SCHAUERMANN 1994). Lo mismo ocurre con el tamaño de las raíces, los contenidos de nutrientes y las tasas de descomposición de las mismas; mientras que algunos autores reportan buenas correlaciones entre el tamaño de las raíces y las tasas de descomposición (YANG et al. 2004, KING et al. 1997) otros autores encontraron comportamientos dispares (CAMIRÉ et al. 1991, FAHEY et al. 1988, SCHEU y SCHAUERMANN 1994).

En general es posible visualizar en zonas subtropicales una marcada inmovilización de nutrientes y una disminución de las tasas de descomposición durante los meses de invierno (ARUNACHALAM et al. 1996; JOHN et al. 2002). Dentro de un esquema de producción intensivo es probable que esta inmovilización evite una excesiva pérdida de nutrientes por lavado de los mismos durante las lluviosas temporadas invernales. Sin embargo, la mineralización neta de nutrientes durante el proceso de descomposición de raíces puede significar mayor crecimiento en los individuos remanentes en sistemas de raleos intensos en sitios con limitantes nutricionales y/o mecánicas (VAN LEAR et al. 2000).

Los sistemas silvopastoriles se caracterizan por combinar la producción de carne y madera

simultáneamente. En la actualidad es posible observar un aumento en la superficie de sistemas silvopastoriles en la provincia de Misiones, siendo *Pinus taeda* la principal especie implantada como componente arbóreo. El presente trabajo tiene como objetivo estudiar dinámica de la descomposición de raíces de *Pinus taeda* y la mineralización de nutrientes críticos para la producción como el fósforo y el nitrógeno. Se plantea como hipótesis que la tasa de descomposición y de mineralización está relacionada al tamaño de las raíces, concentración inicial de fósforo y nitrógeno y a las relaciones C/N, C/P y N/P presente en los diferentes tamaños.

MATERIALES Y MÉTODOS

El ensayo fue realizado en un sistema silvopastoril de 5 años de edad ubicado en el departamento de Montecarlo, provincia de Misiones, en propiedades de la empresa Ranger Maderas (26° 37' 45" S; 54° 23' 21" W). El clima se caracteriza por una temperatura media anual de 21°C, con precipitaciones que rondan los 2000 mm anuales, con régimen isohigro (INTA 1990). El suelo corresponde al orden de los Entisoles, conocidos como suelos pedregosos, de color pardo a pardo rojizo, caracterizados por presentar fragmentos de roca, a veces también en superficie. El material originario proviene de la intemperización de la roca basáltica.

El sitio se ubica en una zona de relieve pronunciado, en posición de media loma alta, con una pendiente de 15-20%. El escurrimiento de estos suelos es rápido y la permeabilidad moderadamente rápida, dando lugar a un drenaje algo excesivamente drenado, sin peligro de anegamiento, con una distribución de la humedad uniforme (SOIL SURVEY STAFF 2010).

El uso actual del área bajo estudio corresponde a un sistema silvopastoril de *Pinus taeda* de 7 años de edad, consociado con pasturas tropicales cultivadas de rápido crecimiento como *Setaria spp.* y *Brachiaria spp.*, además de otras especies espontáneas nativas.

A partir de la extracción mediante excavación de 3 árboles de *Pinus taeda* se tomaron raíces de diferentes tamaños. Las raíces fueron llevadas a laboratorio y fueron limpiadas con agua y clasificadas en 5 categorías de tamaño, raíces < 0.5 cm de diámetro, 0.5 a 1 cm de diámetro, 1 a 2.5 cm de diámetro, 2.5 a 5 cm de diámetro y raíces > 5 cm de diámetro. El material fue secado en estufa a 70 °C y pesado para determinar el peso seco inicial de las muestras. En el caso de las raíces < 0.5 cm de diámetro se realizaron muestras individuales de 5 g de peso de material, mientras que para las raíces de 0.5 a 1 cm de diámetro las muestras fueron de 10 g de material. Para el resto de las categorías de tamaño se realizaron muestras con un número igual de raíces para cada una de ellas. En todos los casos se pesó el material y se identificó con chapa numerada. De cada una de las categorías se tomaron 3 muestras para la determinación de peso seco a 80 °C y

realizar las correcciones por contenido de humedad de las muestras a colocar en campo.

Para la preparación de las muestras, colocación en campo y cronograma de extracción se tomaron las metodologías propuestas por diferentes autores como SILVER y MIYA (2001); ROBERTSON y PAUL (2000); KING et al. (1997); SCHEU y SCHAUERMANN (1994). De esta manera, las muestras fueron acondicionadas en bolsas de red de 2 mm para las raíces < a 0.5 cm de diámetro y 0.5 a 1 cm de diámetro. Las categorías restantes fueron envueltas en mallas de red plásticas de 0.25 cm con tres vueltas de la misma para evitar la pérdida de material. Las muestras fueron colocadas en campo en el mes de Octubre a 10-15 cm de profundidad en grupos de extracción (1 muestra de cada tamaño). La profundidad a la cual se colocaron las muestras responde a observaciones in situ realizadas para determinar el rango de desarrollo radicular para los tamaños evaluados.

Se extrajeron las muestras de acuerdo a un cronograma preestablecido en los meses 1-2-4-7 y 12 a partir de la fecha de colocación en campo. En cada extracción se retiraron 3 muestras por categoría de tamaño y fueron llevadas a laboratorio donde fueron limpiadas de tierra y extraídas las raíces nuevas o vivas provenientes de la vegetación que penetraron por las mallas. Las muestras fueron secadas a estufa a 80 °C hasta peso constante.

Posteriormente se envió el material a laboratorio químico para la realización de estimaciones de concentración de P, N y carbono total de cada muestra excepto para las raíces < a 0.5 cm de diámetro debido a la rápida descomposición de las mismas lo que imposibilitó disponer de material suficiente para realizar los análisis por muestra. De esta manera, y para esta categoría, se realizó una muestra compuesta para ser enviada a laboratorio.

Se evaluó la pérdida de peso como peso remanente, las variaciones en concentración y contenido de P, N y la relación C/N. Adicionalmente, se estimó la tasa de descomposición K mediante el ajuste del modelo $L_t = L_0 * e^{-kt}$ propuesto por OLSON (1963).

Donde L_0 es la masa en tiempo 0 y L_t es la masa remanente en tiempo t . El exponente k es la constante de descomposición que caracteriza a la tasa de descomposición de un determinado material. El cociente $0.693/K$ representa el tiempo necesario para que se descomponga el 50% de la masa, $3/K$ para que se descomponga el 95 % de la masa inicial y $5/ K$ el tiempo para lograr una descomposición del 99 % de la masa original, mientras que $1/K$ se denomina tiempo de residencia del material (OLSON 1963). El ajuste del modelo se evaluó mediante la proporción de la varianza explicada. Esta proporción se define como el cociente entre la suma de cuadrados de la regresión y la suma de cuadrados totales. Este cociente es equivalente al coeficiente de regresión por lo que resulta una medida de fácil interpretación (MOTULSKY y RANSNAS 1987). Las concentraciones iniciales de C, N, P y las

relaciones entre ellos fueron analizadas mediante ANOVA y comparación de medias de Tukey, mientras que las tasas diarias de descomposición para cada período de extracción fueron relacionadas mediante correlación de Pearson frente a las concentraciones iniciales de N, P, las relaciones C/N, C/P y N/P y el tamaño de las raíces con el objeto de determinar que variable influye sobre el proceso de descomposición.

Para el análisis de varianza de las concentraciones iniciales de N, los datos en porcentaje fueron transformados mediante la computación del arcoseno de los mismos (ZAR 1999).

RESULTADOS

El análisis de las raíces de diferentes tamaños presentó concentraciones de carbono similares y una tendencia significativa, en el caso del fósforo, con mayores concentraciones en las raíces de diámetros inferiores y menores concentraciones en las de mayor diámetro (F: 24.02; $p < 0.01$).

En el caso del nitrógeno las diferencias no resultaron marcadas (F: 5.81; $p < 0.05$) como en el caso del fósforo aunque, es posible verificar la misma tendencia significativa de mayores concentraciones en los diámetros pequeños y menores en los diámetros mayores (tabla 1). La relación C/N y N/P presentaron patrones poco definidos mientras que la relación C/P presentó una tendencia definida (F: 12.26; $p < 0.01$) con valores que descienden de manera significativa a medida que disminuye el tamaño de las raíces (tabla 1).

La pérdida de peso seco presentó una clara tendencia relacionada al tamaño de las raíces. Las raíces de menor diámetro (<0.5 cm y 0.5-1 cm) presentaron el mismo patrón de pérdida de peso caracterizado por una primera etapa de 30 días aproximadamente en la cual se verifica una rápida pérdida de peso, seguido de una disminución de la descomposición entre los 30 y 60 días para posteriormente continuar el proceso con una intensidad intermedia. Las raíces de tamaño intermedio (1-2.5 cm y 2.5-5 cm) presentaron dos momentos de disminución de pérdida de peso manifestados entre los 30-60 días de iniciado el estudio y entre los 120 y 240 días. En el caso de las raíces de mayor tamaño (>5 cm de diámetro) la descomposición fue moderada hasta los 240 días de iniciado el ensayo para luego incrementarse de manera similar a las raíces de tamaño intermedio, manifestando tasas mayores a las que presentaron las raíces de menor tamaño para este período.

El cálculo de la tasa de descomposición K para la pérdida de peso seco resultó significativa en todos los casos y presentó valores altos de la proporción de varianza explicada por el modelo. Los valores de K siguieron una clara tendencia (< 0.5) $> 0.5-1$ $> 1-2.5$ $> 2.5-5$ $> (>5)$ mientras que los valores de residencia, vida media ($0.693/K$), 95 % y 99 % presentaron una lógica tendencia inversa a la encontrada para K .

Los valores de vida media (50% del material descompuesto) muestran valores inferiores a ½ año para las raíces menores a 2.5 cm de diámetro mientras que

para las de mayor diámetro los valores fueron entre 0.7 y 0.8 años como tiempo necesario para perder la mitad de su peso seco inicial (tabla 2). Al año de instalado el ensayo las raíces < 0.5 cm de diámetro perdieron el 78 % del peso seco inicial mientras que las raíces > 5 de diámetro solo el 68 % de su peso inicial (tabla 2).

Tabla 1. Concentraciones iniciales de carbono (C %), nitrógeno (N%), fósforo (ppm) y las respectivas relaciones C/N, C/P y N/P para los diferentes diámetros de raíces de *Pinus taeda* (n: 3).

Table1. Concentrations of carbon (C%), nitrogen (N%), phosphorus (ppm) and C/N, C/P and N/P ratios for the different diameter roots in *Pinus taeda* (n:3).

Tamaño	C%	N%	P(ppm)	C/N	C/P	N/P
< 0.5	47.52 (± 0.24)	0.74 ^a (± 0.12)	1191.23 ^a (± 75.78)	68.36 (± 11.94)	401.99 ^a (± 24.44)	6.11 (± 0.68)
0.5-1	48.26 (± 0.14)	0.32 ^{ab} (± 0.14)	749.33 ^b (± 57.74)	205.91 (± 62.32)	652.61 ^{ab} (± 55.36)	4.12 (± 1.59)
1-2.5	47.93 (± 0.21)	0.34 ^{ab} (± 0.06)	569.33 ^{bc} (± 84.29)	151.65 (± 28.74)	875.75 ^{bc} (± 115.06)	6.42 (± 1.75)
2.5-5	47.81 (± 0.46)	0.14 ^b (± 0.02)	498.53 ^{bc} (± 43.66)	358.78 (± 46.82)	974.48 ^{bc} (± 89.58)	2.77 (± 0.26)
> 5	48.13 (± 0.36)	0.26 ^b (± 0.09)	414.27 ^c (± 42.29)	272.88 (± 137.51)	1184.24 ^c (± 109.68)	6.34 (± 2.07)

* Letras diferentes indican diferencias significativas mediante test de Tukey (p<0.05).

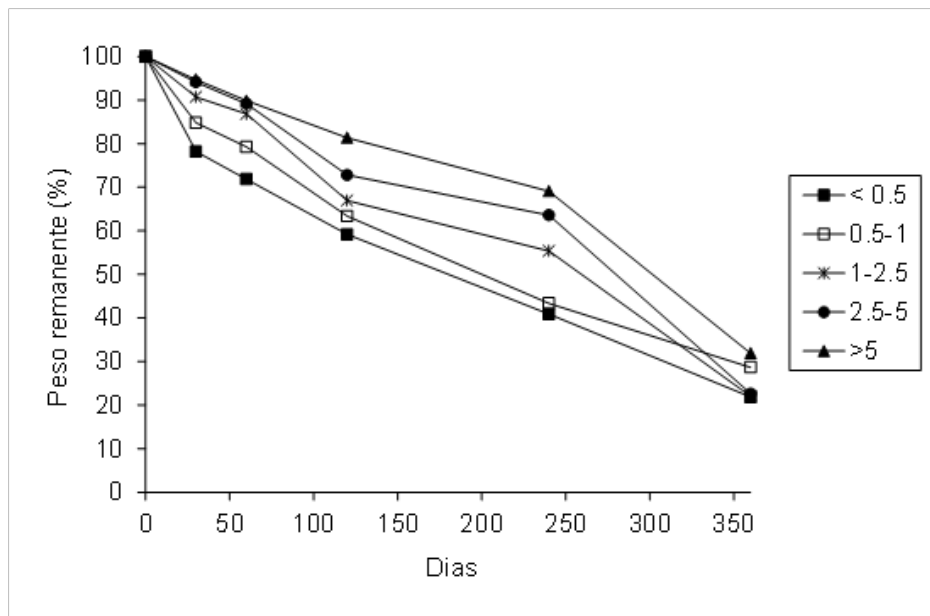


Figura 1. Peso seco remanente para raíces de *Pinus taeda* de diferentes diámetros en los períodos de extracción.

Figure 1. Remaining dry mass of different diameter roots of *Pinus taeda* in different extraction periods.

Tabla 2. Valores de las tasas de descomposición k (diaria), K (anual), 1/K (residencia), 0.693/K (vida media), 3/K (95%) y 5/K (99%) para los diferentes diámetros de raíces de *Pinus taeda*. El valor R indica la proporción de varianza explicada por el ajuste del modelo.

Table 2. Decay rates k (daily), K (annual), 1/K (residence), 0.693/K (half life), 3/K (95%) and 5/K (99%) for the different diameter roots of *Pinus taeda*. The R value indicates the proportion of variance explained by the model fit.

Diámetro	% pérdida peso	R	k	K	0.693/K			
					1/K	3/K	K	5/K
					Residencia	50%	95%	99%
>5	68.13	0.93	0.0022	0.80	1.25	0.80	3.74	6.23
2.5-5	77.39	0.83	0.0026	0.95	1.05	0.67	3.16	5.27
1-2.5	77.99	0.82	0.0033	1.20	0.83	0.53	2.49	4.15
0.5-1	71.35	0.92	0.0036	1.31	0.76	0.49	2.28	3.81
< 0.5	78.17	0.85	0.0043	1.57	0.64	0.41	1.91	3.19

En el caso de la liberación de fósforo y nitrógeno, estos presentaron diferentes comportamiento durante el periodo de estudio. El fósforo mostró una alta tasa de liberación durante los primeros 50 días de iniciada la experiencia para posteriormente mostrar una fuerte inmovilización a los 240 días coincidente con los meses de invierno. La liberación inicial de fósforo no presentó relación alguna a los tamaños de las raíces (figura 2 a). Las raíces de < 0.5, 1-2.5 y 2.5-5 cm de diámetro fueron las que inmovilizaron una mayor cantidad de fósforo en el invierno (figura 2 a). Los valores de fósforo remanente luego de un año se ubicaron por debajo del 20 % del contenido de fósforo inicial con excepción de las raíces < 5 cm de diámetro cuyos valores fueron inferiores al 10 % (figura 2 a).

La concentración de fósforo presentó un patrón similar al fósforo remanente con una marcada disminución en los primeros 60 días de iniciado el ensayo y luego un notable aumento, particularmente en raíces < 5 cm de diámetro, en los meses invernales coincidentes con la inmovilización mencionada anteriormente. Posteriormente, los valores descienden en primavera (día 360) a niveles similares a los alcanzados a los 60 días de iniciado el ensayo (figura 2 b).

A diferencia de las cantidades remanentes, la concentración mantuvo el patrón observado al inicio del ensayo con mayores concentraciones en las raíces más finas.

El nitrógeno presentó patrones de liberación diferentes para los distintos tamaños de raíces (figura 2 c). Las raíces de 1-2.5 cm y 2.5-5 cm de diámetro mostraron una rápida inmovilización de nitrógeno del suelo en los primeros 30 días con valores 120 % y 186 % respectivamente. Por su parte, las raíces > 5 cm; 0.5-1 cm y < 0.5 cm de diámetro presentaron liberación del 30 % en el caso de las dos primeras y solo 10% en las últimas. A partir de los 30 días las raíces que inmovilizaron nitrógeno comienzan a liberarlo y por el contrario aquellas que durante el primer mes liberaron

comienzan a inmovilizar. En el caso de las raíces < 0.5 cm de diámetro, estas continúan liberando nitrógeno hasta los 60 días hasta alcanzar un 50% para posteriormente estabilizarse hasta los 240 días y liberar una pequeña proporción al finalizar el estudio. En el resto de los tamaños se verificó una inmovilización neta que en el caso de las raíces de 2.5-5 cm de diámetro resultó marcadamente elevada con un valor de 150 % por encima del contenido inicial de nitrógeno. Al año de iniciado el ensayo solo las raíces de 1-2.5 y < 0.5 cm de diámetro presentaron liberación de nitrógeno con valores de 40 % y 70 % respectivamente.

La concentración de nitrógeno en la materia seca fue en aumento desde el inicio de la experiencia, finalizando con una tendencia similar a la inicial aunque con valores de concentraciones mayores en todos los casos (figura 2 d).

El cálculo de las tasas de mineralización de fósforo mediante el ajuste del modelo exponencial resultó significativo en todos los casos con valores de varianza explicados por el modelo de 0.80 a 0.60. Las tasas anuales estimadas fueron elevadas en todos los casos con valores superiores a 4 y un máximo de 8 reflejando la movilidad de este elemento. En especial las tasas anuales de las raíces de 2.5-5 cm y < 0.5 cm fueron las de valor más elevado (tabla 3). Estos valores de K generan valores de residencia y vida media extremadamente bajos y aun los valores de 5/K superan sensiblemente, solo en dos casos, al año. Los valores observados de P mineralizado difieren de los estimados siendo de 92 % como máximo al año de iniciado el presente estudio (tabla 3).

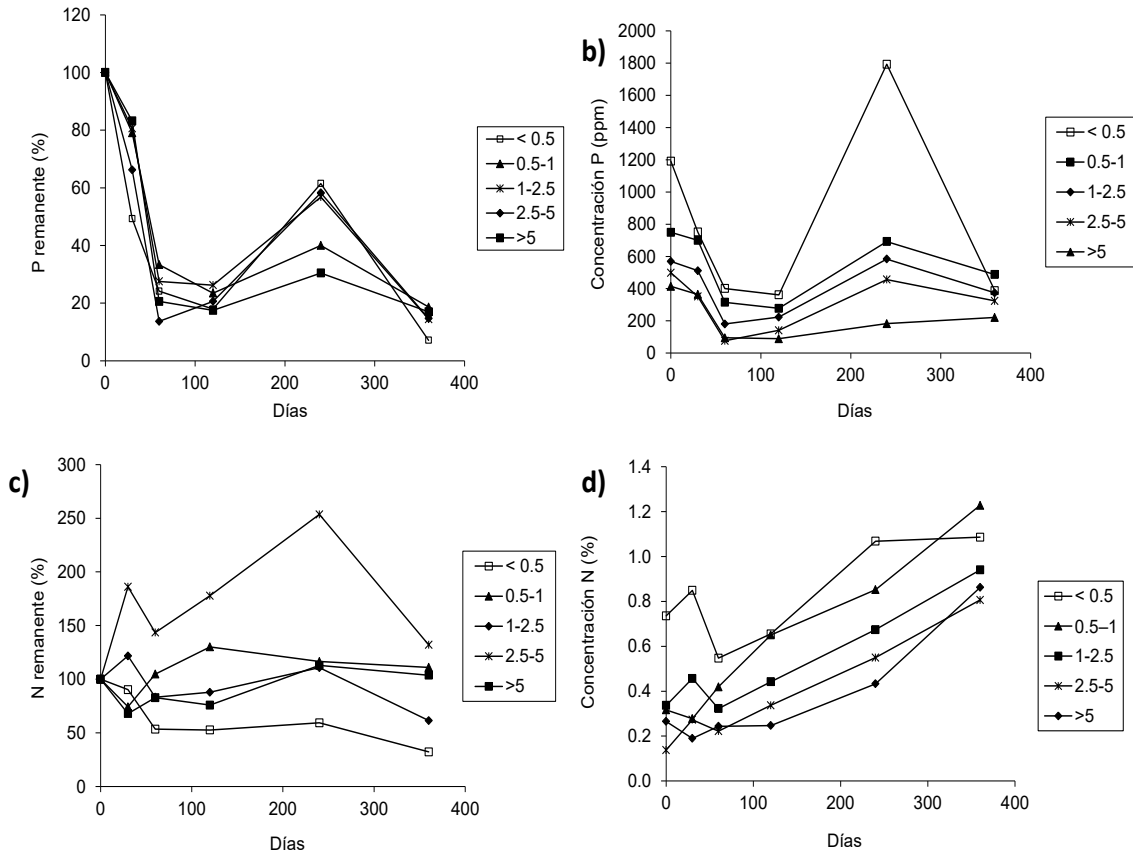


Figura 2. a) fósforo remanente (%); b) concentración de fósforo en materia seca (ppm); c) nitrógeno remanente (%) y d) concentración de nitrógeno (%) en raíces de *Pinus taeda* de diferentes diámetros.
Figure 2. a) remaining phosphorus (%); b) phosphorus concentration in dry matter (ppm); c) remaining nitrogen (%); and d) nitrogen concentration (%) in roots of different diameters of *Pinus taeda*.

Tabla 3, Valores de las tasas de mineralización de fósforo k (diaria), K (anual), 1/K (residencia), 0.693/K (vida media), 3/K (95%) y 5/K (99%) para los diferentes diámetros de raíces de *Pinus taeda*. El valor R indica la proporción de varianza explicada por el ajuste del modelo.
Table 3. Phosphorus mineralization rates k (daily), K (annual), 1/K (residence), 0.693/K (half life), 3/K (95%) and 5/K (99%) for the different diameter roots of *Pinus taeda*. The R value indicates the proportion of variance explained by the model fit.

Diámetro	% P Mineralizado	R ²	k	K	0.693/K			
					1/K	Residencia	50%	95%
>5	82.98	0.73	0.015	5.54	0.2	0.12	0.54	0.90
2.5-5	85.32	0.60	0.021	7.52	0.1	0.09	0.40	0.66
1-2.5	85.55	0.71	0.013	4.85	0.2	0.14	0.62	1.03
0.5-1	81.35	0.75	0.013	4.69	0.2	0.15	0.64	1.07
<0.5	92.90	0.80	0.022	7.81	0.1	0.09	0.38	0.64

El cálculo de la tasa de mineralización de nitrógeno resultó únicamente significativa para las raíces < 0.5 cm y 1-2.5 cm de diámetro, aunque con bajos valores de varianza explicada por el modelo. En el caso de las raíces < 0.5 cm de diámetro los valores de

residencia y vida media fueron menores al año mientras que en el caso de las raíces de 1-2.5 cm de diámetro los valores fueron de 4 y 3 años respectivamente (tabla 4).

Los valores de nitrógeno mineralizado al finalizar el estudio fueron negativos para las raíces > 5

cm, 2.5-5 cm y 0.5-1 cm de diámetro con valores de hasta -32 % lo que representa una inmovilización neta. En el caso de las raíces < 0.5 cm de diámetro el 67 % fue mineralizado mientras que en el caso de las raíces de 1-2.5 cm la cantidad mineralizada alcanzó 39 % aproximadamente (tabla 4).

La relación C/N de las raíces presentó diferentes patrones durante los primeros 60 días, a partir de los cuales desciende paulatinamente a valores similares para todos los tamaños de raíces (figura 3 a).

La relación C/P mostró un patrón más definido con un pequeño aumento en los 30 días (figura 3 b). Posteriormente, se manifiesta a los 60 días un marcado incremento en los valores correspondientes a las raíces de 2.5-5 cm y > 5 cm de diámetro mientras que en el resto de los tamaños el incremento de la relación no fue de igual magnitud. A partir de los 60 días los valores decrecen hasta los 240 días a valores por debajo de los 2000, excepto para las raíces > 5 cm que mantuvieron valores elevados. En el último periodo se verificó un pequeño aumento de los valores.

La relación N/P presentó un leve aumento durante los primeros 30 días para luego mostrar un marcado aumento a los 60 días (figura 3 c). Este marcado aumento se verificó en las raíces más gruesas mientras que las más finas presentaron aumentos hasta los 120 días inclusive para luego descender hasta los 240 días. En el caso de las raíces > 5 cm de diámetro, la

disminución de los valores no se verificó. A los 360 días los valores aumentaron considerablemente, resultando las raíces > 5 cm con valores de 40 aproximadamente en la relación N/P, mientras que el resto de los tamaños presentaban valores entre 20 y 25.

Las correlaciones entre la pérdida de peso seco en cada extracción y la concentración inicial de nitrógeno y fósforo y el tamaño de las raíces muestran que hasta los 60 días la correlación es alta para las tres variables, siendo la concentración inicial de fósforo y el tamaño de las raíces las que presentaron la mayor relación con la pérdida de peso o tasa de descomposición (tabla 5). La relación disminuye hasta los 240 días siendo el tamaño la variable que presentó la relación más estrecha con la pérdida de peso. Las relaciones resultaron no significativas para el último periodo para todas las variables.

Por otra parte la relación C/P resultó más estrechamente correlacionada a la pérdida de peso en comparación a la relación C/N y N/P. Durante el último periodo de incubación entre los 240-360 días, al igual que las concentraciones de los elementos analizados y el tamaño de las raíces, las relaciones resultaron no significativas (Tabla 5).

Tabla 4. Valores de las tasas de mineralización de nitrógeno k (diaria), K (anual), 1/K (residencia), 0.693/K (vida media), 3/K (95%) y 5/K (99%) para los diferentes diámetros de raíces de *Pinus taeda*. El valor R indica la proporción de varianza explicada por el ajuste del modelo.

Table 4. Nitrogen mineralization rates k (daily), K (annual), 1/K (residence), 0.693/K (half life), 3/K (95%) and 5/K (99%) for the different diameter roots of *Pinus taeda*. The R values indicates the proportion of variance explained by the model fit.

Diámetro	% N Mineralizado	R ²	k	K	1/K	0.693/K	3/K	5/K
					Residencia	50%	95%	99%
>5	-3.67	0.0	0.0004	0.13	7.9	5.5	23.6	39.4
2.5-5	-32.05	0.0	-	-	-	-	-	-
1-2.5	38.60	0.3	0.0007	0.24	4.2	2.9	12.5	20.8
0.5-1	-11.00	0.16	-	-	-	-	-	-
<0.5	67.77	0.26	0.0036	1.30	0.8	0.5	2.3	3.8

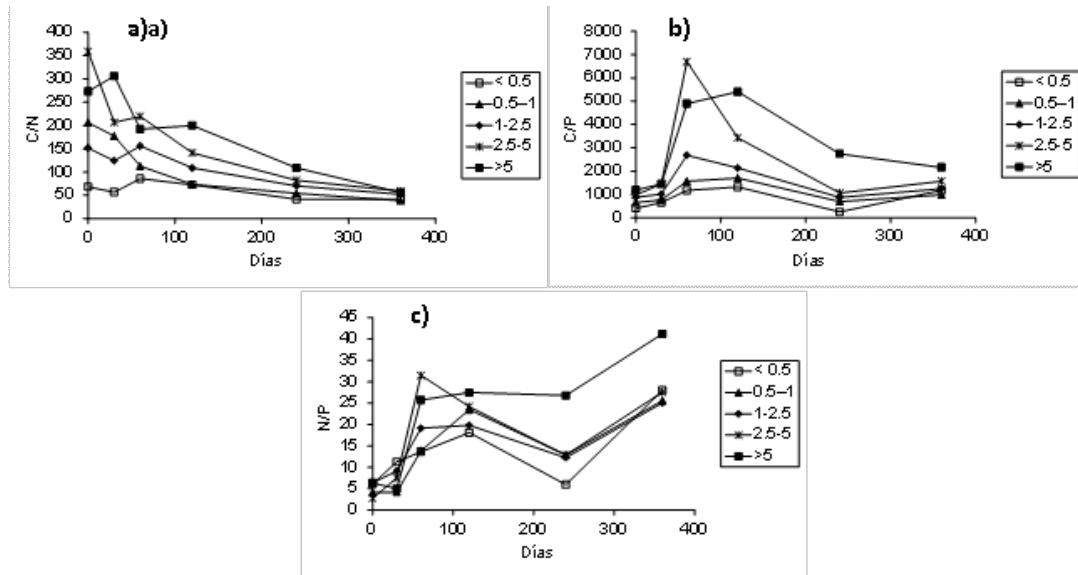


Figura 3. a) Relación C/N, b) Relación C/P y c) Relación N/P en raíces de *Pinus taeda* de diferentes diámetros durante los diferentes períodos de incubación.

Figure 3. a) C/N ratio, C/P ratio and N/P ratio in different diameter roots of *Pinus taeda* in incubation periods.

Tabla 5. Correlación de Pearson entre la tasa de descomposición diaria (%) y las concentraciones de N (%), P (ppm), el tamaño de las raíces (cm) y las relaciones de las concentraciones de los elementos analizados C/N, C/P y N/P en raíces de *Pinus taeda* para cada período de extracción.

Table 5. Pearson correlation between the daily decomposition rate (%) and N concentrations (%), P (ppm), the size of the roots (cm) and the ratios of the concentrations of the analyzed elements C / N, C / P and N / P in roots of *Pinus taeda* for each extraction period.

	Tasa Diaria Descomposición (%)				
	30	60	120	240	360
Diámetro	-0.92 **	-0.93 **	-0.77 **	-0.70 **	-0.22 ns
P	0.92 **	0.96 **	0.68 **	0.62 *	0.26 ns
N	0.85 **	0.87 **	0.56 *	0.51 *	0.20 ns
C/N	-0.80 **	-0.77 **	-0.60 *	-0.54 *	-0.20 ns
C/P	-0.92 **	-0.95 **	-0.77 **	-0.68 **	-0.29 ns
N/P	-0.22 ns	-0.17 ns	-0.01 ns	-0.04 ns	-0.06 ns

Significancia del coeficiente de correlación de Pearson, *p < 0.05; ** p < 0.01; ns: no significativo; n: 15

DISCUSIÓN

Concentración inicial de Fósforo y Nitrógeno

Las concentraciones de nitrógeno resultaron similares, mayores o menores a las mencionadas por diferentes autores. SILVER y MIYA (2001) reportan concentraciones de nitrógeno levemente mayores con valores de 0.88 % y 0.54 % en raíces finas. ARUNACHALAM et al. (1996) menciona valores de

1.18-0.74 % en raíces finas de especies latifoliadas tropicales al igual que los valores de 0.88-0.60 % reportados por CAMIRÉ et al. 1991 para el caso de raíces menores a 1 cm de especies latifoliadas. En cambio, JOHN et al. (2002) reportan valores similares en raíces finas de *Pinus kesiya* Royle Ex. Gordon mientras que SCHEU y SCHAUERMANN (1994) mencionan valores inferiores con concentraciones de 0.52-0.69 % en raíces finas y 0.42-0.25% en raíces mayores a 1 cm de diámetro para especies latifoliadas.

En el caso del fósforo, los valores de concentración son mayores que los reportados para coníferas por SILVER y MIYA (2001), JOHN et al. (2002) para *Pinus kesiya* con y ARUNACHALAM et al. (1996) con valores cercanos a las 600 ppm. Sin embargo, GORDON y JACKSON (2000) mencionan valores promedios de 920 ppm en raíces finas. Estos valores son similares a las 900 ppm reportadas por ADAMS et al. (1987) en raíces finas de *Pinus taeda* en suelos ricos en nutrientes en EEUU.

Posiblemente, el suelo pueda influir sobre la concentración de fosforo principalmente. Por tratarse de un Entisol, la disponibilidad de fosforo es alta respecto a otros suelos de la región (MARTIARENA et al. 2014), pudiendo generar un consumo de lujo de este elemento por parte de las plantas y determinando las altas concentraciones aquí presentadas.

Pérdida de peso seco

Los valores estimados de la tasa de descomposición K de los diferentes tamaños resultaron superiores a los mencionados por diferentes autores. KING et al. (1997) determinaron valores diarios de 0.0016-0.0018 para raíces finas y un valor de 0.0010 para raíces mayores a 1 cm de diámetro. SILVER y MIYA (2001) mencionan valores anuales globales de 0.69 en raíces menores a 2 mm de diámetro y valores 0.20 para raíces mayores a 5 mm de diámetro. YANG et al. (2004) estimaron valores diarios de 0.002-0.0040 para una especie de conífera y una latifoliada en el subtropical de china. Aun comparando con estudios realizados en zonas tropicales, los valores estimados en este trabajo son superiores al valor anual de 0.88 determinado por JOHN et al. (2002). Únicamente el valor anual de 1.8 encontrado por ARUNACHALAM et al. (1996) para raíces finas fue superior al aquí presentado.

Al finalizar el estudio, todos los tamaños perdieron al menos un 70 % del peso inicial reflejando la dinámica de la descomposición de las raíces de *Pinus taeda* en estos sistemas. Los valores de $3/K$ y $5/K$ reflejarían la resistencia de los tejidos restantes, los cuales posiblemente sean más ricos en lignina y otros componentes de lenta descomposición por parte de microorganismos. Es importante mencionar que se observó una activa presencia de micro y mesofauna del suelo interviniendo en la descomposición de las raíces, evidenciado en el caso de la mesofauna por galerías en el interior de las mismas.

La pérdida de peso seco marcó diferencias en el patrón presentado por las raíces finas y gruesas respectivamente. Es posible observar una rápida disminución en los primeros 30 días atribuibles a procesos de lixiviación de compuestos solubles y la utilización por parte de microorganismos de compuestos energéticos de rápida degradación. A partir de este momento las tasas disminuyeron posiblemente debido a la presencia de compuestos de difícil degradación como lignina y celulosa. Sin embargo, las raíces más finas

mantuvieron una tasa más lenta pero constante mientras que las raíces más gruesas presentaron un patrón cambiante. Estos patrones podrían estar determinados por la influencia de las micorrizas en el proceso de descomposición de la materia orgánica del suelo. En este sentido, diferentes estudios han demostrado el rol de las micorrizas en la descomposición de la materia orgánica del suelo como organismos descomponedores (HODGE et al. 2001, LINDAHL et al. 2006, MOSCA et al. 2007, TALBOT et al. 2008) o como condicionantes en el proceso debido a la formación de sus paredes celulares o por la formación de compuestos secundarios de difícil descomposición (LANGLEY y HUNGATE 2003; LANGLEY et al. 2006). En especial las ectomicorrizas jugarían un rol fundamental en la descomposición de las raíces finas mientras que las micorrizas arbusculares no generarían efectos negativos sobre la tasa de descomposición de las raíces finas (LANGLEY y HUNGATE 2003). Sin embargo, FAN y GUO (2010) asignan un rol similar a las micorrizas arbusculares principalmente por la formación de compuestos carbonados de baja calidad. Si bien las ectomicorrizas generalmente están asociadas a bosques templados, GIACHINI et al. (2004) encontraron importantes asociaciones de ectomicorrizas en plantaciones de *Pinus taeda* al sur de Brasil y por lo tanto sería posible que estos hongos intervengan en el proceso de descomposición de raíces en el presente estudio. Por otra parte, ARUNACHALAM et al. (1996) encontraron fluctuaciones estacionales debidas a cambios de la precipitación y temperatura en India en coincidencia con diferentes autores que encontraron influencia de estos factores sobre las tasas de descomposición de raíces.

La concentración inicial de elementos como el nitrógeno y fósforo y compuestos estructurales son mencionados como determinantes de las tasas de descomposición (LAMBERS et al. 1998, OSTERTAG y HOBBIE 1999, YANG et al. 2004) mientras que otros mencionan al tamaño como condicionante de las mismas (KING et al. 1997).

En el presente estudio tanto el fósforo como el tamaño de las raíces resultaron las variables que mayor relación con la pérdida de peso presentaron durante los primeros meses para posteriormente ser el tamaño la variable más relacionada. Esta relación inicial, la alta concentración de fosforo y la característica del suelo podría explicar la alta tasa de descomposición exhibida por la raíces en este estudio.

Por otra parte, la relación C/P resultó ser la que más influyó sobre la tasa de descomposición, posiblemente debido a la alta correlación entre el fósforo y la tasa de descomposición.

Mineralización de Fósforo y Nitrógeno

El fósforo exhibió una rápida liberación durante el primer año con valores de más de 80 % de fósforo mineralizado a los 360 días. Estos valores como así también los valores de K estimados resultan claramente

superiores a los reportados por otros estudios (ARUNACHALAM et al. 1996, KING et al. 1997, OSTERTAG y HOBBIE 1999, YANG et al. 2004).

La rápida liberación del fósforo durante las primeras etapas del estudio pueden deberse principalmente a lixiviación aunque se verifica una marcada inmovilización en los meses de invierno. Este comportamiento coincide con lo reportado por ARUNACHALAM et al. (1996) y JOHN et al. (2002). Por su parte MOSCA et al. (2007) encontraron que ectomicorrizas aumentaron la actividad enzimática en el suelo de un bosque sometido a raleo durante los meses de invierno y lo atribuyeron a la actividad saprofítica de las micorrizas durante la época de menor crecimiento de los arboles hospederos. Por lo tanto, esta actividad de las micorrizas podría generar la inmovilización del fósforo como parte de sus componentes estructurales, en especial en las raíces de menor tamaño.

Los valores estimados de la tasa de mineralización son marcadamente superiores a los valores mencionados para raíces en zonas templadas (KING et al. 1997) y aun para zonas tropicales. ARUNACHALAM et al. (1996) reportan valores de 0.58-1.13 para raíces de bosques subtropicales mientras que JOHN et al. (2002) reportan valores de 1.25-1.61 para *Pinus kesiya* en India. Sin embargo, estas altas tasas son similares a las encontradas para el mantillo de cultivos en zonas tropicales (COBO et al. 2004). Las tasas de mineralización estimadas podrían originarse en parte por la fuerte liberación producida en el período de lixiviación, que en este caso resultó elevada, y la posterior actividad microbiana inducida por los altos contenidos de fósforo en las raíces de esta especie. Esta liberación de fósforo podría representar una fuente importante de este elemento para las plantas remanentes. VAN LEAR et al. (2000) encontraron aumentos en la productividad de *Pinus taeda* relacionada a la descomposición de raíces luego de la corta de individuos maduros, principalmente debido a la utilización por parte de las raíces vivas de los espacios ocupados por las raíces en descomposición y la liberación de nutrientes provenientes de las mismas. MOSCA et al. (2007) encontraron una rápida respuesta enzimática de las micorrizas asociadas con árboles luego de una intervención de raleo. Las micorrizas poseen la capacidad de extraer fósforo de las raíces senescentes, particularmente de tejidos de difícil descomposición para otros microorganismos como las paredes celulares de las propias micorrizas que son de difícil descomposición y ricas en fósforo (LANGLEY y HUNGATE 2003). La escasa disponibilidad de fósforo en los suelos de la zona refleja la importancia de fuentes de este elemento para el desarrollo y crecimiento de las plantas en los sistemas productivos de la región y el rol que pueden jugar las raíces de *Pinus taeda* en descomposición dentro de los mismos.

En el caso del nitrógeno, el comportamiento de los diferentes tamaños resulto errático. En líneas generales, las raíces significaron un sumidero de nitrógeno ya que fue inmovilizado e incluso tomado del

suelo, excepto para el caso de las raíces más finas que presentaron mineralización neta del mismo durante el período en estudio. Si bien la mayoría de los estudios reflejan mineralización neta de nitrógeno (ARUNACHALAM et al. 1996, OSTERTAG y HOBBIE 1999, SCHEFFER y AERTS 2000, JOHN et al. 2002, YANG et al. 2004, TRIPATHI et al. 2006; FAN y GUO 2010), las tasas de mineralización y la inmovilización coincide con diversos autores que encontraron marcadas inmovilizaciones de nitrógeno durante la descomposición de raíces (SCHEU y SCHAUERMANN 1994, OSTERTAG y HOBBIE 1999, GUO et al. 2006). Por otra parte, CAMIRÉ et al. (1991) encontraron que raíces ricas en nitrógeno presentaban menores tasas de descomposición y una mayor inmovilización de nitrógeno debido a la formación de compuestos derivados de lignina y nitrógeno. Como se mencionó anteriormente, las micorrizas jugarían un rol fundamental en la mineralización de este elemento. FAN y GUO (2010) encontraron que raíces de menor tamaño y con presencia de micorrizas, con baja relación C/N o ricas en N presentaban bajas tasas de mineralización. En contraste, la descomposición de raíces de mayor tamaño y con compuestos de C lábiles, pero menos ricas en N, presentaron mayores tasas de descomposición e inmovilizaciones periódicas de N. Esto indicaría que tejidos con bajas concentraciones de nitrógeno deberían descomponerse más rápidamente que aquellos con altas concentraciones, situación que no se verificó en este estudio. En particular, los valores de C/N encontrados en el presente estudio se contraponen a lo mencionado ya que solo las raíces que presentaron las relaciones más bajas liberaron nitrógeno mientras que, aquellos tamaños con valores altos y por lo tanto menos ricos en nitrógeno, presentaron inmovilización neta de este elemento. Posiblemente el tamaño de las raíces estudiadas en el presente trabajo, al ser mayor que los estudios citados, presenten una descomposición y mineralización de N atribuible a la actividad saprofítica de las micorrizas sobre tejidos no colonizados antes de la senescencia y por lo tanto reflejaría la influencia de las micorrizas luego de un raleo de acuerdo con MOSCA et al. (2007). De esta manera, la descomposición y mineralización de los tejidos más jóvenes y ricos en N presentaría mayores tasas que los tejidos maduros y pobres en este elemento.

En el caso del N se verifica una inmovilización invernal sobre las raíces de mayor tamaño que podría indicar una rápida mineralización del N en las raíces de menor tamaño, coincidente con una rápida tasa de descomposición, mientras que en las raíces mayores el proceso de descomposición demandaría una mayor inmovilización del N en las estructuras de las micorrizas.

CONCLUSION

Las raíces de *Pinus taeda* presentaron elevadas tasas de descomposición y por lo tanto representarían un

sumidero de carbono muy dinámico dentro de los sistemas silvopastoriles. Las raíces en descomposición pueden significar una fuente directa de nutrientes para las plantas remanentes, especialmente para el fósforo que resulta el elemento limitante en los suelos de la región, mientras que en el caso del nitrógeno las raíces jugarían un papel importante en la retención del mismo.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen al Ing. Jorge Ranger y Ranger Maderas, por facilitar el sitio y personal de apoyo para llevar a cabo el presente estudio. El trabajo fue financiado parcialmente mediante el proyecto INTA, PAN 1991.

BIBLIOGRAFIA

ADAMS M. B., Campbell R. G., Allen H. L., Davey C. B., 1987. Root and Foliar Nutrient Concentrations in Loblolly Pine: Effects of Season, Site, and Fertilization. *Forest Science*. 33, pp. 984-996.

ARUNACHALAM A., Pandey H.N., Tripathi R.S., Maithani K., 1996. Fine root decomposition and nutrient mineralization patterns in a subtropical humid forest following tree cutting. *Forest Ecology and Management*. 86, pp 141-150.

CAIRNS M.A., Brown S., Helmer E.H., Baumgardner G.A., 1997. Root biomass allocation in the world's upland forests. *Oecologia*. 111, pp 1-11.

CAMIRÉ C., Côte B., Brulotte S., 1991. Decomposition of roots of black alder and hybrid poplar in short-rotation plantings: Nitrogen and lignin control. *Plant and Soil*. 138, pp 123-132.

COBO J.G., Barrios E., Kass D.C.L., Thomas R.J., 2002. Decomposition and nutrient release by green manures in a tropical hillside agroecosystem. *Plant and Soil*. 240, pp 331-342.

CHAPIN III S.F., Matson P.A., Mooney H.A., 2002. *Principles of terrestrial ecosystem ecology*. Springer Verlag, New York, USA. 436 pp.

CHEN H., Harmon M.E., Griffiths R.P., 2001. Decomposition and nitrogen release from decomposing woody roots in coniferous forests of the Pacific Northwest: a chronosequence approach. *Canadian Journal of Forest Research*. 31, pp 246-260.

FAHEY J., Hughes W., PU M., Arthur A., 1988. Root Decomposition and Nutrient Flux Following Whole-Tree Harvest of Northern Hardwood Forest. *Forest Science*. 34, pp 744-768.

FAN P., Guo D., 2010. Slow decomposition of lower order roots: a key mechanism of root carbon and

nutrient retention in the soil. *Oecologia*. 163, pp 509-515.

GIACHINI A.J., Souza L.A.B., Oliveira V.L., 2004. Species richness and seasonal abundance of ectomycorrhizal fungi in plantations of *Eucalyptus dunnii* and *Pinus taeda* in southern Brazil. *Mycorrhiza*. 14, pp 375-381.

GUO L.B., Halliday M.J., Gifford R.M., 2006. Fine root decomposition under grass and pine seedlings in controlled environmental conditions. *Applied Soil Ecology*. 33, pp 22-29.

HODGE A., Campbell C.D., Fitter A.H., 2001. An arbuscular mycorrhizal fungus accelerates decomposition and acquires nitrogen directly from organic material. *Nature*. 413, pp 297-299.

INTA, 1990. Atlas de suelos de la República Argentina. Tomo II. Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria. Buenos Aires, Argentina. pp 111-154.

JOHN B., Pandey R.S., Tripathi R.S., 2002. Decomposition of fine roots of *Pinus kesiya* and turnover of organic matter, N and P of coarse and fine pine roots and herbaceous roots and rhizomes in subtropical pine forest stands of different ages. *Biology and Fertility of Soils*. 35, pp 238-246.

KING J.S., Allen H.L., Dougherty P., Strain B.R., 1997. Decomposition of roots in loblolly pine: Effects of nutrient and water availability and root size class on mass loss and nutrient dynamics. *Plant and Soil*. 195, pp 171-184.

LAMBERS H., Chapin III F.S., Pons T.L., 1998. *Plant physiological ecology*. Springer Verlag, New York. 540 p.

LANGLEY A.J., Hungate B.A., 2003. Mycorrhizal controls on belowground litter quality. *Ecology*. 84, pp 2302-2312.

LANGLEY J.A., Chapman S.K., Hungate B.A., 2006. Ectomycorrhizal colonization slows root decomposition: the post-mortem fungal legacy. *Ecological Letters*. 9, pp 955-959.

LINDAHL B.D., Ihrmark K., Boberg J., Trumbore S.E., Höglberg P., Stenlid J., Finlay R.D., 2006. Spatial separation of litter decomposition and mycorrhizal nitrogen uptake in a boreal forest. *New Phytologist*. 173, pp 611-620.

MILLER A.T., Allen H.L., Maier C.A., 2006. Quantifying the coarse-root biomass of intensively managed loblolly pine plantations. *Canadian Journal of Forest Research*. 36, pp 12-22.

MOSCA E., Montecchio L., Scattolina L., Garbaye J., 2007. Enzymatic activities of three ectomycorrhizal types of *Quercus robur* L. in relation to tree decline and thinning. *Soil Biology and Biochemistry*. 39, pp 2897-2904.

MOTULSKY H.J., Ransnas L.A., 1987. Fitting curves to data using nonlinear regression: a practical and nonmathematical review. *Journal of the Federation of American Societies for experimental Biology*. 1, pp 365-374.

OLSON J.S., 1963. Energy storage and the balance of producers and decomposers in ecological systems. *Ecology*. 44, pp 322-331.

OSTERTAG R., Hobbie S.E., 1999. Early stages of root and leaf decomposition in Hawaiian forests: effects of nutrient availability. *Oecologia*. 121, pp 564-573.

ROBERTSON G.P., Paul E.A., 2000. Decomposition and soil organic matter dynamics. En: *Methods in ecosystem science*. Sala O.E., Jackson R.B., Mooney H.A., Howarth R.W. Springer Verlag. New York. Pp 104-116.

SCHEFFER R.A., Aerts R., 2000. Root decomposition and soil nutrient and carbon cycling in two temperate fen ecosystems. *Oikos*. 91, pp 541-549.

SCHEU S., Schauer mann J., 1994. Decomposition of roots and twigs: Effects of wood type (beech and ash), diameter, site of exposure and macrofauna exclusion. *Plant and Soil*. 163, pp 13-24.

SILVER W.L., Miya R.K., 2001. Global patterns in root decomposition: comparisons of climate and litter quality effects. *Oecologia*. 129, pp 407-419.

SOIL SURVEY STAFF, 2010. *Keys to Soil Taxonomy*. Agriculture Handbooks 436, Eleventh Edition. NRCS, Washington DC, USA.

TALBOT J.M., Allison S.D., Treseder K.K., 2008. Decomposers in disguise: mycorrhizal fungi as regulators of soil C dynamics in ecosystems under global change. *Functional Ecology*. 22, pp 955-963.

TRIPATHI S.K., Sumida A., Shibata H., Ono K., Uemura S., Kodama Y., Hara T., 2006. Leaf litterfall and decomposition of different above- and

belowground parts of birch (*Betula ermanii*) trees and dwarf bamboo (*Sasa kurilensis*) shrubs in a young secondary forest in Northern Japan. *Biology and Fertility of Soils*. 43, pp 237-246.

VAN LEAR D.H., Kapeluck P.R., Carroll W.D., 2000. Productivity of loblolly pine as affected by decomposing root systems. *Forest Ecology and Management*. 138, pp 435-443.

YANG Y., Chen G., Guo J., Lin P., 2004. Decomposition dynamic of fine roots in a mixed forest of *Cunninghamia lanceolata* and *Tsoongiodendron odorum* in mid-subtropics. *Annals of Forest Science*. 61, pp 65-72.

ZAR J.H., 1999. *Biostatistical Análisis*. Prentice Hall. New Jersey.USA. 663 pp.