

Impacto de la cosecha y destino de los residuos sobre la estabilidad del capital de nutrientes en plantaciones de *Pinus taeda* L.

JUAN F GOYA^{1,2,✉}, CAROLINA PÉREZ¹, JORGE L FRANGI¹ & ROBERTO FERNÁNDEZ³

¹ Fac. de Ciencias Agrarias y Forestales, Fac. de Ciencias Naturales y Museo, UNLP, La Plata, Argentina

² Instituto de Fisiología Vegetal, Fac. de Ciencias Agrarias y Forestales, UNLP, La Plata, Argentina

³ EEA INTA Montecarlo, Montecarlo, Fac. de Ciencias Forestales. UNAM. Eldorado. Misiones, Argentina

RESUMEN. El presente trabajo evalúa el contenido de nutrientes en la biomasa aérea de plantaciones de *Pinus taeda* del norte de Misiones al turno de cosecha, y simula el impacto de tres escenarios de manejo sobre la estabilidad del capital de nutrientes del ecosistema (nutrientes exportados/nutrientes del suelo): (1) cosecha de productos comerciales (fustes con corteza hasta 5 cm de diámetro) y conservación de los residuos, (2) cosecha y retiro de todo el material aéreo producido por la plantación (extracción del árbol completo), y (3) cosecha de productos comerciales y quema de los residuos. Las masas minerales aéreas (incluyendo mantillo) totales por hectárea fueron: 194 Mg de C, 1018 kg de N, 480 kg de Ca, 335 kg de K, 97 kg de Mg y 42 kg de P. De ellas, la fracción mayoritaria correspondió a la biomasa aérea (C: 95%, N: 83%, Ca: 88%, K: 94%, Mg: 91% y P: 79%). El P y el K fueron los nutrientes que mostraron la menor estabilidad nutritiva bajo los tres escenarios. El tipo de cosecha menos conservativo (extracción del fuste y quema de residuos) impacta negativamente sobre la estabilidad nutritiva 1.4 veces (para K, Ca y Mg), 1.8 veces (para N) y 2.3 veces (para P) más que el tipo más conservativo (cosecha de solo el fuste). Suponiendo que la reposición neta espontánea de nutrientes al suelo es insignificante y que no se fertiliza, la práctica de cosecha más extractiva reduciría las cantidades de esos nutrientes a corto plazo, alcanzándose límites críticos de estabilidad para el P y K en aproximadamente dos rotaciones. Si se continúa con el manejo actual, nuestros resultados indican la imposibilidad de sostener las elevadas tasas de producción actuales en futuras rotaciones.

[Palabras clave: plantaciones subtropicales, coníferas, índice de estabilidad nutritiva, Misiones]

ABSTRACT. Harvesting effects and residue fate on nutrient stability of *Pinus taeda* L. plantations: This paper reports on the aboveground nutrient content at rotation time in *Pinus taeda* plantations of northern Misiones province, and assess the impact of three simulated harvest strategies on nutrient stability (exported nutrients/nutrients in soil): (1) harvest of marketable products (stems with bark up to 5 cm diameter) and slash abandonment on the site, (2) harvest and withdrawal of all the standing aboveground biomass (whole tree utilization), and (3) harvest of marketable products and slash burning in situ. The aboveground biomass plus litter mineral content per hectare was: 194 Mg for C, 1018 kg for N, 480 kg for Ca, 335 kg for K, 97 kg for Mg and 42 kg for P. Of these, 95% (C), 83% (N), 88% (Ca), 94% (K), 91% (Mg), and 79% (P) were in the aboveground biomass. P and K showed the most unbalanced budget (highest stability index) under the three scenarios. The least conservative harvest type (harvest of marketable products and slash burning) negatively impacted on nutrient stability by a factor of 1.4 (K, Ca and Mg), 1.8 (N), and 2.3 (P) times more than the most conservative one (stem harvest only). Assuming that the rate of spontaneous net reposition of nutrients to the soil within the time frame of a given rotation cycle is non-significant, and that fertilisers are not added, the most extractive harvest practice will reduce the exchangeable nutrient stock in the short-term, attaining critical thresholds of the

✉ LISEA. Facultad de Ciencias Agrarias y Forestales Facultad de Ciencias Naturales y Museo, UNLP. CC 31, 1900 La Plata, Argentina. jgoya@ceres.agro.unlp.edu.ar

Recibido: 25 de abril de 2002; Fin de arbitraje: 30 de julio de 2002; Revisión recibida: 26 de febrero de 2003; Aceptado: 7 de marzo de 2003

nutritive stability index for P and K in about two rotations. With actual management practices, these observations put uncertainties in the sustainability of the currently high rates of production of these forest crops.

[Keywords: subtropical plantations, conifers, nutrient stability index, Misiones, harvest nutrient budget]

INTRODUCCIÓN

El efecto de la cosecha de productos forestales sobre la productividad de los suelos en rotaciones sucesivas ha adquirido una singular atención en los últimos años (Hopmans et al. 1993; Gonçalves et al. 1997; Wei et al. 2000). En especial, resulta de importancia establecer criterios e indicadores cuantitativos de impacto ambiental de distintos manejos de las reforestaciones y predecir las consecuencias sobre la productividad y el rendimiento de rotaciones futuras. Según el tipo de cosecha, esta actividad puede provocar una disminución de la productividad cercana al 20% en cada ciclo de sucesivas rotaciones (Wei et al. 2000). Asimismo, se sabe que las prácticas de post-cosecha tales como el apilado en escolleras y la quema de residuos causan pérdida de materia orgánica y de nutrientes, en particular de nitrógeno (Flinn et al. 1980; Fernández et al. 2000a). En Argentina, de unas 500000 ha forestadas con especies de coníferas (principalmente *Pinus* spp.), aproximadamente el 56% están localizadas en la Mesopotamia. Esta superficie se halla actualmente en franca expansión, y solo en Misiones se plantaron aproximadamente 91000 ha en el año 1999 (SAGPyA 2001).

Las coníferas en general, y los pinos en particular, han sido tradicionalmente considerados poco exigentes en sus requerimientos de nutrientes y fertilidad del suelo (Pritchett & Comerford 1981). Sin embargo, se han obtenido marcados incrementos en productividad al mejorar el estado nutritivo de plantaciones de *Pinus elliottii* y *Pinus taeda* en el sudeste de Estados Unidos (Dalla Tea & Jokela 1991) y en el noreste de Argentina con fertilización inicial con fósforo (Fernández et al. 2000b). Esto lleva a pensar que, en sitios con buena disponibilidad de nutrientes, ambas especies, de amplio cultivo en Misiones, podrían aumentar sus requerimientos y su masa mineral con mayores efectos sobre la exportación de nutrientes con la cosecha.

El uso forestal continuo puede reducir la calidad del sitio y disminuir la productividad, principalmente debido a la exportación de nutrientes provocada por el aprovechamiento en turnos de corte posiblemente menores a la rotación ecológica (Kimmmins 1974). La implementación de prácticas de silvicultura sostenible requiere, por tanto, conocer el destino de los nutrientes en la plantación y los efectos extractivos de la cosecha.

El objetivo de este estudio consistió en determinar el contenido de nutrientes en diferentes compartimentos de la biomasa aérea, mantillo y suelo de plantaciones de *Pinus taeda* del norte de Misiones, con edad de turno de cosecha, y evaluar el impacto de tres escenarios de cosecha/post-cosecha sobre el capital de nutrientes del ecosistema. Se concluye que aquellas prácticas que dejan en el terreno los residuos con mayor concentración de nutrientes y eliminan la práctica de quema mejoran la estabilidad nutritiva y la sustentabilidad ecológica de las plantaciones.

MÉTODOS

Área de estudio

Se ubica en el Campo Anexo Manuel Belgrano (20°04'S; 53°45'O, 565 m.s.n.m.), de la Estación Experimental Agropecuaria INTA Montecarlo, San Antonio, provincia de Misiones. La temperatura promedio anual es de 20.7°C, (oscilando entre 25.2-14.8°C). La precipitación promedio anual es de 2108 mm, con un régimen de distribución isohigro (INTA 2000). El suelo es rojo, pertenece al gran grupo de los Kandudultes, de buen drenaje (clase 4), con profundidad efectiva superior a los 2.5 m, libre de fragmentos gruesos. La secuencia de horizontes es A, AB, B1, B2, B3, y continúa. La textura es arcillosa en todo el perfil. La estructura es granular y de bloques sub-angulares en superficie; en el AB y B1 predominan bloques medios a gruesos y, a partir del B2, prismas y bloques.

Hay concreciones en el B2 y el B3. Las raíces son abundantes hasta los 70 cm, y escasas a mayor profundidad.

Parcelas

Se instalaron tres parcelas de 600 m², una en cada una de tres plantaciones de *Pinus taeda* L. de 20 años de edad, con una distancia original de plantación de 2.5 x 2.5 m (= 1600 individuos/ha), sin raleo. En cada parcela se midió el DAP (diámetro del tronco a 1.3 m de altura) con cinta diamétrica, y la altura total de los individuos con clinómetro.

Peso de árboles y biomasa aérea

El peso de los árboles se obtuvo mediante técnicas de análisis dimensional (Whittaker & Woodwell 1968). Se apearon 20 individuos comprendidos en el rango de distribución diamétrica existente en las parcelas. El material se separó en los siguientes compartimentos: (1) fuste hasta 5 cm de diámetro, (2) ramas entre 1-5 cm, (3) ramas menores a 1 cm, (4) acículas, (5) ramas del año, y (6) conos. Alícuotas del material fueron secadas a estufa a 70°C hasta peso constante para la estimación del peso seco. El porcentaje de corteza se determinó mediante el peso con y sin corteza de secciones del fuste de distintos diámetros (>5 cm). Se establecieron relaciones alométricas entre el peso seco de cada compartimento y del total vs. DAP, DAP², altura o alguna combinación de ellas y transformación logarítmica (Crow 1988). Para obtener las ecuaciones de peso seco y sus estadísticos se utilizaron técnicas de Regresión Lineal Simple y la Prueba de *F* al 95% de significación. Se seleccionaron las ecuaciones con altos valores de *r*² y menores valores de *E* (Whittaker & Woodwell 1968). La biomasa de cada parcela fue estimada mediante la aplicación de las ecuaciones alométricas a cada individuo de la parcela, seguido de la sumatoria de todos los pesos obtenidos (Baskerville 1965).

Muestreo de suelos

El muestreo se dividió en mantillo y suelo mineral. La necromasa de mantillo fino (incluye hojas, fragmentos de corteza, frutos y ramas de hasta 1 cm de diámetro) fue esti-

mada a partir de los resultados obtenidos en dos muestreos correspondientes a verano e invierno, respectivamente. En cada estación y parcela se tomaron submuestras de 0.25 m², 10 de la capa L y 5 de las capas L + F (total: 45); las mismas se distribuyeron al azar en cada parcela. Para los horizontes minerales, en el mes de noviembre de 1999 se tomaron tres muestras compuestas por parcela y por profundidad, 0-10, 10-30 y 50-100 cm (*n* = 9 para cada profundidad). También se tomaron muestras cilíndricas verticales de suelo (354 cm³) a las mismas profundidades para determinar la densidad aparente.

Análisis químicos y contenido de nutrientes

Una alícuota de cada uno de los compartimentos de biomasa considerados de cinco árboles seleccionados en función de las distribuciones diamétricas en las tres parcelas (total: 15 por compartimento) fue analizada químicamente para obtener las concentraciones de los macronutrientes (N, P, K, Ca y Mg). Idéntico procedimiento se realizó con los compartimentos del mantillo. Alícuotas de las muestras de origen vegetal fueron secadas en estufa a 70°C hasta peso constante, molidas con molino tipo Wiley, tamizadas con malla 20 y digeridas en medio ácido (HNO₃ concentrado y H₂O₂ al 30%; Luh Huang & Schulte 1985). Otras alícuotas fueron incineradas en microondas a 500°C para la determinación del contenido de cenizas totales. Las muestras de suelo fueron secadas al aire y tamizadas con malla de 2 mm antes de ser analizadas químicamente. El Ca y Mg disponibles del suelo fueron extraídos con KCl 1N, empleando un extractor mecánico de vacío Centurion-Model 24. Para el P y K intercambiable se empleó el método de Olsen EDTA (NH₄NaHCO₃) (Hunter 1982). La concentración de P, K, Ca y Mg en las soluciones de digestión y extractos de suelo (incluidos Na, Mn, Fe y Al) fueron determinados con un espectrómetro de emisión de plasma Beckman Spectra-Span V. La concentración de C, S y N totales se analizó mediante el método de combustión seca (LECO 1993), usando un LECO CNS-2000, según recomendaciones de Tabatabai & Bremner (1991). El N disponible se estimó como el 10% del N total (Fassbender 1982); este valor es considerado alto, mencionándose valores de entre 1-5% (Fisher & Binkley 2000).

También se calcularon la capacidad de intercambio catiónico (CIC) y el porcentaje de saturación de bases considerando los cationes Ca, Mg, Na y K. El pH del suelo fue determinado en una mezcla 1:1 (suelo:agua; suelo:KCl 1N), usando un Orion Ionalyzer Model 901 con electrodo de combinación. La precisión de los análisis químicos fue obtenida incluyendo muestras de composición química conocida cada 40 determinaciones. El material vegetal de control consistió de hojas de pino, duraznero y cítricos del USA National Institute of Standard Technology.

Las masas minerales parciales se calcularon multiplicando las concentraciones promedio de cada elemento por la biomasa del compartimento correspondiente, sumándolas posteriormente para obtener la masa mineral en la biomasa aérea. De manera similar se obtuvo la masa mineral del mantillo. El contenido de nutrientes disponibles (kg/ha) en perfil del suelo hasta 1 m fue estimado sumando el producto de la concentración de nutrientes (mg/g) por la densidad aparente (g/cm^3) y por el volumen correspondiente a cada espesor edáfico.

Escenarios de cosecha/post-cosecha y estabilidad nutritiva

Se consideraron tres escenarios de tratamientos cosecha/post-cosecha: (1) cosecha de productos comerciales (fustes hasta 5 cm con corteza) y posterior conservación de los residuos de la cosecha, (2) cosecha de los árboles completos y retiro de todo el material aéreo producido por la plantación, y (3) cosecha de productos comerciales (fustes hasta 5 cm con corteza) y quema in situ de los residuos de la cosecha. En este caso, se consideró que la quema produce una eliminación del 60% del material, quedando en el terreno un residuo de la combustión del 40% (Turner & Lambert 1996). Este porcentaje de eliminación es considerado un valor promedio para todos los nutrientes, pudiendo subestimar la volatilización del N, pero apropiado para el resto de los nutrientes dado el tipo de tratamiento que se realiza en la zona (quemadas repetidas de los residuos alcanzando elevadas temperaturas las cuales pueden superar los límites de volatilización de la mayoría de los nutrientes), sumado el efecto

del viento producido por la propia quema, que aumenta la exportación (Raison et al. 1984). El mantillo (piso forestal remanente del rodal cosechado) se consideró parte de los residuos de la plantación y, por ende, sujeto al destino de los mismos. Las consecuencias de los tres tipos de cosecha/post-cosecha simulados se evaluaron comparando la cantidad de nutrientes exportados con la cosecha y su magnitud relativa con respecto a la reserva de nutrientes en el suelo. Para ello se calculó el Índice de Estabilidad de las Plantaciones (*IEP*; Fölster & Khanna 1997) como el cociente entre los nutrientes exportados y los nutrientes disponibles del suelo hasta 100 cm de profundidad excluyendo el mantillo. Valores mayores de este índice significan menor estabilidad nutritiva de la plantación a largo plazo en relación a la exportación de nutrientes que se efectúa con la cosecha (Fölster & Khanna 1997). Las comparaciones de remoción de nutrientes e *IEP* entre escenarios fueron realizadas mediante ANOVA y Prueba de Tukey, con $P = 95\%$. La homogeneidad de varianza se determinó mediante la Prueba de Bartlett (Sokal & Rohlf 1979).

RESULTADOS

Suelos

La proporción de nutrientes contenidos en el mantillo (necromasa de 18.0 Mg/ha), respecto a los presentes en el suelo mineral hasta 1 m, representan el 1.6% del N total, el 18% del P disponible, el 8% del Mn, el 4% del K, el 3% del Mg, Ca y Fe, y el 1% del S y Al (Tabla 1 y 2).

Tomando como base los valores de referencia propuestos por INTA (1998), el suelo mineral presenta bajos valores de pH en KCl (< 4.5), alta concentración de materia orgánica ($> 3.5\%$) y de N total ($> 0.20\%$), intermedia de P (1-4 ppm), valores promedio de CIC (8-16 cmol/kg) y de saturación de bases (30-60%), bajo para Mg (< 1 cmol/kg), y en el límite inferior del valor promedio para Ca (4-8 cmol/kg) y K (0.2-0.6 cmol/kg) (Tabla 3). Comparado con valores provenientes de horizontes A de suelos tropicales de América Latina (Fassbender 1982), se observa que la

Tabla 1. Concentración promedio (EE entre paréntesis; $n = 3$) de nutrientes (en mg/g) en el mantillo de plantaciones de *Pinus taeda* en San Antonio, Misiones.

Table 1. Mean (SE between brackets; $n = 3$) nutrient concentration (mg/g) in litter of *Pinus taeda* plantations, at San Antonio, Misiones.

	Masa (kg/ha)	C	N	P	K	Ca	Mg	S	Al	Fe	Mn
Capa F	5120 (380)	466.3 (4.3)	14.0 (0.2)	0.70 (0.01)	1.00 (0.08)	3.3 (0.3)	0.40 (0.05)	1.50 (0.06)	8.60 (0.70)	11.40 (0.90)	1.10 (0.20)
Capa L											
Hojas	6135 (871)	519.4 (1.8)	11.1 (0.7)	0.50 (0.02)	1.40 (0.09)	4.5 (0.4)	0.80 (0.08)	1.00 (0.04)	1.00 (0.20)	0.50 (0.10)	0.90 (0.20)
Frutos	1308 (178)	520.4 (1.3)	9.0 (0.2)	0.52 (0.03)	1.0 (0.20)	0.7 (0.1)	0.44 (0.03)	0.85 (0.03)	0.86 (0.07)	0.64 (0.09)	0.14 (0.02)
Ramas	4919 (430)	510.0 (1.4)	4.1 (0.1)	0.23 (0.02)	0.90 (0.08)	2.3 (0.2)	0.27 (0.04)	0.61 (0.05)	0.59 (0.07)	0.53 (0.09)	0.20 (0.03)
Corteza	500 (103)	519.4 (1.9)	6.8 (0.7)	0.28 (0.04)	0.95 (0.10)	3.6 (0.5)	0.48 (0.05)	0.60 (0.05)	2.06 (0.19)	1.48 (0.24)	0.37 (0.10)

Tabla 2. Contenido promedio (EE entre paréntesis; $n = 3$) de nutrientes totales y disponibles (en kg/ha) en un suelo rojo profundo de plantaciones de *Pinus taeda* en San Antonio, Misiones.

Table 2. Mean (SE between brackets; $n = 3$) total and available nutrient content (kg/ha) of a deep red soil in *Pinus taeda* plantations, at San Antonio, Misiones.

Profundidad (cm)	C	N	P	K	Ca	Mg	S	Na	Al	Fe	Mn
Mantillo	9037 (798)	176.2 (19.0)	8.8 (1.0)	20.0 (2.5)	58 (7)	9 (2)	19 (1)	-	53.0 (2.5)	62 (3)	12.0 (1.5)
0-10	32346 (3635)	1552 (502)	12.6 (1.6)	82 (18)	616 (337)	65 (28)	169 (7)	20 (9)	378 (150)	672 (112)	41 (7)
10-30	37214 (1131)	2678 (100)	11.1 (0.5)	121 (31)	878 (549)	70 (24)	571 (50)	43 (14)	997 (141)	516 (74)	31 (7)
30-100	101301 (3602)	6525 (163)	25.5 (0.6)	347 (99)	1759 (951)	211 (78)	1589 (155)	98 (57)	2928 (399)	792 (20)	81 (8)
Total (0-100)	170860 (4651)	10755 (400)	49.3 (1.7)	550 (147)	3252 (1830)	346 (130)	2329 (152)	161 (65)	4302 (675)	1980 (45)	154 (16)

concentración de C es superior al rango más frecuente (0.5-2.5%), al igual que la de N total (0.1-0.4%), mientras que la de S resulta cercana al valor inferior del rango para suelos inorgánicos (0.02-0.2%). La relación C/N presenta un valor considerado frecuente en suelos tropicales. Los valores de CIC y de saturación de bases resultan bajos, mientras que las concentraciones de P disponible y de los nutrientes del complejo de intercambio son deficientes.

Los 30 cm superficiales del suelo contienen un 41% del C, 39 % del N y 32% del S presentes en el conjunto del perfil de suelo considerado (0-100 cm; Tabla 2). De igual

modo, estas cifras son del 37% para el K, 39% para el Na y Mg, 46% para el Ca, 48% para el P y Mn, y 60% del Fe, disponibles. A su vez, el estrato de 0-10 cm de profundidad contiene aproximadamente 30% del almacenaje disponible de P, Fe y Mn en el perfil.

Biomasa y contenido de nutrientes

La biomasa de estas plantaciones, estimada empleando las ecuaciones obtenidas, es de 388 Mg/ha, de los cuales el 82% corresponde a fustes, el 9% a ramas vivas y muertas mayores a 1 cm, el 1% a ramas menores a 1 cm, el 3% a acículas y el 5% a la corteza (Tabla

Tabla 3. Concentración promedio (EE entre paréntesis) de nutrientes totales y disponibles (en mg/g) en un suelo rojo profundo de plantaciones de *Pinus taeda* en San Antonio, Misiones. CIC: Capacidad de Intercambio Catiónico; %SAT: porcentaje de saturación de bases.

Table 3. Mean (SE between brackets) total and available nutrient concentrations (mg/g) of a deep red soil in *Pinus taeda* plantations, at San Antonio, Misiones. CIC = Exchangeable Cations Sum; %SAT = base saturation percentage.

	Profundidad (cm)		
	0-10	10-30	50-100
C	43.1 (7.5)	19.8 (0.7)	14.8 (0.6)
N	2.1 (0.7)	1.42 (0.04)	0.95 (0.01)
P	0.02 (0.02)	0.006 (0.001)	0.004 (0.001)
S	0.22 (0.01)	0.30 (0.03)	0.23 (0.03)
K	0.11 (0.03)	0.06 (0.02)	0.05 (0.02)
Ca	0.83 (0.44)	0.47 (0.29)	0.26 (0.14)
Mg	0.09 (0.04)	0.04 (0.01)	0.03 (0.01)
Na	0.02 (0.01)	0.02 (0.01)	0.02 (0.01)
Mn	0.054 (0.009)	0.016 (0.003)	0.012 (0.001)
Fe	0.88 (0.15)	0.28 (0.04)	0.12 (0.01)
Al	0.48 (0.16)	0.53 (0.07)	0.42 (0.05)
CIC	9.98 (0.74)	8.61 (0.76)	6.42 (0.29)
%SAT	42.6 (18.7)	23.1 (13.4)	26.0 (11.9)
pH 1:1 H ₂ O	4.9 (0.2)	5.0 (0.2)	5.2 (0.1)
pH ClK	4.2 (0.2)	4.2 (0.2)	4.1 (0.0)
C:N	21	14	16

4 y 5). De los componentes de la biomasa, las acículas y las ramas menores presentan las mayores concentraciones de nutrientes, destacándose el P con una concentración 25 veces superior a la del fuste, seguida por el N que es 9 veces mayor (Tabla 6). La masa mineral aérea es de 185 Mg/ha de C, 842 kg/ha de N, 422 kg/ha de Ca, 315 kg/ha de K, 88 kg/ha de Mg y 33 kg/ha de P. El fuste, las acículas y la corteza constituyen, en ese orden, los principales almacenajes de nutrientes, excepto para el Ca y Mg, que se encuentra en mayor proporción en la corteza que en las hojas (Tabla 7). El contenido total aéreo de nutrientes (masa mineral total) en la biomasa y mantillo que puede verse afectado por prácticas de cosecha y post-cosecha es de 194 Mg de C, y de 1018, 480, 335, 97 y 42 kg/ha para N, Ca, K, Mg y P, respectivamente. De esos totales, el 95% del C y el 79-94% de los otros macronutrientes mencionados se hallan en la biomasa aérea.

Escenarios de cosecha/post-cosecha

Escenario 1.- Corresponde a la práctica más

frecuente de la zona. Se deja en el terreno el material vegetal que no es aprovechado comercialmente (biomasa total menos fuste con corteza). Ese residuo reintegra al suelo de cada hectárea 296 kg de N, 100 kg de Ca, 84 kg de K, 22 kg de Mg y 15 kg de P. Los nutrientes exportados del sistema bajo este escenario representan el 65% del N, 52% del P, 73% del K, 76% del Ca y 75% del Mg del contenido total de nutrientes en la biomasa aérea (Tabla 8). El impacto de la cosecha total sobre el IEP es el de menor valor para los nutrientes P y K ($P > 0.05$; Figura 1).

Escenario 2.- Esta práctica representa la exportación del 88% del Ca, el 90% del Mg, el 94% del K, el 77% del P y el 83% del N de la masa mineral aérea total. Este escenario, al igual que el escenario 3, produce la mayor exportación de nutrientes del sistema, con un 54% más de N y 88% más de P que el escenario 1 (Tabla 8). El impacto sobre el IEP es significativamente mayor que en el escenario 1 ($P < 0.05$) y similar al escenario 3 ($P > 0.05$) para P; para N no varía significativamente (Figura 1).

Tabla 4. Modelos de regresión para la estimación del peso seco de cada compartimento de *Pinus taeda* en San Antonio, Misiones. Ecuación: $\ln P = a + b \ln \text{DAP}^2$, donde P: peso seco (en kg) y DAP: diámetro del tronco a 1.3 m de altura (en cm).

Table 4. Regression models for dry weight estimation of each *Pinus taeda* compartment, at San Antonio, Misiones. Equation: $\ln P = a + b \ln \text{DBH}^2$, where P: dry weight (kg), and DBH: trunk diameter at 1.3 m height (cm).

Compartimento	<i>b</i>	<i>R</i> ²	<i>E</i>	<i>P</i>
Hojas	2.234	0.83	1.60	< 0.05
Frutos	1.875	0.87	1.39	< 0.05
Ramas del año	2.440	0.87	1.63	< 0.05
Ramas < 1 cm	1.447	0.77	1.40	< 0.05
Ramas 1-5 cm	1.789	0.87	1.40	< 0.05
Ramas muertas + ramas 1-5 cm	1.543	0.79	1.44	< 0.05
Fuste sin corteza	1.206	0.98	1.10	< 0.05
Corteza fustes	1.206	0.98	1.10	< 0.05
Fuste con corteza	1.196	0.97	1.11	< 0.05
Árbol completo	1.256	0.97	1.10	< 0.05

Escenario 3.- Este escenario de cosecha provoca un impacto en la exportación de nutrientes similar al provocado por el escenario 2. Este tratamiento implica la exportación del 97% del N, el 95% del P, el 94% del Mg y el 96% del K y Ca correspondientes a la masa mineral aérea total incluyendo el mantillo. En lo que respecta a los valores del *IEP*, el impacto de este tratamiento no registra diferencias con los restantes escenarios para los nutrientes N, K, Ca y Mg; resulta similar a los valores del escenario 2, y mayor al escenario 1 para P (Figura 1).

Tabla 5. Biomasa promedio (\pm EE; *n* = 3) de cada compartimento de *Pinus taeda* en San Antonio, Misiones.

Table 5. Mean biomass (\pm SE; *n* = 3) of each *Pinus taeda* compartment, at San Antonio, Misiones.

Compartimento	Biomasa (mg/ha)
Hojas	12.3 \pm 0.8
Frutos	2.5 \pm 0.3
Ramas del año	0.7 \pm 0.1
Ramas < 1 cm	5.2 \pm 0.1
Ramas 1-5 cm	22.9 \pm 0.9
Ramas muertas	11.9 \pm 0.4
Corteza de fuste	19.7 \pm 0.6
Fuste sin corteza	312.9 \pm 9.1
Total	388.1 \pm 9.4

DISCUSIÓN

Estas plantaciones del noreste de Argentina presentan una biomasa acumulada que, comparada con plantaciones del sudeste de EEUU de similar edad (Switzer & Nelson 1972), tienen una elevada producción (388 vs 90 Mg/ha) y acumulación mineral (842 vs 174 kg N/ha) en 20 años. La biomasa de la plantación misionera mostró una concentración ponderada que representa un 112% en N, 108% en Ca, 83% en Mg, 74% en K y 39% en P respecto a la concentración en la plantación de EEUU citada. Estos datos indican una tendencia a una mayor concentración de N y Ca y una menor concentración de K y P que en la plantación del sudeste de EEUU (aunque no podemos asignar significación estadística a la misma, dado que los autores no indicaron medidas de dispersión de los datos). Por otra parte, el mantillo de la plantación misionera presentó mayores concentraciones ponderadas de los macronutrientes N (126%) y K (111%) y menor en P (86%), Ca (63%) y Mg (50%) que en la plantación de EEUU. Estos valores se corresponden con las concentraciones en la biomasa aérea de N y P. Para el caso del K, las diferencias climáticas entre los sitios de ambas plantaciones (más lluvioso en Misiones) podrían ocasionar un mayor lixiviado del dosel. Además de las diferencias de concentración

Tabla 6. Concentración promedio (EE entre paréntesis; $n = 3$) de nutrientes totales (mg/g) en cada compartimento de *Pinus taeda* en San Antonio, Misiones.**Table 6.** Mean (SE between brackets; $n = 3$) nutrient concentration (mg/g) of each *Pinus taeda* compartment, at San Antonio, Misiones.

Compartimento	C	N	P	K	Ca	Mg	Cenizas
Hojas	531.1 (1.1)	17.2 (0.4)	0.91 (0.03)	4.03 (0.30)	2.80 (0.08)	0.68 (0.03)	25.0 (0.4)
Frutos	524.9 (4.5)	5.5 (0.5)	0.22 (0.03)	1.2 (0.4)	0.30 (0.09)	0.32 (0.04)	3.5 (1.5)
Ramas del año	525.8 (0.6)	10.2 (0.9)	0.79 (0.11)	3.2 (0.3)	3.10 (0.03)	0.64 (0.06)	17.9 (0.9)
Ramas < 1 cm	521.4 (1.2)	4.5 (0.1)	0.25 (0.02)	1.7 (0.1)	3.2 (0.3)	0.38 (0.01)	9.7 (1.0)
Ramas 1-5 cm	495.2 (1.7)	2.7 (0.2)	0.12 (0.01)	1.1 (0.1)	1.6 (0.1)	0.35 (0.05)	4.7 (1.2)
Ramas muertas	499.1 (3.7)	2.3 (0.2)	0.09 (0.01)	0.68 (0.10)	1.8 (0.1)	0.30 (0.05)	4.3 (0.4)
Corteza de fuste	513.7 (8.6)	6.2 (0.4)	0.350 (0.002)	1.60 (0.08)	3.3 (0.2)	0.55 (0.02)	12.9 (0.6)
Fustes sin corteza	499.5 (5.5)	1.4 (0.2)	0.030 (0.003)	0.50 (0.03)	0.70 (0.02)	0.15 (0.01)	2.7 (0.3)

Tabla 7. Masa mineral (kg/ha) promedio (\pm EE; $n = 3$) de cada compartimento de *Pinus taeda* en San Antonio, Misiones.**Table 7.** Mean (\pm SE; $n = 3$) nutrient content (kg/ha) of each *Pinus taeda* compartment, at San Antonio, Misiones.

Compartimento	C	N	P	K	Ca	Mg	Cenizas
Hojas aciculares	5182 \pm 88	167 \pm 4	9.0 \pm 0.3	39 \pm 3	27 \pm 1	7.0 \pm 0.4	244 \pm 4
Frutos	1299 \pm 165	13 \pm 2	0.6 \pm 0.1	3 \pm 1	1.0 \pm 0.2	0.8 \pm 0.2	9 \pm 3
Ramas año	351 \pm 24	7 \pm 1	0.5 \pm 0.1	2.0 \pm 0.2	2.0 \pm 0.2	0.4 \pm 0.0	12 \pm 1
Ramas < 1 cm	2329 \pm 36	22 \pm 2	1.0 \pm 0.1	7 \pm 1	14 \pm 1	2.0 \pm 0.1	43 \pm 4
Ramas 1-5 cm	10647 \pm 278	58 \pm 6	3.0 \pm 0.4	25 \pm 3	35 \pm 5	8.0 \pm 0.8	103 \pm 31
Ramas muertas	5943 \pm 239	29 \pm 1	1.0 \pm 0.1	8 \pm 1	21 \pm 2	4.0 \pm 0.6	55 \pm 3
Corteza de fuste	9649 \pm 151	117 \pm 10	7.0 \pm 0.2	30 \pm 2	63 \pm 6	10.0 \pm 0.2	242 \pm 18
Fustes sin corteza	149458 \pm 3489	429 \pm 61	11 \pm 3	201 \pm 44	259 \pm 59	56 \pm 7	818 \pm 97
Total	184858 \pm 3532	842 \pm 72	33 \pm 2	315 \pm 53	422 \pm 80	88 \pm 6	1527 \pm 87

en la biomasa que da origen a las entradas de hojarasca, suponiendo similares magnitudes de reabsorción, pueden estar influyendo significativamente los procesos de descomposición y lixiviación del mantillo.

Bajo cualquier escenario de cosecha, el P y el K mostraron los valores más altos del IEP (menor estabilidad), siendo el N quien manifiesta mayor estabilidad (Figura 1). La práctica de la extracción del fuste con corteza (escenario 1), considerada la más conservativa comparada con el escenario 2, implica en este

último caso un aumento de la inestabilidad de la plantación de 1.5 veces para N, 1.8 para P, 1.4 para K y 1.3 para Ca y Mg, y se incrementa 1.4 veces para K, Ca y Mg, 1.8 para N y 2.3 para P si se compara con la práctica menos conservativa (escenario 3). Tomando como umbral de estabilidad un IEP de 0.5 (> 0.5 es inestable, < 0.5 es estable, según Gerdin & Schlatter 1999), los tratamientos analizados no afectarían la estabilidad para el N, Ca y Mg. En cambio, los escenarios 2 y 3 son considerados inestables para los nutrientes P y K. Si se calculan los valores inversos

Tabla 8. Remoción de nutrientes (kg/ha) en plantaciones de *Pinus taeda* en San Antonio, Misiones, bajo tres escenarios de aprovechamiento (ver *Métodos*). Letras diferentes indican diferencias significativas ($P < 0.05$).

Table 8. Nutrient export (kg/ha) from *Pinus taeda* plantations at San Antonio, Misiones, under three harvesting and residue management scenarios (see *Methods*). Different letters indicate significant differences ($P < 0.05$).

Escenario	N		P		K		Ca		Mg	
1	546	a	17	a	231	a	322	a	66	a
2	841	a	32	b	315	a	421	a	87	a
3	983	b	40	b	322	a	458	a	91	a

de *IEP* se obtiene un indicador aproximado de la disponibilidad de nutrientes para mantener sucesivas cosechas. De este modo, se determinan valores de 1.2 rotaciones para P, 1.6 rotaciones para K y valores mayores a 10 rotaciones, que representan mayor estabilidad, para N. Suponiendo que la reposición neta de nutrientes al suelo mediante meteorización, actividad microbiana, aerosoles y flujos hídricos es muy baja, y que no se incorporan nutrientes mediante fertilización,

las prácticas de cosecha más extractivas (escenarios 2 y 3) reducirían la disponibilidad de esos nutrientes en el corto plazo, alcanzando límites críticos de estabilidad, principalmente el P y K.

Por su lado, el descortezado y retención in situ es recomendable, ya que la remoción de la corteza produce aumentos significativos en la exportación de nutrientes, principalmente de Ca y Mg. El elevado contenido de P y N

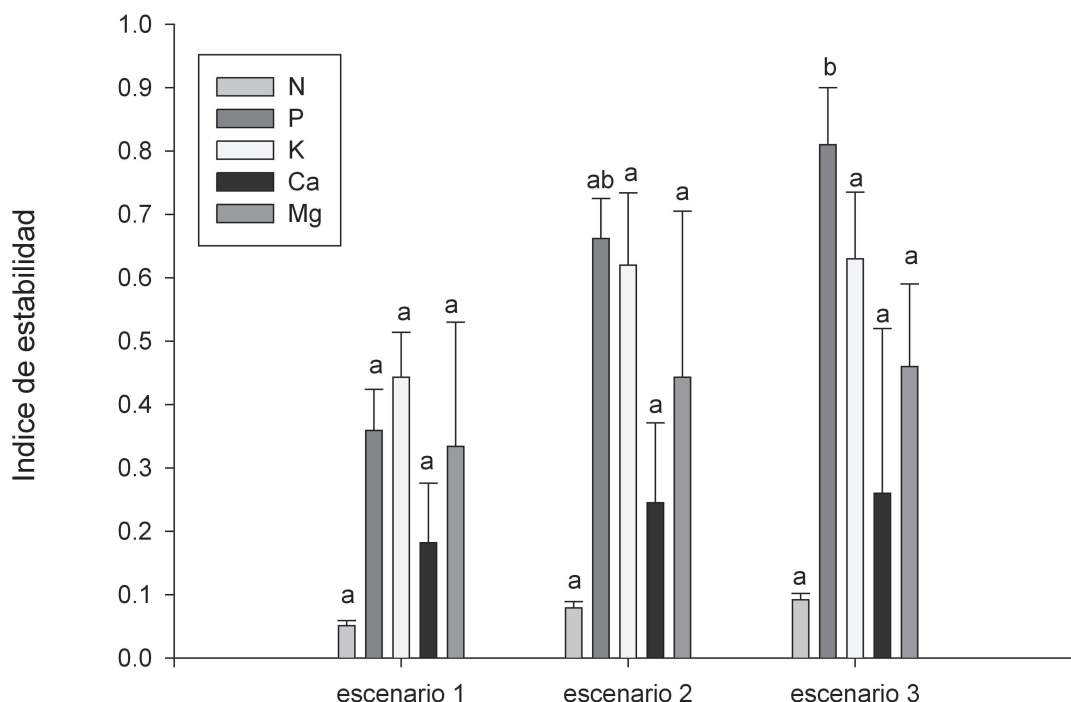


Figura 1. Índice de Estabilidad de las plantaciones de *Pinus taeda* en San Antonio, Misiones, bajo tres escenarios de aprovechamiento (ver *Métodos*). Letras diferentes indican diferencias significativas ($P < 0.05$) para un mismo nutriente entre escenarios.

Figure 1. Plantation Stability Index for *Pinus taeda* plantations at San Antonio, Misiones, under three harvesting and residue management scenarios (see *Methods*). Different letters indicate significant differences ($P < 0.05$) among scenarios for the same nutrient.

en el mantillo resalta su importante contribución a la disponibilidad rápida del P y N, particularmente importante para el P en suelos ácidos en donde éste suele estar retenido y por lo tanto su disponibilidad es escasa. Esto se pone especialmente de manifiesto si se tienen en cuenta las diferencias de concentración de P en la biomasa de las plantaciones de Misiones con respecto a la plantación estadounidense con la que se efectúa la comparación. La incorporación al mantillo de los residuos de la cosecha adiciona una importante cantidad de materia seca, sustrato de la descomposición que reincorpora materia orgánica y nutrientes al suelo. La tasa anual de descomposición (k) es de 0.8 años^{-1} , valor común en acículas de plantaciones en zonas climáticas tropicales o subtropicales (O'Connell & Sankaran 1997), y de 0.3 años^{-1} para las ramas finas (Goya et al. 2000). Asimismo, la retención y manejo de residuos de cosecha puede provocar un aumento de hasta un 100% en el incremento en biomasa en sucesivas rotaciones cuando son comparadas con prácticas de manejo que implican su eliminación total (Wei et al. 2000). También puede ayudar a reducir las pérdidas de N y P, como se ha demostrado para suelos arenosos mediante mecanismos de inmovilización, especialmente si se reduce su tamaño y se incorpora dentro del suelo (Carlyle et al. 1998). En un estudio realizado en suelos rojos del noroeste de Misiones, la práctica de conservación de residuos de cosecha se asoció, a los 24 meses de aplicada, con mayores concentraciones de N, P, K, Ca y Mg en el suelo, respecto de tratamientos en los cuales, simulando cosecha de árbol entero, se procedió a su extracción manual (Fernández et al. 2000a).

La quema de los residuos produce alteración de las características del suelo y una importante pérdida de materia orgánica y nutrientes (Fölster & Khanna 1997). La rápida mineralización que se produce con la quema puede producir un aumento en la productividad en una etapa inicial, principalmente por un aumento en la disponibilidad de P (Fisher & Binkley 2000); no obstante, algunos estudios demostraron que difícilmente se mantiene a lo largo de todo el turno (Gonçalves et al. 1997). Los valores del *IEP* obtenidos para el N, P y K con la práctica de

cosecha que comprende la quema de los residuos se aproximan a los obtenidos para la práctica de extracción del árbol completo.

CONCLUSIONES

Las condiciones subtropicales húmedas y los suelos rojos de Misiones dan como resultado que las plantaciones de *Pinus taeda* tengan elevadas tasas de producción, bajas concentraciones ponderadas de nutrientes (excepto de N) en la biomasa y altas tasas de descomposición y circulación de nutrientes en la hojarasca. La elección del tipo de aprovechamiento y las prácticas culturales posteriores que se analizan en este trabajo, resulta de gran importancia para la estabilidad, en el corto plazo, de las rotaciones futuras del cultivo de *Pinus taeda*. Asimismo, se observa que el principal almacenaje de nutrientes lo constituye el suelo, con un nivel crítico para P y K; los problemas de fertilidad más probables se asocian con la disponibilidad de estos elementos, nutrientes de ciclo sedimentario cuya disponibilidad y comportamiento en suelos ácidos los hace particularmente sensibles a las diferencias en el manejo. Las prácticas post-cosecha que incluyen la quema de los residuos deben evitarse, debido a que producen un impacto negativo significativo sobre la estabilidad nutritiva de las plantaciones. De no mediar medidas adecuadas para conservar los nutrientes, es previsible una próxima necesidad de fertilización para sostener los elevados rendimientos y demanda de nutrientes, con consecuencias en la rentabilidad económica.

AGRADECIMIENTOS

Agradecemos a F Bianchini, M Pinazo, Ana Lupi e Hipólito Kuzdra por su ayuda en el trabajo de campo, y a MJ Sánchez, M Santiago, E López y M Dabadie por la tarea de laboratorio. Este trabajo fue realizado en el marco del acuerdo de cooperación entre la Universidad Nacional de La Plata (LISEA) y el USDA Forest Service (International Institute of Tropical Forestry, PR), con la participación del Centro Regional Misiones del INTA y del Proyecto Forestal de Desarrollo (SAPGyA- 3948-AR BIRF).

BIBLIOGRAFÍA

- BASKERVILLE, GL. 1965. Estimation of dry weight of tree components and total standing crop in conifer stands. *Ecology* **46**:867-869.
- CARLYLE, JC; MW BLIGH & EKS NAMBIAR. 1998. Woody residue management to reduce nitrogen and phosphorus leaching from sandy soil after clear-felling *Pinus radiata* (*cursiva*) plantations. *Can. J. Forest Res.* **28**:1222-1232.
- CROW, TR. 1988. A Guide to using regression. Equations for estimating tree biomass. *North. J. Appl. For.* **5**:15-22.
- DALLA TEA, F & E JOKELA. 1991. Needfall returns and resorption. Rates of nutrients in young intensively managed slash and loblolly pine stands. *Forest Sci.* **40**:650-662.
- FASSBENDER, HW. 1982. *Química de suelos*. IICA. San José. 398 pp.
- FERNÁNDEZ, R; A LUPI; N PAHR; H REIS; H O'LEARY ET AL. 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. Pp. 243-248 en: *Avances en Ingeniería Agrícola*. Editorial Facultad Agronomía, UBA. Buenos Aires.
- FERNÁNDEZ, R; F RODRÍGUEZ ASPILLAGA; A LUPI; E LÓPEZ; R PEZZUTTI ET AL. 2000b. Respuesta del *Pinus taeda* y la *Araucaria angustifolia* a la adición de N, P y K en la implantación. En: *Actas silvoargentina 1*. Disco Compacto. Asociación Forestal Argentina. Virasoro.
- FISHER, RF & D BINKLEY. 2000. *Ecology and management of forest soils*. J Wiley & Sons. New York.
- 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**:229-236.
- FÖLSTER, H & PK KHANNA. 1997. Dynamics of nutrient supply in plantation soil. Pp. 339-378 en: EKS Nambiar & AG Brown (eds). *Management of soil nutrients and water in tropical plantation forest*. CSIRO. Canberra.
- GERDIN, V & JE SCHLATTER. 1999. Estabilidad nutritiva de plantaciones de *Pinus radiata* D. Don en cinco sitios característicos de la VIII Región. *Bosque* **20**:107-115.
- GONÇALVES, JLM; NF BARROS; EKS NAMBIAR & RF NOVAIS. 1997. Soil and stand management for short-rotation plantations. Pp. 379-417 en: EKS Nambiar & AG Brown (eds). *Management of soil nutrients and water in tropical plantation forest*. CSIRO. Canberra.
- GOYA, J; J FRANGI; C PÉREZ & M PINAZO. 2000. *Ciclo de nutrientes en plantaciones de Pinus taeda en el norte de la provincia de Misiones*. Informe inédito. SAGPyA-BIRF. 63 pp.
- HOPMANS, P; HTL STEWART & DW FLINN. 1993. Impacts of harvesting on nutrients in eucalypt ecosystem in south-eastern Australia. *Forest Ecol. Manag.* **59**:29-51.
- HUNTER, AH. 1982. *International soil fertility evaluation and improvement: laboratory procedures*. Department of Soil Science, North Carolina State University. Raleigh.
- INTA. 1998. *Interpretación de resultados analíticos de suelos*. Provincia de Misiones. Hoja Informativa N° 5. INTA, EEA Montecarlo.
- INTA. 2000. *Boletín de Información climática*. INTA, EEA Montecarlo.
- KIMMINS, JP. 1974. Sustained yield, timber mining, and the concept of ecological rotation; a British Columbian view. *Forest. Chron.* **50**:27-31.
- LECO. 1993. *Carbon, nitrogen, and sulfur in soil, rock, and similar materials*. Application Bulletin N° 203-601-246. LECO Corporation Technical Services Laboratory. St Joseph.
- LUH HUANG, CY & EE SCHULTE. 1985. Digestion of plant tissue for analysis by ICP emission spectroscopy. *Commun. Soil Sci. Plan.* **16**:943-958.
- O'CONNELL, AM & KV SANKARAN. 1997. Organic matter accretion, decomposition and mineralisation. Pp. 443-480 en: EKS Nambiar & AG Brown (eds). *Management of soil nutrients and water in tropical plantation forest*. CSIRO. Canberra.
- PRITCHETT, W & W COMERFORD. 1981. Nutrition and fertilization on slash pine. Pp. 69-90 en: EL Stone (ed). *The managed slash pine ecosystem*. School of Forest Resources and Conservation, University of Florida. Gainesville.
- RAISON, RJ; PK KHANNA & PV WOODS. 1984. Mechanisms of element transfer to the atmosphere during vegetation fires. *Can. J. Forest Res.* **15**:132-140.
- SAGPyA. 2001. *Sector forestal. Anuario sobre régimen de promoción de plantaciones forestales*. Secretaría de Agricultura, Pesca y Alimentación, Dirección de Forestación. Buenos Aires.
- SOKAL, RR & FJU ROHLF. 1979. *Biometría. Principios y métodos estadísticos de la investigación biológica*. H. Blume. Madrid. 832 pp.
- SWITZER, GL & LE NELSON. 1972. Nutrient accumulation and cycling in loblolly pine (*Pinus taeda* L.) plantation ecosystems: the first twenty years. *Soil Sci. Soc. Am. Pro.* **36**:143-147.
- TABATABAI, MA & JM BREMNER. 1991. Automated instruments for determination of total carbon, nitrogen and sulfur in soils by combustion techniques. Pp. 261-286 en: *Soil analysis, modern*

- instrumental techniques*. 2da edn. Marcel Dekker. New York.
- TURNER, J & M LAMBERT. 1996. Nutrient cycling and forest management. Pp. 229-248 en: PM Attiwill & MA Adams (eds). *Nutrition of eucalypts*. CSIRO, Canberra.
- WEI, X; W LIU; J WATERHOUSE & M ARMLEDER. 2000. Simulations on impacts of different management strategies on long-term site productivity in lodgepole pine forest of the central interior of British Columbia. *Forest Ecol. Manag.* **133**:217-229.
- WHITTAKER, RH & G WOODWELL. 1968. Dimension and production relations of trees and shrubs in the Brookhaven Forest, New York. *J. Ecol.* **56**:1-25.