
PRODUCTIVIDAD AÉREA Y CICLO DE NUTRIENTES EN PLANTACIONES DE *Pinus taeda* L. EN EL NORTE DE LA PROVINCIA DE MISIONES, ARGENTINA

CAROLINA A. PÉREZ, JUAN F. GOYA, FLAVIA BIANCHINI, JORGE L. FRANGI y ROBERTO FERNÁNDEZ

RESUMEN

Se estimó la productividad primaria aérea neta (PPAN), ciclado y eficiencia del uso de nutrientes (EUN) de 3 plantaciones experimentales de *Pinus taeda* L. de 20 años, del norte de la provincia de Misiones, Argentina. La PPAN fue $34,8 \pm 1,5 \text{Mg} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{año}^{-1}$ y la caída al mantillo, $16 \pm 1,1 \text{Mg} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{año}^{-1}$. El incremento medio anual del fuste fue 20% mayor que en plantaciones comerciales de Misiones y cercano al extremo superior del intervalo para plantaciones de pinos tropicales y subtropicales. El requerimiento y absorción de C fue 18 y $16 \text{Mg} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{año}^{-1}$ respectivamente. El requerimiento de N, P, K, Ca y Mg ($\text{kg} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{año}^{-1}$) fue respectivamente 298, 15, 63, 70 y 15; y la absorción ($\text{kg} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{año}^{-1}$) fue 161, 8, 36, 70 y 15. Los requerimientos se asignaron principalmente a las hojas y fus-

te. El retorno de nutrientes constituyó 70-90% de la absorción anual. La eficiencia de reabsorción foliar de N y P fue ~40%, y la del K ~44%; la proficiencia de N y P fue completa. La eficiencia en el uso de los nutrientes (EUN) del N fue mayor que en bosques tropicales. Comparada con plantaciones tropicales de suelos menos fértiles, la plantación misionera presentó mayor PPAN, absorción y retorno de nutrientes pero menor EUN, principalmente de N y P. No fue evidente la potencial limitación por P probablemente debido al legado de materia orgánica y nutrientes del bosque húmedo precedente, que suministró la demanda inicial de nutrientes de la plantación de primera rotación y a la rápida descomposición del mantillo que continúa la provisión nutritiva.

Las coníferas constituyen ~56% de la superficie forestada (500000ha) de la Mesopotamia Argentina. El área forestada se expandió en los últimos años, con una tasa anual de plantación, solo en la provincia de Misiones, de ~80000ha/año (SAGPyA, 2001).

Tradicionalmente la actividad forestal en Argentina se concen-

tró en suelos de baja aptitud agrícola; sin embargo, en algunas regiones, las plantaciones ocupan suelos no explotados con anterioridad, procedentes del desmonte del bosque nativo o sobre pastizales naturales, como también en suelos con anteriores rotaciones forestales o agrícolas. La mejora del estado nutritivo de los suelos con plantaciones de *Pinus elliotii* y *P. taeda* ha dado lugar a marcados aumentos

en productividad (Pritchett y Comerford, 1981; Veiga y Morales, 1983; Dalla Tea y Jokela, 1991; Jokela y Martin, 2000; Martin y Jokela, 2004).

El funcionamiento sustentable de un sistema se basa en el mantenimiento y estabilidad de su productividad y capital de nutrientes (Cuevas y Medina, 1998). La disponibilidad de nutrientes y sus tasas de absorción

PALABRAS CLAVE / Eficiencia en el Uso de Nutrientes / Productividad Primaria Aérea Neta / Reabsorción y Retorno de Nutrientes / Requerimientos /

Recibido: 15/07/2006. Modificado: 29/09/2006. Aceptado: 04/10/2006.

Carolina A. Pérez. Doctora en Ciencias Naturales, Universidad Nacional de la Plata (UNLP), Argentina. Docente-Investigador, Laboratorio de Investigación de Sistemas Ecológicos y Ambientales (LISEA). Facultad de Ciencias Agrarias y Forestales, UNLP, Argentina. Dirección: Diagonal 113 N° 469, CC 31, 1900 La Plata, Argentina. e-mail: talares@ceres.agro.unlp.edu.ar

Juan F. Goya. Ingeniero Forestal, UNLP, Argentina. Docente-Investigador, LISEA, Argentina. e-mail: jgoya@ceres.agro.unlp.edu.ar

Flavia Bianchini. Licenciada en Biología, UNLP, Argentina. Becaria, LISEA, Argentina. e-mail: lisea@ceres.agro.unlp.edu.ar

Jorge L. Frangi. Doctor en Ciencias Naturales, UNLP, Argentina. Profesor, UNLP y Docente-Investigador, LISEA, Argentina. e-mail: jfrangi@ceres.agro.unlp.edu.ar

Roberto Fernández. Master en Silvicultura, Universidad Federal de Paraná, Brasil. Profesor, Universidad Nacional de Misiones, Argentina. Investigador, Estación Experimental Agropecuaria Montecarlo, Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria, Argentina. e-mail: rfernandez@ceel.com.ar

y de retraslocación constituyen factores cruciales en la productividad (Nambiar y Fife, 1991; Dalla Tea y Jokela, 1994; Aerts, 1996; Killingbeck, 1996; Cuevas y Medina, 1998; Jokela y Martin, 2000). La caída de detritos es la principal fuente de ingreso de nutrientes al mantillo, que actúa como válvula de control entre los dos subsistemas principales de los ecosistemas terrestres: los productores primarios y el suelo (Charley y Richards, 1983). Los nutrientes rara vez se hallan en balance exacto y en cantidades óptimas para el crecimiento vegetal y en consecuencia las plantas están siempre compensando las tensiones impuestas por su ambiente nutricional (Chapin y Van Cleve, 1989).

Switzer y Nelson (1972) consideraron, para *P. taeda*, que los primeros 20 años constituyen el período de más rápido y pronunciado desarrollo, de mayor cambio en la demanda de nutrientes por los árboles, y de cambios en los suelos. A partir de esa edad la acumulación y ciclo de nutrientes se acercan a un balance nutricional, definiendo las características del sistema.

En Argentina, el conocimiento de los requerimientos nutritivos de las especies forestales es escaso. En plantaciones de *P. taeda* en Misiones los problemas de fertilidad más probables se asocian con la disponibilidad de P y K, cuyo comportamiento en suelos ácidos los hace sensibles a diferencias de manejo. Las prácticas de poscosecha con quema de residuos impactan negativamente la estabilidad nutritiva de las plantaciones (Goya *et al.*, 2003).

En el clima subtropical húmedo con suelos rojos de Misiones *P. taeda* tiene altas tasas de producción, bajas concentraciones de nutrientes, excepto N, en la biomasa y, aparentemente, alta descomposición y circulación de nutrientes en el mantillo (Goya *et al.*, 2000).

El objetivo del presente trabajo fue estimar la productividad primaria aérea neta (PPAN) y los principales procesos ligados al ciclo de macronutrientes, y ofrecer una visión integrada en forma de modelos empíricos de nutrientes en plantaciones de *P. taeda* en suelos representativos del norte de Misiones. Se intenta responder, si la PPAN es elevada como surge del volumen de madera producida, ¿Cuál es la masa de nutrientes requerida para sostener esa producción?, ¿Cuánto es absorbido desde el suelo?, ¿Cuál es la eficiencia en el uso de nutrientes y cuáles podrían ser limitantes?, ¿Cómo resultan estas características comparadas con otras plantaciones de pinos?

Materiales y Métodos

Área de estudio

Ésta se ubica en el campo Anexo Manuel Belgrano del Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria (26°04'S y 53°45'O, 565msnm), en San Antonio, provincia de Misiones. La temperatura promedio anual es de 20,7 (14,8-25,2°C). La precipitación es 2108mm/año, con régimen isohigro (INTA, 2000).

El suelo es rojo (Kandiult), de buen drenaje y textura arcillosa, con arcillas con baja capacidad de intercambio (INTA, 1990). En los sitios de muestreo, los primeros 10cm de profundidad (Goya *et al.*, 2003) tienen pH (KCl y agua 1:1) bajo (4,2 y 4,9 respectivamente), alta concentración de materia orgánica (4,3%) y de N total (0,20%), intermedia de P (0,002%) y valores promedio de CIC (10cmol/kg) y saturación de bases (42%). Del espesor de 0-100cm de suelo analizado, los primeros 30cm contienen 41% del C, 39% del N total y los nutrientes disponibles se encuentran en 37% (K), 39% (Na y Mg), 46% (Ca) y 48% (P).

Sitios estudiados

Se instalaron tres parcelas de 600m², una en cada una de tres plantaciones experimentales de *P. taeda* de 20 años de edad, con una distancia original de plantación de 2,5x2,5m, con 1600ind/ha, sin raleo. En noviembre 2000, en cada parcela se midió el diámetro a la altura del pecho, medido a 1,3m (DAP) con cinta diamétrica y la altura total de los individuos mediante clinómetro. El rango diamétrico de los árboles fue de 10 a 35cm DAP.

Crecimiento y Productividad aérea

Para determinar el crecimiento se tomaron muestras de barreno al DAP por clase diamétrica en 20 ejemplares, y secciones de 20 árboles apeados. Mediante análisis de secciones de la base de los individuos apeados se corroboró la edad de la plantación. La identificación y medición de los anillos de crecimiento se efectuó mediante lupa binocular y tableta Velmex UniSlide conectado a un contador digital (Metronics Quick-Check QC-1000). Se determinó el incremento periódico anual (IPA) del fuste en los últimos 5 años para las distintas clases diamétricas.

Con la distribución de individuos por clase diamétrica y el IPA se realizó una proyección a 10 años para cada parcela con el método de Proyección de Tabla de Rodal para las distribuciones por clases diamétricas/ha y total/ha de

individuos, área basal, biomasa total y de fuste, determinándose los respectivos incrementos anuales (Husch *et al.*, 1982).

La caída fina en cada parcela se estimó en 10 canastas de 0,25m² y malla plástica de 1mm², elevadas 10cm sobre el terreno. El mantillo se separó en acículas, ramas<1cm, frutos y miscelánea. El material fue secado en estufa (70°C) hasta peso constante. La producción anual de hojas fue estimada como la sumatoria de la caída mensual, corregida por un factor obtenido a partir del cociente entre las concentraciones de Ca en la hoja viva y en la hoja recién caída, en cada mes. La productividad aérea neta (PPAN) se estimó como $PPAN = \Delta B^+ + C$, donde: $\Delta B^+ = \Delta F^+ + \Delta R^+ + \Delta H^+$; C= caída foliar + caída frutos + caída ramas<1cm; ΔB^+ = incremento de biomasa; ΔF^+ = incremento de biomasa de fuste (IPA); ΔR^+ = incremento de biomasa de ramas 1-5cm + ramitas del año; y ΔH^+ = incremento de biomasa foliar (caída foliar corregida por reabsorción de C). El incremento leñoso en ramas de 1-5cm de diámetro se obtuvo a partir de la diferencia entre las biomásas de ramas de esa categoría, medidas a los 18 y 20 años en las mismas parcelas. La miscelánea representó menos del 2% de la caída fina y fue descartada del cálculo de la caída al mantillo y productividad.

Concentración y contenido de nutrientes

La caída fina fue analizada para obtener las concentraciones de macronutrientes en cada compartimiento. Las muestras se molieron en molino Wiley y tamizaron con malla 20. Para analizar P, K, Ca y Mg se incineraron submuestras a 500°C, se digirieron las cenizas en HNO₃ y H₂O₂ al 30% (Luh Huang y Schulte, 1985) y se midieron en un espectrómetro de emisión de plasma Beckman Spectra-Scan V. En otras submuestras se determinó la concentración de C y N con un LECO CNS-2000, mediante el método de combustión seca (Tabatabai y Bremner, 1991). Con las concentraciones medias de cada elemento y la materia seca de cada compartimiento, se obtuvieron las correspondientes masas minerales.

Flujos del ciclo de nutrientes

Los parámetros de circulación de nutrientes se calcularon de acuerdo con Cole y Rapp (1981), sin los flujos vinculados al balance hídrico, como

- Retención: total de nutrientes contenido en el incremento leñoso anual (fuste, corteza y ramas<5cm); suma de los productos de las concentraciones en los compartimientos por las respectivas producciones anuales de estos.

- Requerimiento: suma de la retención más los nutrientes utilizados en la producción anual de nuevas estructuras (hojas, ramas del año y frutos), siendo esta última el producto de la producción de materia seca por la concentración nutritiva del respectivo compartimiento.

- Retorno: ingreso anual de nutrientes al mantillo por la caída; suma de los productos de las concentraciones en los compartimientos por sus respectivos valores de caída mensual de materia seca.

- Absorción: la retención más el retorno.

- Retraslocación: requerimientos menos la absorción.

En este trabajo retraslocación, reabsorción y reciclado son considerados sinónimos, respetando el uso empleado por los autores que se citan en el texto. Se informan los valores medios (n=3) de los flujos de nutrientes.

Se realizaron modelos de circulación aérea de nutrientes empleando el lenguaje de energía de Odum (1971). Las variables de estado de los compartimientos de la biomasa aérea (mineralomasas), la masa mineral del mantillo y suelo se obtuvieron de Goya *et al.* (2003). Las tasas de renovación (k_r) se calcularon con el retorno y almacenaje de nutrientes en el mantillo.

Índices de eficiencia

Se estimaron los siguientes índices de eficiencia de reabsorción y de uso de los nutrientes:

a) Eficiencia de reabsorción, la diferencia de concentraciones entre la hoja viva y la hoja recién caída, expresada como porcentaje de la concentración en la hoja viva;

b) Eficiencia de reabsorción corregida por Ca (Vitousek y Sanford, 1986), estimada como: $1 - [(\text{nutriente}/\text{Ca en la caída foliar}) / (\text{nutriente}/\text{Ca en la hoja adulta})]$, expresada como porcentaje;

c) Proficiencia de reabsorción (Killingbeck, 1996), la concentración de nutrientes móviles en hojas senescentes caídas en el período de máxima caída foliar;

d) Índice de eficiencia de reabsorción (REI; Cuevas y Medina, 1998), la cantidad retraslocada/cantidad de nutrientes en la caída foliar. La retraslocación para este índice es estimada de acuerdo con Vitousek y Sanford (1986);

e) Retraslocación/requerimientos, cociente estimado a partir de los flujos ecosis-

TABLA I
MATERIA SECA Y CONCENTRACIÓN DE NUTRIENTES EN LOS COMPARTIMENTOS DE LA CAÍDA AL MANTILLO*

	Materia seca Mg·ha ⁻¹ ·año ⁻¹	C	N	P	K	Ca	Mg
Hojas	9,52 (0,57)	535,16 (1,05)	10,31 (0,25)	0,56 (0,03)	2,24 (0,14)	4,05 (0,91)	0,80 (1,10)
Corteza	0,63 (0,06)	526,11 (1,08)	7,72 (0,22)	0,34 (0,02)	1,28 (0,06)	3,89 (0,21)	0,53 (0,02)
Frutos	2,24 (0,68)	515,86 (1,88)	11,11 (0,86)	0,63 (0,07)	1,18 (0,18)	0,63 (0,07)	0,56 (0,04)
Ramas <1cm	3,54 (0,50)	512,76 (1,36)	4,80 (0,44)	0,21 (0,01)	0,86 (0,01)	2,85 (0,09)	0,30 (0,00)

* Media anual (ES); n= 3.

témicos, expresado en porcentaje, indica la importancia del reciclado con respecto a los requerimientos necesarios para el crecimiento y sustitución de estructuras anuales;

f) Índice de eficiencia en el uso de los nutrientes (EUN; Vitousek, 1982), el cociente entre la materia seca en la caída al mantillo y su mineralomasa, se calculó teniendo en cuenta la caída fina (hojas + corteza + ramas <1cm + frutos);

g) Tasa relativa de circulación de nutrientes (Gray, 1983, modificado), el cociente entre la tasa de renovación de los nutrientes (absorción/mineralomasa) y la tasa de renovación de la biomasa (productividad/biomasa).

Análisis estadístico

La concentración mensual de nutrientes en la caída foliar se comparó con la media anual de dichas concentraciones. A fin de ponderar la variabilidad de las medias mensuales y de la media anual en la comparación visual se calcularon los límites de confianza al 95% (Sokal y Rohlf, 1981). Se consideraron alejamientos significativos respecto de la media anual a aquellos en los que no se observó una superposición de los límites de confianza entre la media anual y mensual.

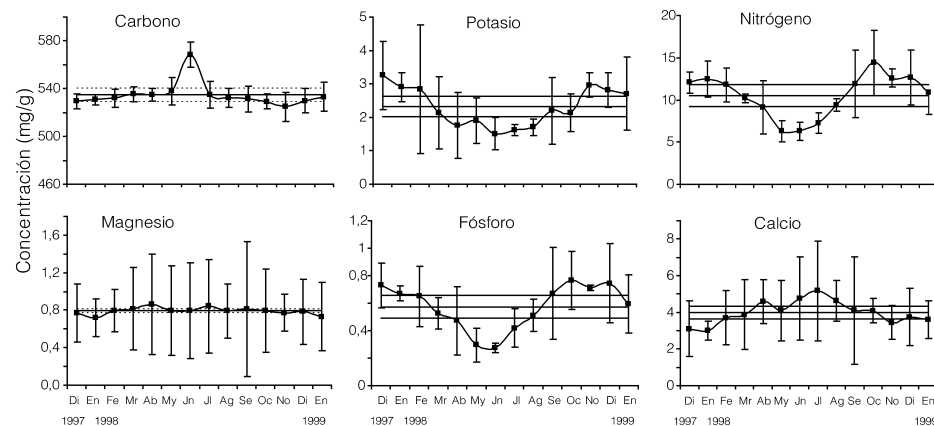


Figura 1. Concentraciones mensuales medias (n= 3) ± límites de confianza al 95%, de nutrientes (mg/g) en la caída foliar al mantillo en plantaciones de *P. taeda*, Misiones, Argentina. La línea horizontal indica la media anual (± límites de confianza al 95%).

Resultados

Productividad primaria aérea neta

La PPA fue 34,8 ±1,5Mg·ha⁻¹·año⁻¹; el incremento leñoso de la biomasa representó el 42% (36% de fuste y 6% de ramas leñosas de 1-5cm), y el 58% restante correspondió a la producción de estructuras anuales (39% hojas, 10% ramas <1cm, 6% frutos y 2% ramitas verdes). La caída al mantillo fue 16 ±1,1Mg·ha⁻¹·año⁻¹, donde 60% correspondió a hojas, 22% a ramas, 14% a frutos y 4% a corteza (Tabla I).

Concentración y contenido de nutrientes en la caída al mantillo

Las acículas tuvieron las mayores concentraciones promedio anual no ponderadas por la masa caída de N, K, Ca y Mg (Tabla I). A lo largo de un año, las concentraciones de N, P y K en las acículas variaron significativamente con mínimos (mg/g) durante el invierno coincidente con el pico en la caída: N= 6,3; P= 0,3 y K= 1,5. Inversamente, el C tuvo un máximo significativo en invierno. Las concentraciones de Ca y Mg no variaron significativamente, aunque el Ca tendió a aumentar en invierno (Figura 1). Los nutrientes retornados por las acículas estuvieron directamente relacionados con

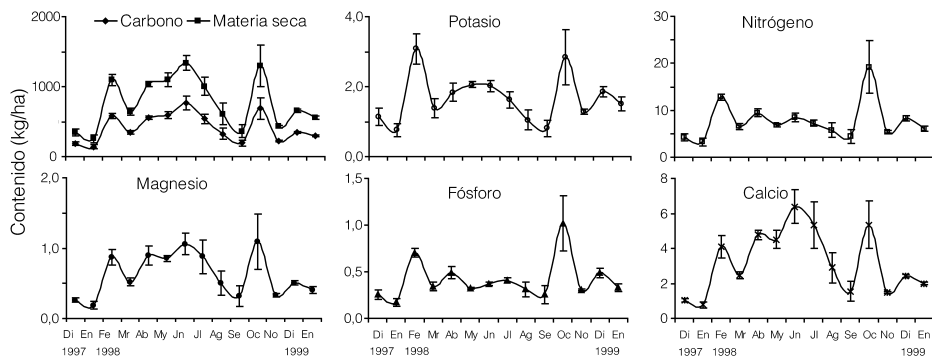


Figura 2. Retorno mensual de nutrientes (kg/ha) en la caída foliar en plantaciones de *P. taeda*, Misiones, Argentina. Media (n= 3) y error estándar (líneas verticales).

la caída de su materia seca, con máximos en invierno (Figura 2).

Flujos de nutrientes

Los flujos de nutrientes

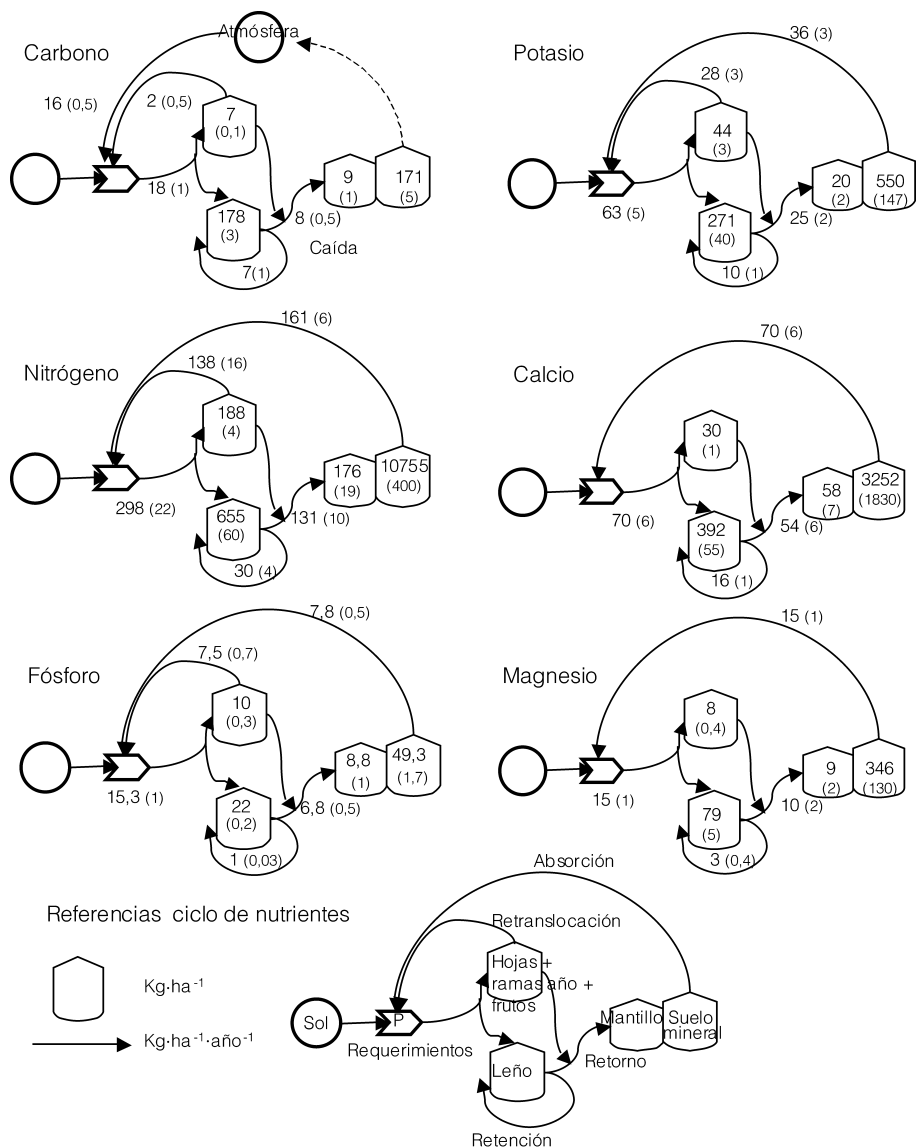


Figura 3. Ciclo del carbono y nutrientes en plantaciones de *P. taeda*, Misiones, Argentina. Media (Error estándar), (n= 3). El C se expresa en $\text{kg} \times 10^3$, los nutrientes en kg.

del P, 17% del K, 23% del Ca y 20% del Mg). Los requerimientos de Ca y Mg, de escasa movilidad floemática, fueron provistos en su totalidad por absorción. La retraslación contribuyó con los requerimientos en porcentajes variables: C= 12%, N= 46%, P= 49% y K= 44%. De la absorción anual, retornó al suelo el 53% del C y 71-87%, de los nutrientes. La absorción representó menos de 4% del Mg y Ca disponibles en el suelo (0-100cm de profundidad), el 6% del K y el 16% del P disponible. Considerando que el N disponible en suelos tropicales es ~10% del total (Fassbender, 1982), su absorción anual representaría el 15% de su almacenaje edáfico. La tasa de renovación de nutrientes en la biomasa (absorción/mineralomasa) fue 9% para el C, y entre 11 y 19% para K, Mg, Ca y N; en tanto la de P fue 25%.

Las acículas constituyeron el principal compartimiento de la caída y retorno de nutrientes. Ellas aportaron 61% del C y 71-78% de los nutrientes. Las tasas de renovación ($\text{kg} \cdot \text{año}^{-1}$) de nutrientes en el mantillo fueron: N= 0,76; P= 0,79; Ca= 0,94; Mg= 1,13 y K= 1,27.

Índices de eficiencia

La eficiencia de reabsorción a nivel foliar fue similar para el N, P y K (Tabla II). Estos valores fueron ~50% sin corrección por Ca, y ~60% con corrección. La diferencia entre esos dos índices resalta el movimiento de C en los compuestos orgánicos que trasladan los nutrientes fuera de las hojas. La proficiencia de reabsorción del N y P fue completa, ya que las concentraciones en las hojas senescentes caídas en el período pico se encuentran por debajo de los límites indicados por Killingbeck (1996). En la plantación de *Pinus taeda* estudiada, el REI presentó valores entre 1,1 y 1,2 para el N, P y K, indicando una importancia similar del ciclado interno y externo en el suministro de esos nutrientes. A nivel de la plantación el cociente retraslación/requerimiento manifiesta que, en un ciclo anual, la retraslación aportó entre 44 y 49% de los nutrientes móviles requeridos. La EUN (Vitousek, 1982) mostró valores aproximadamente similares cuando se tuvo en cuenta la caída fina y la caída foliar. La tasa de circulación relativa de Gray (1983) expresó que la velocidad de ciclado de los nutrientes respecto del de C, y fue $\text{P} > \text{N} \approx \text{Ca} \sim \text{Mg} > \text{K}$.

Discusión y Conclusiones

La corrección de la caída por la reabsorción de C representó un incremento de 29% de la producción foliar, el doble del factor de corrección del 14%

TABLA II
ÍNDICES DE EFICIENCIAS DE REABSORCIÓN Y DE USO DE LOS NUTRIENTES*

Índice	C	N	P	K	Ca	Mg
Eficiencia de reabsorción foliar (%) ¹		40 (2)	39 (3)	44 (3)	-	-
Eficiencia de reabsorción foliar corregida por Ca (%; Vitousek y Sanford (1986))		59 (1)	58 (2)	62 (1)	-	-
Índice de eficiencia de reabsorción (REI; Cuevas y Medina, 1998)		1,1 (0,1)	1,1 (0,2)	1,2 (0,2)	-	-
Proficiencia de reabsorción foliar (mg·g ⁻¹ ; Killingbeck, 1996)		6,3 (0,3)	0,3 (0,01)	1,5 (0,1)	-	-
Retraslocación / Requerimiento (%; Cole y Rapp, 1981)	12 (2)	46 (2)	49 (1)	44 (1)	-	-
Eficiencia en el uso de los nutrientes, con caída foliar (Vitousek, 1982)		103 (5)	1951 (147)	487 (39)	240 (22)	1273 (136)
Eficiencia en el uso de los nutrientes, con caída fina (Vitousek, 1982)		121 (2)	2339 (92)	637 (57)	296 (15)	1618 (129)
Tasa relativa de circulación aérea de los nutrientes (Gray, 1983)		1,9 (0,2)	2,4 (0,1)	1,2 (0,1)	1,8 (0,2)	1,6 (0,05)

*Media anual (ES); n= 3.

¹ Diferencia entre las hojas vivas y recién caídas.

utilizado para *P. taeda* en Florida, EEUU (Martin y Jokela, 2004). Si el crecimiento medio es un indicador de la PPAN, ésta resultó ~20% mayor en la plantación experimental de *P. taeda*, que el promedio de las plantaciones comerciales de Misiones. Asimismo, el incremento medio anual (IMA) del fuste estuvo cerca del extremo superior del rango de plantaciones de pi-

nos en el trópico y subtropical y superó a la mayoría de aquellas del sureste de EEUU (Tabla III). Jokela *et al.* (2004) señalan que las plantaciones de *P. taeda* del hemisferio sur son de mayor producción que aquellas bajo prácticas intensivas del sureste de EEUU, sugiriendo que *P. taeda* no ha alcanzado todavía su crecimiento potencial en su área de distribución origi-

nal, donde la disponibilidad de nutrientes en el suelo constituiría el factor más influyente en la productividad.

La PPAN de la plantación misionera (34,8Mg·ha⁻¹·año⁻¹) superó a la de *P. caribaea* (19Mg·ha⁻¹·año⁻¹) de 14 años de edad, en Brasil, estudiada por Poggiani (1985). En ambas la copa representó 14% de la biomasa aérea y la producción foliar fue 40-50% de la PPAN. En la plantación brasileña la concentración de N, P y Ca en las acículas fue menor, y la de K y Mg fue similar. La mayor absorción en la plantación de *P. taeda*, sustentaría la relativamente alta productividad y concentración foliar (Tabla IV). Las diferencias en productividad y flujo de nutrientes entre plantaciones fueron consistentes con menores precipitaciones anuales (1300mm) y menos nutrientes en el suelo de la plantación brasileña (Tabla IV).

Switzer y Nelson (1972), en una plantación de *P. taeda* de igual edad que la aquí estudiada, ponderaron la contribución al requerimiento de las vías bioquímica y biogeoquímica, consideradas las más importantes del ciclo de nutrientes (Switzer y Nelson, 1972; Cuevas y Medina, 1998). La vía biogeoquímica (caída al mantillo + flujo caulinar) proveyó el 78% del requerimiento de Ca, 66% de K, 54% de Mg, 45% del N y 33% de P; la retraslocación aportó al

TABLA III
PRODUCTIVIDAD PRIMARIA AÉREA NETA (PPAN), INCREMENTO MEDIO ANUAL (IMA) E INCREMENTO PERIÓDICO ANUAL (IPA) DEL FUSTE, Y CAÍDA FOLIAR EN DIFERENTES PLANTACIONES TROPICALES Y SUBTROPICALES DE *Pinus* SP.

Plantación	Edad	Localidad	PPAN	IMA (Mg·ha ⁻¹ ·año ⁻¹)	IPA	Caída Foliar	Fuente
<i>P. taeda</i>	20	Misiones, Argentina	34,8*	16,5*	12,5*	9,5*	Goya <i>et al.</i> (2003)* Este estudio+
<i>P. taeda</i>	20-22	Misiones, Argentina		13,5			SAGPyA (1999) ¹
<i>P. taeda</i>	16	Carolina del N, EEUU		3,5			Jorgensen y Wells (1986)
<i>P. taeda</i> (C)	29-31	Carolina del S, EEUU	11-14		6-8	4,0	Birk y Vitousek (1986)
<i>P. taeda</i> (F)	29-31	Carolina del S, EEUU	11-20		6-12	6,0	Birk y Vitousek (1986)
<i>P. taeda</i> (C)	15-16	Florida, EEUU		2,5	<4,0	3,5	Jokela y Martin (2000)
<i>P. taeda</i> (FW)	15-16	Florida, EEUU		7,0	4,0	6,5	Jokela y Martin (2000)
<i>P. taeda</i> (C)	18	Florida, EEUU		2,4			Martin y Jokela (2004)
<i>P. taeda</i> (FW)	18	Florida, EEUU		6,3			Martin y Jokela (2004)
<i>P. taeda</i>	14	Oklahoma, EEUU			19,2		Jokela <i>et al.</i> (2004)
<i>P. taeda</i> (A)	17	Carolina del N, EEUU			5,2**	4,8	Finzi <i>et al.</i> (2002)
<i>P. taeda</i> (E)	17	Carolina del N, EEUU			7,4**	5,5	Finzi <i>et al.</i> (2002)
<i>P. caribaea</i>	14	San Pablo, Brasil		9,5		8,4	Poggiani (1985)
<i>P. caribaea</i>	12	Puerto Rico	19,4			9,5	Cuevas <i>et al.</i> (1991)
<i>P. caribaea</i>	8-16	Fiji y Brasil		10-20			Wadsworth (1997) ¹
<i>P. caribaea</i>	5-15	Afaka, Nigeria	19,2				Kabeda (1991)
<i>Pinus</i> sp.	16-25	Brasil		8-13			Brown <i>et al.</i> (1997) ¹
<i>Pinus</i> sp.	10-20	Venezuela		5,0			Brown <i>et al.</i> (1997) ¹
<i>Pinus</i> sp.	20-25	Malawi		9,0			Brown <i>et al.</i> (1997) ¹
<i>Pinus</i> sp.	15-18	Madagascar		3-5			Brown <i>et al.</i> (1997) ¹
<i>Pinus</i> sp.	18-25	Mozambique		6,0			Brown <i>et al.</i> (1997) ¹

C: parcelas control: sin fertilización ni control de malezas, F: fertilización, FW: fertilización y control de malezas durante varios años, A: Concentraciones normales (ambientales) de CO₂, E: concentraciones experimentalmente elevadas de CO₂.

** Incluye el incremento de raíces gruesas. ¹: Valores originales en m³·ha⁻¹·año⁻¹ convertidos en Mg·ha⁻¹·año⁻¹ multiplicando por una densidad de 0,51.

TABLE IV
CONCENTRACIÓN DE NUTRIENTES EN HOJAS VIVAS, ABSORCIÓN, RETORNO FOLIAR Y NUTRIENTES
EN EL SUELO EN PLANTACIONES DE *P. taeda* * Y *P. caribaea* **

Nutrientes	<i>Pinus taeda</i> (Goya et al., 2003*; Presente estudio +)				<i>Pinus caribaea</i> (Poggiani, 1985)			
	Concentración en hojas* (mg/g)	Absorción + (kg·ha ⁻¹ ·año ⁻¹)	Retorno +	Contenido en suelo* (0-100cm) (kg/ha)	Concentración en hojas ¹ (mg/g)	Absorción (kg·ha ⁻¹ ·año ⁻¹)	Retorno	Contenido en suelo (0-180cm) (kg/ha)
N	17,0	161	94	10755	10,0	65	44	1290
P	0,9	8	5	49	0,6	3	2	51
K	4,0	36	20	550	4,4	33	22	128
Ca	2,8	70	41	3252	1,9	28	20	492
Mg	0,7	15	8	346	0,8	9	6	90

* Plantación de 20 años de edad, en Misiones, Argentina. ** Plantación de 14 años de edad, en San Pablo, Brasil.

¹ Estimada como mineralomasa/ masa foliar.

requerimiento el 39% del N, 60% del P, 22% del K, y 24% del Mg. En Misiones, el aporte de la vía biogeoquímica (subestimada, pues sólo incluyó la caída), fue ~50% de los requerimientos de macronutrientes (46% del N, 49% del P y 44% del K; Figura 3). Comparada con los resultados de Switzer y Nelson (1972), la plantación misionera tuvo una menor importancia de la retraslocación de P y mayor de K. Los suelos de primera rotación contienen materia orgánica y nutrientes de la selva precedente que proveen P, a despecho de ser suelos rojos cuya componente mineral y antigüedad sugieren su deficiencia (INTA, 1990). Respecto al K, su función en los tejidos y su fácil lixiviado (no medido) nos haría sobreestimar su retraslocación.

La caída es la mayor vía de retorno al suelo (Vitousek y Sanford, 1986; Landsberg y Gower, 1997). Las hojas constituyeron la fracción mayor de la caída. La caída de acículas en Misiones fue elevada en relación con otras plantaciones comparables (Tabla III). También el retorno foliar fue alto. El retorno foliar de N, P y Ca en la plantación misionera fue dos veces mayor que en *P. caribaea* (Tabla IV), lo que resalta la baja fertilidad edáfica de la plantación brasileña (Poggiani, 1985).

La descomposición y mineralización del mantillo constituye otra fuente importante en la provisión de nutrientes. La tasa de recambio de C ($k_L = 0,94$) y nutrientes ($k_L = 0,8-1,3$), y la tasa de descomposición foliar ($k = 0,8/\text{año}^{-1}$; Goya et al., 2000), indicaron una rápida circulación de materiales en el piso forestal.

Las diferencias estacionales en las concentraciones de nutrientes foliares evidenciaron la reabsorción de los nutrientes más móviles, cuyas mínimas invernales coincidieron con la mayor caída. La reabsorción de nutrientes se ha considerado un proceso principal para su conservación (Chapin, 1980; Aerts, 1995,

1996). Los índices de eficiencia de reabsorción expresan la independencia relativa de las plantas del medio externo en la obtención de nutrientes para un nuevo ciclo productivo. La eficiencia de reabsorción foliar de N (40%) y P (39%) de la plantación misionera se encontró en el rango de valores para árboles y arbustos perennifolios (46,7 ±16% para N y 51,4 ±22% para P, según Aerts, 1996). La eficiencia de reabsorción foliar corregida por Ca (Vitousek y Sanford, 1986) para N y P de las plantaciones misioneras fueron similares o algo inferiores a las obtenidas en plantaciones no fertilizadas de *P. taeda* y *P. elliottii* de EEUU estudiadas por Dalla Tea y Jokela (1994) y Birk y Vitousek, (1986).

Según Cuevas y Medina (1998) las especies con mayor independencia de la mineralización/inmovilización tienen mayor probabilidad de subsistir en suelos de baja fertilidad. En base al índice de eficiencia de reabsorción (REI) para N y P identifican tres grupos de especies según: 1) predomine el ciclado interno (REI>2), 2) predomine el ciclado biogeoquímico (REI<1), y 3) en el que el ciclado interno y externo tengan similar importancia (1<REI<2). En Misiones, el REI ~1 para N, P y K de *P. taeda* indicaría una baja respuesta en suelos pobres, y un comportamiento intermedio de esta especie respecto de *P. caribaea var hondurensis* (REI= 1,8 para P y 2,4 para N), y *P. elliottii var densa* (REI<1 para ambos) informados por Cuevas y Medina (1998).

La proficiencia de reabsorción es una medida absoluta y objetiva del grado en que la selección natural ha actuado para minimizar las pérdidas de nutrientes (Killingbeck, 1996). Una alta proficiencia de reabsorción de P es característica de las especies perennifolias (Killingbeck, 1996). Aunque en la plantación misionera las eficiencias de reabsorción no son las más altas reportadas para pinos, estas plantas redujeron

la concentración de nutrientes en las hojas senescentes a niveles bajos, ya que su proficiencia fue completa para el N y P.

La EUN (Vitousek, 1982) de N fue 25% menor y la de P fue similar a los promedios de árboles y arbustos perennifolios estimados por Aerts (1996). Comparado con *P. caribaea* (EUN de N= 192 y de P= 3806; datos de Poggiani, 1985), la plantación misionera de *P. taeda* presentó una EUN ~2 veces menor de N y P, consistentes con las diferencias de fertilidad del suelo (Tabla IV). Birk y Vitousek (1986) indicaron una relación negativa entre la EUN y la disponibilidad de N edáfico en *P. taeda* en Carolina del Sur, EEUU, cuya eficiencia de N disminuyó de 248 en parcelas sin fertilizar, a 182-177 en parcelas fertilizadas. Estos valores superan a la EUN de N (= 121) en Misiones, destacando la buena provisión de N en el suelo misionero.

Vitousek (1984) calculó la EUN del N, P y Ca para bosques tropicales y templados y la relacionó con el retorno de nutrientes en la caída fina. Generalmente, los bosques tropicales de tierras bajas presentan altas tasas de retorno de N y baja eficiencia, mientras que los templados presentan bajas tasas de retorno y altas EUN. La plantación misionera se sitúa en rangos medios de retorno de N, pero con eficiencias mayores que los informados por Vitousek (1984), quien menciona que las bajas eficiencias de los bosques tropicales se deberían a que el N estaría más disponible que lo esperado, debido a las altas tasas de descomposición y a leguminosas fijadoras de N. La mayor eficiencia relativa de la plantación misionera se vincula al cambio composicional de los árboles y a un sotobosque escaso durante gran parte del turno con ausencia de leguminosas. Vitousek (1984) señaló que el P en los bosques tropicales sigue un modelo de relaciones similar al del N. La plantación misionera se encuentra

en el rango intermedio de retorno de P, pero de baja eficiencia, lo que sugiere que el P no sería limitante de la productividad. Los bosques tropicales en general presentan bajas eficiencias de Ca (Vitousek, 1984). La plantación misionera muestra valores de retorno de Ca relativamente bajos y su eficiencia es mayor que la de gran parte de los bosques tropicales.

El índice de circulación de Gray (1983) es indicador ecosistémico del grado de conservación intrabiótica de nutrientes. En la plantación misionera, las concentraciones de K y P fueron señaladas como deficitarias en los suelos (Goya *et al.*, 2003). Sin embargo, el índice de circulación evidenció que solo el K estaría siendo conservado con mayor eficiencia. Los dos últimos índices estimados en este estudio (EUN y de circulación) para el N y P sugieren que ninguno de estos nutrientes se encuentra en condiciones críticas para la productividad de la plantación.

Las condiciones de la plantación estudiada, implantada sobre un suelo de desmonte, no son frecuentes en la zona. A partir de 1970 ha aumentado en Misiones la tendencia a la reforestación en suelos provenientes de la agricultura, capueras (etapas sucesionales tempranas e intermedias) o de corta final (Fernández y Pahr, 1991). El mantenimiento de la fertilidad y de los niveles de productividad de las plantaciones al aumentar las rotaciones dependen mucho de las prácticas de manejo de poscosecha (Goya *et al.*, 2003). En un escenario de cosecha de biomasa aérea total con quema *in situ* de los residuos, el suelo solo podría sostener entre 1,2-1,6 rotaciones de acuerdo al P y K (Goya *et al.*, 2003).

La elevada productividad, los altos requerimientos, absorción y retorno de nutrientes de la plantación de primera rotación, comparada con otras plantaciones de pinos, estaría sostenida en gran parte por el legado orgánico-nutritivo al suelo del bosque húmedo preexistente, y la rápida descomposición del mantillo, que determinan que no se destaquen actualmente nutrientes limitantes. Como resultado de ello se verifican eficiencias en el uso de nutrientes inferiores o similares a otras plantaciones; no obstante la plantación manifiesta eficiencia y proficiencia de retraslación similares a plantaciones en suelos de baja fertilidad, lo que evidencia mecanismos de conservación de nutrientes. Las condiciones de temperatura y precipitación que aceleran los procesos de descomposición y lixiviado de los suelos, las características intrín-

secas del suelo rojo, la evidencia de distintos niveles de degradación del suelo en la zona, la probablemente baja respuesta de esta especie en suelos de baja fertilidad y el análisis de la estabilidad nutritiva de la plantación (Goya *et al.*, 2003), sugieren que el mantenimiento de una alta producción a largo plazo dependerá del manejo.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen a M Pinazo, A Lupi y H Kuzdra por su ayuda en el trabajo de campo; a MJ Sánchez, M Santiago, E López y M Dabadie por la tarea de laboratorio y a M Arturi por el análisis estadístico. 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. Este trabajo fue realizado gracias a la financiación del Proyecto Forestal de Desarrollo (SAPGyA- 3948-AR BIRF).

REFERENCIAS

Aerts R (1995) The advantages of being evergreen. *TREE* 10: 402-407.

Aerts R (1996) Nutrient resorption from senescing leaves of perennials: are there general patterns? *J. Ecol.* 84: 597-608.

Birk EM, Vitousek PM (1986) Nitrogen availability and nitrogen use efficiency in loblolly pine stands. *Ecology* 67: 69-79.

Brown AG, Nambiar EKS, Cossalter C (1997) Plantations for the tropics- Their role, extent and nature. En Nambiar EKS, Brown AG (Eds.) *Management of soil, water and nutrients in tropical plantation forests*. Australian Centre for International Agricultural Research (ACIAR), Monograph 43. Canberra, Australia. pp. 1-23.

Chapin FS (1980) The mineral nutrition of wild plant. *Ann. Rev. Ecol. Syst.* 11: 233-260.

Chapin FS III, Van Cleve K (1989) Approaches to studying nutrient uptake, use and loss in plants. En Pearcy RW, Ehleringer J, Mooney HA, Rundel PW (Eds.) *Plant physiological ecology-field methods and instrumentation*. Chapman and Hall. Londres, RU. pp. 187-207.

Charley JL, Richards BN (1983) Nutrient allocation in plant communities. En Lange OL, Nobel PS, Osmond CB, Ziegler H (Eds.) *Physiological plant ecology IV. Ecosystem processes: mineral cycling, productivity and man's influence*. Springer. Berlin, Alemania. pp. 5-45.

Cole DW, Rapp M (1981) Elemental cycling in forest ecosystems. En Reichle CE (Ed.) *Dynamic properties of forest ecosystems*. Cambridge University Press. Cambridge, RU. pp. 341-409.

Cuevas E, Medina E (1998) The role of nutrient cycling in the conservation of soil

fertility in tropical forested ecosystems. En *Ecology today: an anthology of contemporary ecological research*: International Scientific Publications. New Delhi, India. pp. 263-278.

Cuevas E, Brown S, Lugo A (1991) Above- and belowground organic matter storage and production in a tropical pine plantation and a paired broadleaf secondary forest. *Plant Soil* 135: 257-268.

Dalla Tea F, Jokela E (1991) Needlefall, canopy light interception, and productivity of young intensively managed slash and loblolly pine stands. *For. Sci.* 37: 1298-1313.

Dalla Tea F, Jokela E (1994) Needlefall returns and resorption rates of nutrients in young intensively managed slash and loblolly pine stands. *For. Sci.* 40: 650-662.

Fassbender HW (1982) *Química de suelos*. IICA. Costa Rica. 398 pp.

Fernández RA, Pahr N (1991) Relaciones entre crecimiento de *Pinus elliottii* y tipos de suelo para la provincia de Misiones. Primera aproximación. *Iyvyretá* 2: 121-125.

Finzi AC, DeLucia EH, Hamilton JG, Richter DD, Schlesinger WH (2002) The nitrogen budget of a pine forest under free air CO₂ enrichment. *Oecologia* 132: 567-578.

Goya JF, Frangi JL, Pérez C, Pinazo M (2000) *Ciclo de nutrientes en plantaciones de Pinus taeda en el norte de la provincia de Misiones*. SAGPyA-BIRF. Informe inédito. 63 pp.

Goya JF, Pérez C, Frangi JL, Fernández R (2003) Impacto de la cosecha y destino de los residuos sobre la estabilidad del capital de nutrientes en plantaciones de *Pinus taeda* L. *Ecol. Austral* 13: 139-150.

Gray JT (1983) Nutrient use by evergreen and deciduous shrubs in southern California. *J. Ecol.* 71: 21-41.

Husch B, Miller C, Beers TW (1982) *Forest mensuration*. Wiley. Nueva York, EEUU. 402 pp.

INTA (1990) *Atlas de suelos de la República Argentina*. Tomo II. INTA. Buenos Aires, Argentina. 667 pp.

INTA (2000) *Boletín de información climática*. INTA EEA Montecarlo. Misiones, Argentina. 11 pp.

Jokela EJ, Martin TA (2000) Effects on ontogeny and soil nutrient supply on production, allocation, and leaf area efficiency in loblolly and slash pine stand. *Can. J. For. Res.* 30: 1511-1524.

Jokela EJ, Dougherty PM, Martin TA (2004) Production dynamics on intensively managed loblolly pine stands in the southern United States: a synthesis of seven long-term experiments. *For. Ecol. Manag.* 192: 117-130.

Jorgensen JR, Wells CG (1986) *Foresters' primer in nutrient cycling. A loblolly pine management guide*. Gen. Tech. Rep. SE-37. Southeastern Forest Experimental Station, Forest Service, NC, EEUU. 42 pp.

Kabeda O (1991) Aboveground biomass production and nutrient accumulation in an age sequence of *Pinus caribaea* stands. *For. Ecol. Manag.* 41: 237-248.

Killingbeck K (1996) Nutrients in senesced leaves: key to the search for potential resorp-

- tion and resorption proficiency. *Ecology* 77: 1716-1727.
- Landsberg JJ, Gower ST (1997) *Applications of physiological ecology to forest management*. Academic Press. San Diego, CA, EEUU. 355 pp.
- Luh Huang CY, Schulte EE (1985) Digestion of plant tissue for analysis by ICP emission spectroscopy. *Comm. Soil Sci. Plant Anal.* 16: 943-958.
- Martin TA, Jokela EJ (2004) Stand development and production dynamics of loblolly pine under a range of cultural treatments in north-central Florida, EEUU. *For. Ecol. Manag.* 192: 39-58.
- Nambiar EKS, Fife DN (1991) Nutrient retranslocation in temperate conifers. *Tree Physiol.* 9: 185-207.
- Odum HT (1971) *Energy, power & society*. Wiley. Nueva York, EEUU. 331 pp.
- Poggiani F (1985) Nutrient cycling in *Eucalyptus* and *Pinus* plantations ecosystems. *Silvicultural implications*. *IPEF, Piracicaba* 31: 33-40.
- Pritchett W, Comerford W (1981) Nutrition and fertilization on slash pine. En Stone EL (Ed.) *The managed slash pine ecosystem*. School of Forest Resources and Conservation, University of Florida. Gainesville, FL, EEUU. pp. 69-90.
- SAGPyA (1999) *Argentina, oportunidades de inversión en bosques cultivados*. Secretaría de Agricultura, Ganadería, Pesca y Alimentación. Buenos Aires, Argentina. 211 pp.
- SAGPyA (2001) *Sector Forestal*. Dirección de Forestación. Secretaría de Agricultura, Ganadería, Pesca y Alimentación. Buenos Aires, Argentina. 85 pp.
- Sokal RR, Rohlf FJ (1981) *Biometry*. Freeman. Nueva York, EEUU. 859 pp.
- Switzer GL, Nelson LE (1972) Nutrient accumulation and cycling in loblolly pine (*Pinus taeda* L.) plantation ecosystems: the first twenty years. *Soil. Sci. Soc. Am. Proc.* 36: 143-147.
- Tabatabai MA, Bremner JM (1991) Automated instruments for determination of total carbon, nitrogen and sulfur in soils by combustion techniques. En *Soil analysis, modern instrumental techniques*. 2nd ed. Dekker. Nueva York, EEUU. pp. 261-286.
- Veiga A, Morales J (1983) Fertilização mineral em *Pinus* e *Eucalyptus*. *Silvicultura* 32: 630-632.
- Vitousek, PM (1982) Nutrient cycling and nutrient use efficiency. *Amer. Naturalist* 119: 553-572.
- Vitousek PM (1984) Litterfall, nutrient cycling, and nutrient limitation in tropical forests. *Ecology* 65: 285-298.
- Vitousek PM, Sanford RL (1986) Nutrient cycling in moist tropical forest. *Ann. Rev. Ecol. Syst.* 17: 137-167.
- Wadsworth FH (1997) *Forest production for Tropical America*. USDA. Washington, DC, EEUU. 563 pp.

ABOVEGROUND PRODUCTIVITY AND NUTRIENT CYCLE IN *Pinus taeda* L. PLANTATIONS IN THE NORTH OF THE MISIONES PROVINCE, ARGENTINA

Carolina A. Pérez, Juan F. Goya, Flavia Bianchini, Jorge L. Frangi and Roberto Fernández

SUMMARY

Aboveground net primary productivity (ANPP), nutrient cycling and nutrient use efficiency (NUE) were estimated for three 20 years-old *Pinus taeda* L. experimental plantations in the north of the Misiones province, Argentina. ANPP was $34.8 \pm 1.5 \text{ Mg} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{yr}^{-1}$ and litterfall was $16 \pm 1.1 \text{ Mg} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{yr}^{-1}$. Mean annual bole increment was 20% higher than the mean for commercial plantations of Misiones and near the upper limit of the range for tropical and subtropical pine plantations. Carbon requirement and uptake were 18 and $16 \text{ Mg} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{yr}^{-1}$, respectively. The requirements of N, P, K, Ca and Mg were, respectively, 298, 15, 63, 70 and $15 \text{ kg} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{yr}^{-1}$. Uptake was 161, 8, 36, 70 and $15 \text{ kg} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{yr}^{-1}$, respectively. The requirements were allocated mainly to leaves

and bole. The nutrient return represented ~70-90% of annual uptake. The leaf resorption efficiency of N and P was ~40%, and that of K ~44%. Proficiency of N and O was complete. The nutrient use efficiency (NUE) for N was higher than in tropical forests. Compared with pine plantations on less fertile tropical soils, the plantation from Misiones showed higher ANPP and nutrient uptake and return, but lower NUE, especially of N and P. Despite the fact that P is potentially limiting, this was not evident in the studied plantation probably because organic matter and nutrient legacy from the previous humid forest supplied the first rotation plantation with the initial nutrient needs and fast decomposition of litter continued this supply.

PRODUTIVIDADE AÉREA E CICLO DE NUTRIENTES EM PLANTAÇÕES DE PINUS TAEDA L. NO NORTE DA PROVINCIA DE MISIONES, ARGENTINA

Carolina A. Pérez, Juan F. Goya, Flavia Bianchini, Jorge L. Frangi, e Roberto Fernández

RESUMO

Estimou-se a produtividade primária aérea neta (PPAN) ciclada e eficiência com o uso de nutrientes (EUN) em 3 plantações experimentais de *Pinus taeda* L. de 20 anos, no norte da província de "Misiones", Argentina. A PPAN foi $34,8 \pm 1,5 \text{ Mg} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{ano}^{-1}$ e a queda ao mantillo, $16 \pm 1,1 \text{ Mg} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{ano}^{-1}$. O incremento médio anual do fuste foi 20% maior que nas plantações comerciais em "Misiones" e, próximo ao extremo superior do intervalo para plantações de pinheiros tropicais e subtropicais. O requerimento e absorção de C foi 18 e $16 \text{ Mg} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{ano}^{-1}$ respectivamente. O requerimento de N, P, K, Ca e Mg ($\text{kg} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{ano}^{-1}$) foi respectivamente 298, 15, 63, 70 e 15; e a absorção ($\text{kg} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{ano}^{-1}$) foi 161, 8, 36, 70 e 15. Os requerimentos foram designados principal-

mente às folhas e fuste. O retorno de nutrientes constituiu 70-90% da absorção anual. A eficiência de reabsorção foliar de N e P foi ~40%, e a do K ~44%; a proficiência de N e P foi completa. A eficiência no uso dos nutrientes (EUN) do N foi maior que nos bosques tropicais. Comparada com plantações tropicais de solos menos férteis a plantação de "Misiones" apresentou maior PPAN, absorção e retorno de nutrientes e, menor EUN, principalmente de N e P. Não foi evidente a potencial limitação por P provavelmente devido ao legado de matéria orgânica e nutrientes do bosque úmido precedente, que proporcionou a demanda inicial de nutrientes da plantação de primeira rotação e à rápida decomposição do mantillo que continua a provisão nutritiva.