

ARTICULOS

Mejoramiento de la productividad de plantaciones de *Pinus radiata* D. Don, a través de un método racional de fertilización*

Productivity improvement of *Pinus radiata* D. Don plantations using a rational fertilisation method

JOSE ALVAREZ M.¹, JOSE RODRIGUEZ S.², DOMINGO SUAREZ F.³

¹Jefe Dpto. Productividad de Sitios, Forestal Mininco S.A. e-mail: jalvarez@formin.cmpc.cl

²Asesor. Programa de Fertilización de pino radiata y eucaliptos, Pontificia Universidad Católica de Chile, e-mail: rodrigue@cmet.cl

³Director Programa de Fertilización de pino radiata y eucaliptos, Pontificia Universidad Católica de Chile, e-mail: dsuarezf@puc.cl

SUMMARY

The main purpose of the *Radiata* pine fertilisation research program is to develop a predictive model that prescribes fertilisation for different site conditions.

The simplest approach to the model consists in a nutritional balance equation expressed as: Fertilisation rate = (Tree nutrient demand - Soil nutrient supply) / Fertilisation efficiency.

Units are expressed as kg/hectare but fertiliser efficiency is expressed as recovery percentage.

In order to apply this model, Forestal Mininco S. A. installed four field experiments under four different ecological conditions for tree growth: coast; north central valley; south central valley and volcanic soils. These trials were focused on determining the model's main parameters as well as the growth increase as a result of N, P, K and B fertilisation.

Results so far show preliminary but useful information to estimate the amounts of nutrients required by trees from planting date to two years later. The same occurred for soil nutrient supply as well as fertiliser efficiency. Otherwise, the growth increase rated from zero in the case of potassium fertilisation, up to 160% with phosphorus applications. Nitrogen fertilisation produced a yield increase of 20% and boron additions resulted in smaller increases. The nutrient rates related were 20 g of N, 10 g of B and up to 200 g of P₂O₅ /plant. Fertiliser efficiency values were much smaller than those found for agricultural crops using the same nutritional model.

Key words: productivity, fertilisation, plantations.

RESUMEN

El objetivo general del programa de investigación del uso de fertilizantes es desarrollar un modelo predictivo que permita establecer las prescripciones de fertilización de las plantaciones de la empresa Forestal Mininco S. A. en las distintas condiciones edafoclimáticas de su patrimonio.

El modelo simple consiste, en términos generales, en una ecuación de balance nutricional: Dosis fertilización = (Demanda nutrientes árbol - Suministro nutrientes suelo) / Eficiencia fertilización.

Con el objetivo de desarrollar el modelo se realizaron distintos estudios para establecer los parámetros del modelo y ensayos de dosis de fertilizantes para su validación experimental, en cuatro unidades experimentales en los ecosistemas: secano costero, valle central secano norte y sur y precordillera andina.

El programa de investigación se encuentra en la actualidad en su fase inicial y se dispone de una información preliminar de los parámetros de demanda, suministro y eficiencia de la fertilización de los dos primeros años de crecimiento de los árboles.

* Trabajo presentado en X Silvotecna. IUFRO Conference. Site Productivity Improvement.

Por otra parte, en el sitio experimental de la precordillera la respuesta óptima a la fertilización nitrogenada se logró con una refertilización de 20 gr N/planta, con un incremento del índice de biomasa (D^{2*H}) de un 20%; la dosis óptima de P fue de 200 gr P_2O_5 /planta con un incremento de un 160% del índice de biomasa. En el caso del K, no hubo respuesta.

La fertilización bórica produjo un incremento de 10% con una dosis de 20 gr BNC/planta (sin ser estadísticamente significativa).

Palabras claves: productividad, fertilización, plantaciones.

INTRODUCCION

La incorporación de la fertilización en el manejo de las plantaciones de *Pinus radiata* D. Don se ha estado utilizando en forma creciente en los últimos 6 años en nuestro país, aun cuando ya desde los años 1974-1975 se reporta su irrupción como técnica silvicultural.

No obstante, la intensificación de este tipo de tecnología sobre una mayor superficie de plantaciones se ha visto limitada por la carencia de una base experimental sólida que permita un análisis con resultados ciertos de la técnica, además de la proyección de éstos en el tiempo.

Aparte de lo anterior, una respuesta significativa de la fertilización está sujeta al manejo eficiente de diversos factores relacionados con la silvicultura, tales como: preparación de suelos, producción y transporte de plantas, control de malezas, entre los principales¹. Dada la importancia de estos factores y su desarrollo desigual en el tiempo, hoy día se pueden considerar como posible causa de algunas respuestas erráticas producidas frente a determinadas prescripciones de fertilización realizadas en el pasado.

En los últimos años, a medida que Forestal Mininco S. A. ha incorporado un manejo más intensivo de sus plantaciones, se ha considerado que de igual forma la intensificación de la fertilización permitirá un mejoramiento significativo de la productividad de plantaciones.

Con la finalidad de disponer de una mejor base de antecedentes sobre el empleo de prácticas intensivas de fertilización y sus consecuencias técnico-económicas, se ha desarrollado desde el año 1995, en conjunto con la Pontificia Universidad Católica de Chile (= PUC), un programa de investigación global de la tecnología de la fertilización

en distintos ecosistemas del patrimonio de la empresa.

El programa de investigación aplicada presenta los siguientes objetivos generales:

1. Adaptar y validar un método o modelo de predicción de las dosis de fertilización (Rodríguez 1992) a las plantaciones de *Pinus radiata* D. Don.
2. Capacitar a los técnicos del área operacional en el uso de los fertilizantes de acuerdo a los resultados de la investigación.

El programa se encuentra en la actualidad en su fase inicial, por lo que la presentación se centrará en algunos aspectos generales metodológicos del desarrollo del modelo y en algunos resultados experimentales.

MARCO CONCEPTUAL DEL MODELO

El método o modelo denominado "racional" descansa sobre el principio de que la dosis de fertilización es igual a los requerimientos o demanda de nutrientes de las plantas menos el suministro de nutrientes del suelo. El déficit que normalmente se produce equivale a la dosis de fertilización, considerando su eficiencia de recuperación. Este principio ha sido llamado de "balance nutricional" y puede esquematizarse como sigue:

$$\text{Dosis fertilización} = \frac{\text{Demanda nutrientes árbol} - \text{Suministro nutrientes suelo}}{\text{Eficiencia fertilización}}$$

El núcleo central de su marco conceptual es un principio de la nutrición y fertilización de las especies vegetales que presenta un amplio consenso, aunque no haya sido deducido experimentalmente. Conceptualmente es un modelo simple, racional y sistémico, simple porque no abarca toda la complejidad de la nutrición y sólo tiene como objetivo ser una guía a la toma de decisiones de

¹ No se menciona el riego, dado que esta práctica está reducida a una cantidad limitada de superficie

fertilización, racional porque descansa en los principios de la nutrición y sistémico en el sentido de que la fertilización se inserta en el subsistema de nutrientes del ecosistema.

Las características holísticas del modelo propuesto permiten predecir la respuesta a la fertilización en cualquier condición particular y es válido para todas las especies vegetales.

La eficiencia del modelo simple propuesto no depende de la intensidad de la experimentación, sino del conocimiento y comprensión del sistema de nutrientes en las diferentes especies vegetales y en las distintas condiciones edafoclimáticas. Es decir, de la capacidad que se alcance para determinar correctamente los parámetros de la ecuación general en cada condición particular. Sin embargo, con un escaso número de experimentos, es posible validar su eficacia en la toma de decisiones de los productores o usuarios.

El modelo se ha desarrollado principalmente para cultivos agrícolas (Rodríguez 1992) y se ha validado satisfactoriamente su comportamiento con resultados de la experimentación de campo. Sin embargo, sus principios son aplicables a la estimación de normas de fertilización de plantaciones forestales. Suárez y Rodríguez (1997) han aplicado el modelo a la estimación de las dosis de fertilización de plantaciones de eucaliptos. El modelo propuesto presenta algunas similitudes conceptuales con el Modelo NUTRICALC de Barros *et al.* (1992).

MARCO EXPERIMENTAL

1. LOCALIZACION DE EXPERIMENTOS

El programa de experimentación considera cuatro sitios experimentales en distintos ecosistemas. En el cuadro 1 se presentan los ecosistemas, las asociaciones de series de suelos y su clasificación taxonómica de los distintos sitios experimentales.

Estas asociaciones de series de suelo presentan distintas fases o variaciones; debido a ello se efectuaron algunas observaciones cualitativas generales del perfil del suelo en una calicata excavada en cada uno de los sitios experimentales.

En la figura 1 se presenta la ubicación geográfica de los sitios experimentales.

El clima de las unidades experimentales corresponde a un clima mediterráneo subhúmedo a húmedo (Santibáñez y Uribe 1993). En la figura 2 se muestra el diagrama ombrotérmico de las áreas experimentales.

El clima se caracteriza por un período de escasas precipitaciones desde fines de primavera hasta principios de otoño y un período intenso de precipitación de otoño-invierno.

En los sitios experimentales del valle central secano el período de sequía alcanza a 7 meses y en la precordillera andina sólo a 6 meses. La precipitación aumenta de mar a Cordillera de los Andes y de norte a sur, encontrándose en un rango

CUADRO 1

Asociaciones de series de suelos de los sitios experimentales.
Association of the soil series at the experimental sites.

Sitios experimentales	Ecosistema	Asociación de series de suelos	Clasificación suelos
Escuadrón	Cordillera de la costa y faldeos occidentales	Curanilahue	Ultisol
Colicheu	Arenas valle central	Santa Teresa	Entisol
El Cerezo	Cordillera de la costa, faldeos orientales	Correltué	Andisol
Pancul	Valle central secano sur	Metrenco	Ultisol

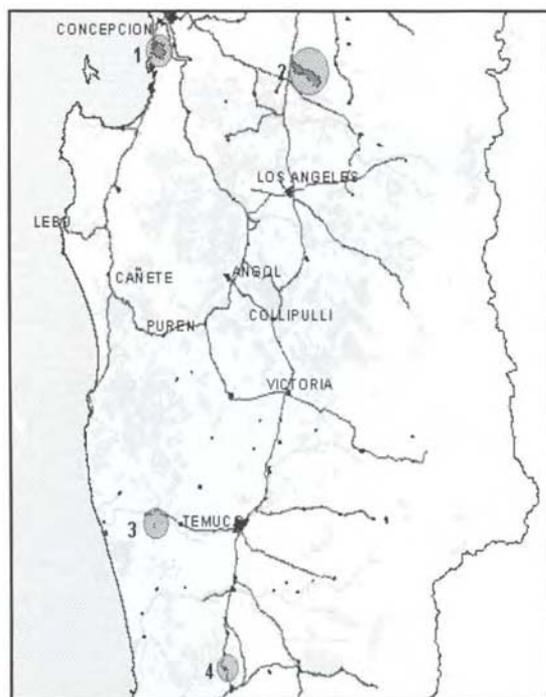


Figura 1. Ubicación de los sitios de ensayo.

Location of test sites

entre 800 mm/año (valle central seco norte) a 1800 mm/año.

Los suelos de las unidades experimentales son profundos, presentando el Santa Teresa una napa freática fluctuante, de texturas arcillosas los suelos Metrenco y Curanilahue y franco limosas, el Correltué.

Por otra parte, la materia orgánica alcanza alrededor de 5% en los suelos Metrenco y Curanilahue, 2.5% en el Santa Teresa y 20% en el Correltué.

Todos los suelos, a excepción del Santa Teresa, muestran contenidos muy bajos de P y la capacidad de retención de P es muy alta en el Correltué, media en el Metrenco y Curanilahue y muy baja en el Santa Teresa.

Los contenidos de K son medios a altos para suelos forestales y, a excepción del B que muestra niveles muy bajos, el resto de los nutrientes se encuentra en un rango adecuado.

En el cuadro 2 se presentan las características físico-químicas y nutricionales de la estrata superficial (0-20 cm) promedio de las muestras compuestas tomadas en los distintos sitios experimentales.

2. EXPERIMENTACION

La experimentación tiene como objetivos principales obtener los parámetros del modelo propuesto y establecer ensayos de dosis de fertilización para ser utilizados en la validación de las dosis estimadas por el modelo.

Por lo tanto, los estudios o experimentos están dirigidos al desarrollo de los parámetros del modelo: demanda de nutrientes de los árboles, suministro de nutrientes del suelo y eficiencia de la fertilización.

Por otra parte, se efectuaron en los distintos sitios experimentales ensayos de dosis de fertilizantes de N, P, K y B en el establecimiento que consideraron algunos tratamientos con dosis de posplantación.

Todos los ensayos de dosis consideraron análisis foliar (por tratamiento), el que permitiría ajustar los estándares internacionales y, junto a estudios sobre época y edad del tejido a muestrear, fundamentar el desarrollo de un sistema de diagnóstico y control de posplantación. Los ensayos se establecieron entre julio y agosto de 1995.

En todos los sitios experimentales se efectuó un manejo intensivo con una eliminación permanente de las malezas.

DESARROLLO DEL MODELO

1. DEMANDA DE NUTRIENTES DE LOS ÁRBOLES

Con el objeto de determinar la demanda de nutrientes de los árboles en los distintos ecosistemas se efectuaron en cada sitio experimental un muestreo destructivo semestral de los árboles y una medición de los componentes de la biomasa y de sus contenidos de nutrientes. En este muestreo se consideraron los tratamientos con y sin fertilización, extrayéndose una submuestra compuesta de 6 árboles por tratamiento (correspondiente a plantas con diámetro de cuello de la clase promedio del tratamiento). Estas plantas se pesaron en terreno y se separaron en ramas, acículas, corteza y tallo. Parte de este material fue enviado al Laboratorio de la Facultad de Agronomía e Ingeniería Forestal de la Pontificia Universidad Católica de Chile. A cada muestra se le determinó: materia seca, humedad, contenidos de N, P, K y B. En el análisis sólo se consideró la parte aérea de los árboles.

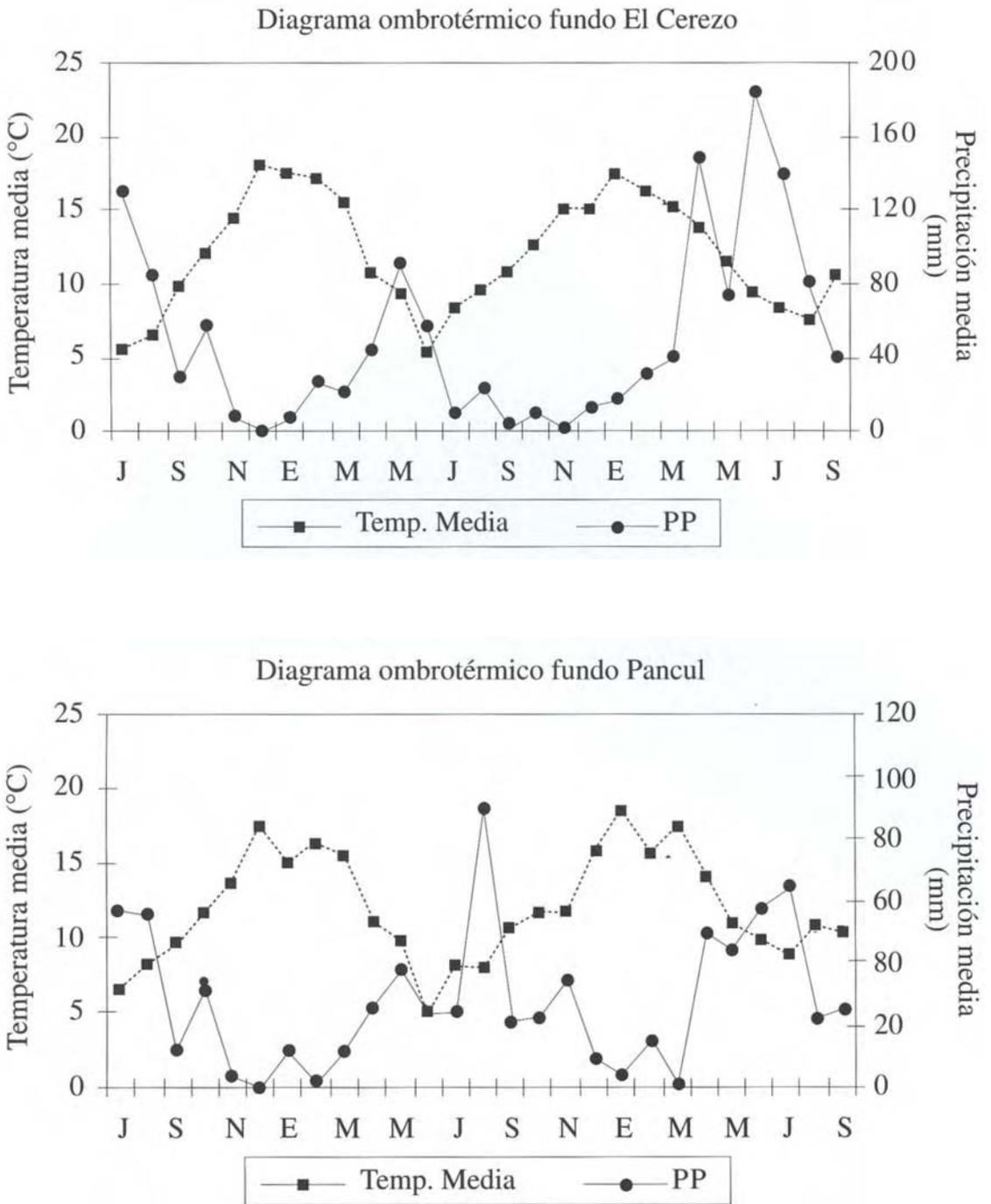


Figura 2. Diagramas ombrotérmicos para los sitios de ensayo (Santibáñez 1993).
 Ombrothermic diagrams for the essay sites (Santibáñez 1993).

CUADRO 2

Caracterización físico-química y nutricional de los suelos de los distintos sitios experimentales.
Physical-chemical and nutritional characteristics of soils at the different experimental sites.

Sitios experimentales	pH H ₂ O	pH CaCl ₂	Mat Org. (%)	P Olsen (ppm)	Al NH ₄ -Ac (ppm)	S (ppm)	Ca (meq)	Mg (meq)	K (meq)	Na (meq)	Suma Bases (meq)	Al KCl (meq)	Sat. Al (KCl) (%)	Zn (ppm)	Cu (ppm)	Mn KCl (ppm)	B (ppm)
Colicheu	6.02	5.18	2.49	8.30	94	1.3	1.97	0.85	0.17	0.02	3.01	0.05	2.1	0.39	0.87	3.97	0.19
Escuadrón	4.93	4.40	4.70	1.97	305	-	2.13	0.87	0.40	0.04	3.45	1.11	21.8	-	-	-	1.24
Pancul	5.63	4.72	5.03	2.30	211	5.3	4.04	2.04	0.23	0.11	6.42	0.38	4.1	0.60	2.42	11.65	0.31
El Cerezo	5.81	5.08	19.57	1.05	1.030	9.9	1.18	0.26	0.09	0.05	1.58	0.09	6.7	0.33	0.18	2.85	0.30

Los resultados obtenidos de dicho muestreo (biomasa) fueron extrapolados a la hectárea, mediante el uso de la densidad de árboles plantados en el sector del ensayo.

Paralelamente, se establecieron trampas para recolectar la hojarasca caída mensualmente y determinar su biomasa y contenido de nutrientes (reutilización de nutrientes o ciclo interno).

En el cuadro 3 se muestra la acumulación de biomasa en los primeros años de crecimiento de los árboles.

Las acumulaciones de biomasa más altas se obtuvieron en los ecosistemas del secano costero y de la precordillera andina, las que son un 30% superiores a las de los suelos rojo arcillosos y arenales del valle central. Hay que señalar que los suelos arenales donde se instaló el sitio experimental presentan un nivel freático fluctuante.

Las tasas de crecimiento de los árboles en el primer año son inferiores a las señaladas por Cellier *et al.* (1985), como modelo para *Pinus radiata* D. Don que alcanzaban a 500 kg materia seca/ha-año. Sin embargo, las tasas del 2º año indicadas por estos autores fueron de 3.000 kg MS/ha-año, o sea inferior en un 65% a la obtenidas en Escuadrón.

Por otra parte, se establecieron funciones de regresión entre la biomasa y el índice de biomasa (D²*H).

Los coeficientes de correlación son aceptables siendo ligeramente bajos en Colicheu y en Escuadrón. En Pancul y El Cerezo la biomasa presenta una buena asociación con los D²*H en los dos años de crecimiento de los árboles. También se

CUADRO 3

Acumulación de biomasa de los árboles representativos de los distintos sitios experimentales durante dos temporadas.

Biomass accumulation by trees representing the different experimental sites during two seasons.

Sitio experimental	Biomasa (kg/ha)	
	12 meses	24 meses
Escuadrón	201	4.817
Colicheu	200	3.075
Pancul	167	3.393
El Cerezo	219	4.965

obtuvo una asociación alta entre ambos parámetros al considerar todos los valores de los sitios experimentales en su conjunto ($r^2 = 0.94$ en el segundo año).

El estudio semestral de las *tasas de absorción de nutrientes* de los árboles considera la medición de la concentración de nutrientes de los distintos componentes de la biomasa y así determinar su contenido de nutrientes.

En el cuadro 5 se presenta el contenido de nutrientes del 2º año de crecimiento de los árboles.

Los valores cero corresponden a mediciones inexistentes. Los contenidos de N son altos y superiores a los señalados por Beets y Pollock (1987) y Cellier *et al.* (1985). Estos autores indican valores en el segundo año entre 20 y 30 kg N/ha. Nambiar (1983) presenta un crecimiento muy si-

CUADRO 4

Regresiones lineales para estimar la biomasa de los árboles a partir de los índices de biomasa ($D^{2*}H$) y sus respectivos coeficientes de correlación en los distintos sitios experimentales en el primer y segundo año.

Lineal regression to estimate tree biomass from the biomass list ($D^{2*}H$) and their respective correlation coefficients at the different experimental sites in the first and second year

Sitio experimental	Funciones de regresión			
	1° año	r	2° año	r
Escuadrón	$y = 131+0,1256*x$	0,82	$y = 1557+0,1726*x$	0,84*
Colicheu	-	-	$y = 493+0,1650*x$	0,78*
Pancul	$y = 26+0,4275 *x$	0,98	$y = 234+0,2870*x$	0,94*
El Cerezo	$y = 21+0,4054*x$	0,92	$y = 289+0,2450*x$	0,91*
Función promedio	$y = 74+0,2942*x$	0,87	$y = 400+0,2287*x$	0,94*

x = Índice de biomasa ($D^{2*}H$)
y = Biomasa (kg MS/ha)

CUADRO 5

Contenido de nutrientes de la biomasa acumulada por los árboles fertilizados representativos en los distintos sitios experimentales en el primer y segundo año de crecimiento de los árboles.

Nutrient contents of the biomass accumulated by the fertilised trees at the different experimental sites in the first and second year of growth.

Sitio experimental	Contenido de nutrientes años 1 y 2					
	N		P		K	
	año 1	año 2	año 1	año 2	año 1	año 2
	(kg/ha)					
Escuadrón	8	66	0,7	6,6	4	42,4
Colicheu	0	39	0	5,0	0	21,9
Pancul	4	41	0,3	4,0	2	21,5
El Cerezo	7	41	0,6	4,1	4	24,5

milar en el primer y segundo año, y el contenido de N acumulado en el segundo año es de 30 kg N/ha. La elevada cantidad de N acumulado refleja el relativamente alto suministro de N del suelo junto a la alta dosis de N aplicada en el establecimiento.

El contenido de P de la biomasa en el segundo año de crecimiento de los árboles es también alto comparado con los señalados en la literatura. Así, Cellier *et al.* (1985) indica un contenido de 3 kg

de P/ha y Madgwick *et al.* (1977) de 1 kg de P/ha. En estos dos trabajos el crecimiento de los árboles es inferior al del presente estudio.

El contenido de K alcanza a los dos años a valores de alrededor de 20 kg K/ha. Estos son ligeramente superiores a los 16 kg K/ha indicados por Cellier *et al.* (1985) con una biomasa menor. En Escuadrón con una biomasa superior en un 50% el contenido alcanza a 42 kg K/ha.

Las demandas de nutrientes en el primer y segundo año de crecimiento de acuerdo a las categorías de biomasa establecidas y a los requerimientos internos estimados aparecen en el cuadro 6.

En el primer año la demanda de N es muy baja, no alcanzando en ninguna de las categorías de crecimiento a 10 kg N/ha. Algo similar ocurre con la demanda de P que es inferior a 1 kg P/ha. Sin embargo, en el caso del P en este primer año la eficiencia de absorción del sistema radicular se encuentra muy limitada y a pesar de la baja demanda siempre se producirá un déficit nutricional si el suministro de P del suelo es bajo. En el segundo año las demandas de N comienzan a ser significativas y en las categorías medias de acumulación de biomasa y especialmente en las altas la demanda supera el suministro de N de los suelos.

Esto indicaría que la respuesta a la fertilización es difícil que ocurra en el primer año, pero es posible que tenga lugar en el segundo año, especialmente en la categoría alta y en la categoría media de biomasa con un suministro bajo de N del suelo.

CUADRO 6

Demandas de nutrientes en el primer y segundo año de crecimiento de acuerdo a las categorías de biomasa establecidas y a los requerimientos internos estimados.

Nutrient demand in the first and second year of growth according to the established biomass categories and the estimated internal demands.

Categoría productividad	Biomasa (kg MS/ha)		Demanda N (kg/ha)		Demanda P (kg/ha)	
	1 ^{er} año	2 ^o año	1 ^{er} año	2 ^o año	1 ^{er} año	2 ^o año
Baja	200	<2000	3.0	20	0.30	2
Media	200-300	2000-3000	3.0-4.5	30-45	0.30-0.45	2-3
Alta	300-500	3000-5000	4.5-7.5	45-75	0.45-0.50	3-5

En el caso del P la respuesta a la fertilización fosforada se mantiene, dada la baja eficiencia de absorción de P. El efecto residual de la fertilización va a depender de la magnitud de la dosis de P aplicada en el establecimiento (primer año). Si ésta es relativamente baja su efecto residual puede ser insuficiente para satisfacer demandas de 2 a 5 kg P/ha si el suministro de P inicial del suelo es bajo.

Por otra parte, la concentración ponderada de los nutrientes de los distintos componentes de la biomasa permitió establecer el requerimiento interno de N y P para árboles con una nutrición óptima en el primer y segundo año de crecimiento, es decir, el contenido de nutriente (%) existente en la biomasa seca. En el cuadro 7 se presenta el requerimiento interno de nutrientes de los árboles.

CUADRO 7

Requerimiento interno de nutrientes de los árboles en el primer y segundo año de crecimiento (%).

Internal nutrient demand of trees in the first and second year of growth (%).

Nutriente	Período de crecimiento	
	1 ^{er} año	2 ^o año
Nitrógeno	1.50	1.05
Fósforo	0.15	0.10
Potasio	0.80	0.55
Calcio	0.22	0.15
Magnesio	0.10	0.10

Los valores del segundo año son inferiores a los señalados como requerimiento interno para los árboles del primer año debido a la disminución del porcentaje de hojas y al aumento de la proporción de ramas, y parcialmente, de la corteza y el tallo en el conjunto de la biomasa. La concentración de nutrientes de estos últimos componentes es menor a la de las hojas y, de esta forma, baja el requerimiento interno en el segundo año.

Establecidos tentativamente los requerimientos internos de los nutrientes es posible, conociendo la altura y el diámetro (DAC) de los árboles, calcular su demanda de nutrientes de acuerdo al siguiente procedimiento: 1) determinar la altura y el diámetro de los árboles a una cierta edad; 2) calcular el índice de biomasa ($D^2 \cdot H$); 3) utilizar función de regresión del sitio o general según la edad de los árboles; 4) calcular la biomasa (kg MS/ha); 5) utilizar los requerimientos internos de nutrientes según la edad de los árboles; 6) calcular la demanda de nutrientes en base a la biomasa calculada y al requerimiento interno para una determinada edad.

Para estimar la demanda de nutrientes en el primer año de crecimiento se debe calcular la biomasa de acuerdo a un índice de productividad potencial del sitio. Este índice, en esta oportunidad, se expresó en función de la variable disponibilidad de agua del suelo (pluviosidad y capacidad de retención de humedad del suelo). En la medida de la existencia de menos restricciones de humedad del suelo, se expresa el índice como alto, medio o bajo.

2. SUMINISTRO DE NUTRIENTES

Suministro de nitrógeno. El suministro de N se estima en base al modelo simple desarrollado por Matus (1997). El modelo descansa sobre el supuesto de que los ecosistemas agrícolas y forestales alcanzan un cuasi equilibrio después de un número de años calculable. Si el ecosistema forestal está en equilibrio, las entradas de nitrógeno orgánico serán iguales a las salidas (mineralización del nitrógeno orgánico del suelo). De esta forma, conociendo las entradas de nitrógeno orgánico anual (residuos y reciclaje), es posible estimar las salidas (mineralización de N), es decir, el suministro de N del suelo.

De acuerdo a este planteamiento, el uso y la condición de los residuos de cosecha y mantillo (hojarasca) antes de la plantación pasan a ser determinantes para estimar el suministro de N del suelo.

El modelo de Matus y Rodríguez (1995) también permite calcular la mineralización de N, conociendo el input de N del suelo, las condiciones de humedad y temperatura de los suelos y la lixiviación de N, si el sistema no se encuentra en equilibrio. En el cuadro 8 se presenta el uso del suelo antes de la plantación y su productividad en los distintos sitios experimentales.

CUADRO 8

Uso del suelo antes de la plantación y su productividad en los distintos sitios experimentales.

Soil use before planting and its productivity at the different experimental sites.

Sitio experimental	Uso anterior	Productividad
Escuadrón	Bosque	22 m ³ /ha/año (1)
Colicheu	Bosque	15 m ³ /ha/año (1)
El Cerezo	Pradera	4000 kg MS (2)
Pancul	Pradera	2500 kg MS (2)

(1) Determinados en base a volumen cosechado en la anterior rotación. (Reforestación).

(2) Determinados en base a biomasa esperada al 2º año (Forestación).

La productividad está dada en gran parte por las condiciones edafoclimáticas del sitio y por las características de manejo del bosque y de la pradera. Estas distintas producciones primarias establecen entradas diferentes de residuos o de reciclaje en los sistemas agropecuarios o forestales.

La incorporación de residuos en la incorporación de praderas y cereales ha sido estudiada por Suárez y Rodríguez (1997) en distintas condiciones edafoclimáticas. En suelos forestales se cuenta con los estudios de Huber *et al.* (1986) en *Pinus radiata* D. Don y de Suárez y Rodríguez (1997) en eucaliptos, y por la abundante información existente en el extranjero ajustada a la distinta productividad de los sitios experimentales.

En la actualidad se están midiendo las biomásas y contenidos de nutrientes de la hojarasca y/o mantillo en rodales adultos de pino radiata de distintas productividades. Paralelamente, se ha iniciado la medición de la mineralización *in situ* (Raison *et al.* 1987, Smethurst and Nambiar 1990) para validar el modelo de mineralización de N.

Suministro de P. El suministro de P del suelo corresponde a la siguiente formulación (Rodríguez 1992, Pinochet 1995):

$$\text{Suministro P}_{(kg P/ha)} = P_{Olsen(ppm)} * *$$

$$\text{Eficiencia - absorción P}_{(kg P/ha \text{ absorb.}/ppm P_{Olsen \text{ suelo}})}$$

El suministro de P del suelo proviene de la fracción extractable de P-Olsen vinculada a la concentración de P inicial (tiempo 0) que rodea los granulos del fertilizante aplicado (Pinochet 1995). De esta forma, la determinación del P-Olsen es un índice del fósforo activo del suelo. Sin embargo, no todo el P activo extractable Olsen puede ser interceptado por las raíces de los árboles. La eficiencia de absorción depende de la densidad radicular. A una mayor densidad radicular, las posibilidades de intercepción de los granulos por las raíces se incrementan y así su eficiencia de absorción. La densidad radicular de distintas especies vegetales ha sido estudiada por Noordwijk y de Willigen (1988) y han determinado su relación con la eficiencia de absorción de P.

El suministro de P después de la aplicación inicial de P en el establecimiento es posible determinarlo en el tiempo conociendo el efecto residual

del P aplicado, la demanda de P y el ciclo interno del P (Suárez y Rodríguez 1997).

La variación del suministro de P en el tiempo en relación con la demanda y la eficiencia de absorción de P permite determinar la fertilización de posplantación.

El modelo de efecto residual de P (Barrow 1989, Rodríguez 1992, Pinochet 1995) permite tanto determinar el efecto residual como establecer una estrategia de suministro en el tiempo.

Por lo tanto, el suministro de P del suelo considera un parámetro de cantidad de P activo disponible (P-Olsen) y otro de capacidad.

En el cuadro 9 se presenta la eficiencia de absorción de P de árboles de 2 sitios experimentales en los dos primeros años de crecimiento.

CUADRO 9

Eficiencia de absorción de P en los árboles en el 1^{er} y 2^o año de crecimiento.
Absorption efficiency of P by the trees in the first and second year of growth.

Sitio experimental	Eficiencia absorción (kg P/ha/ppm P-Olsen)	
	1 ^{er} año	2 ^o año
Pancul	0.01	0.18
El Cerezo	0.03	0.27

La eficiencia de absorción se calculó sobre la base de la eficiencia de la fertilización fosforada obtenida experimentalmente en los ensayos de dosis de P efectuados en el Proyecto Mininco-PUC, que presentan dosis óptimas de entre 100-200 kg P₂O₅/ha.

Tentativamente, en una primera instancia se puede considerar una eficiencia de absorción promedio para *Pinus radiata* de 0.02 kg P/ha/ppm P-Olsen en el primer año y 0.22 kg P/ha/ppm P-Olsen en el segundo año de crecimiento.

Estas eficiencias de absorción son muy bajas si se comparan con las gramíneas que son de alrededor de 2 kg P/ha/ppm P-Olsen. Sin embargo, se debe reconocer que la densidad radicular de las gramíneas es de alrededor de 4 cm/cm³ y la de las coníferas de alrededor de 0.05 cm/cm³ en el primer año, o sea 100 veces más bajas que la de las gramíneas. En plantaciones adultas Nambiar (1983) indica que la densidad radicular puede encontrarse entre 0.8 y 5.0 cm/cm³.

La eficiencia de absorción variará con la edad de los árboles, como también en aquellas variables que determinan el crecimiento o exploración radicular: la aireación y la disponibilidad de agua en el suelo como indican Noordwijk y De Willigen (1988).

En la actualidad se está desarrollando una función logística que relaciona la densidad radicular (edad de los árboles) con la eficiencia de absorción de P en base a la información obtenida mediante mediciones mensuales del crecimiento radicular *in situ* (informe interno de Forestal Mininco S. A., 1997) en distintas condiciones edafoclimáticas.

Suministro de K y B. En el caso del potasio (K) se considera un nivel crítico de 50 ppm de K-intercambiable. Bajo este valor se aplica una dosis de corrección. En el caso del boro (B) se sigue una estrategia de fertilización preventiva.

3. EFICIENCIA DE LA FERTILIZACION

La eficiencia de la fertilización corresponde a la cantidad de fertilizante aplicado (expresado en %), recuperado o absorbido por las distintas especies vegetales con una nutrición óptima.

Fertilización nitrogenada. El N no recuperado de la fertilización se pierde a través de los procesos que conducen a la pérdida de N del suelo (desnitrificación, inmovilización y lixiviación).

La baja respuesta en los primeros años a la fertilización nitrogenada ha impedido determinar con precisión este parámetro. Tentativamente se utiliza una eficiencia de 50% que es común en los cultivos agrícolas.

Fertilización fosforada. La formulación del cálculo de la eficiencia de la fertilización fosforada es la siguiente:

$$FFP = KP_{0(ppm\ P-Olsen/kg\ P/ha)} * EA_{(kg\ P/ha/ppm\ P-Olsen)}$$

donde:

- EFP = Eficiencia de fertilización fosforada.
- KP₀ = Fracción del P-Olsen que permanece extractable.
- EA = Eficiencia de la absorción de P.

Para el cálculo de la eficiencia de la fertilización se requiere:

- a) Análisis de Al-extractable del suelo.
- b) Función KP_0 versus Al-extractable.
- c) Densidad aparente del suelo (para transformar ppm P a kg de P/ha).
- d) Eficiencia de absorción de P de los árboles (EA).

El aluminio extractable es un índice de la capacidad de retención del P del suelo, es decir, de la eficiencia vinculada al suelo. Se ha desarrollado una función (Rodríguez 1992) entre el KP_Q medido en laboratorio y este índice, lo que permite calcularlo a partir del Al-extractable.

En el cuadro 10 se muestra la eficiencia de la fertilización fosforada, calculada experimentalmente para dos sitios, donde las dosis óptimas fueron de 100 y 200 kg P_2O_5 /planta.

CUADRO 10

Eficiencia de la fertilización con P en sitios experimentales en el 1^{er} y 2^o año de crecimiento de los árboles.

Fertilisation efficiency of P in experimental sites in the first and second year of growth.

Sitio experimental	Eficiencia 1 ^{er} año	Eficiencia 2 ^o año
Pancul	0.001	0.018
El Cerezo	0.003	0.027

4. DOSIS DE FERTILIZANTES:
RESULTADOS EXPERIMENTALES

En los cuadros 11 al 14, a modo de síntesis, se presentan las respuestas a la fertilización de N, P, K y B en árboles de 1 y 2 años en un suelo Andisol.

Dosis de nitrógeno. En el cuadro 11 se muestra el efecto de distintas dosis de N (nitrato de amonio neutralizado, NAN) en el índice de biomasa de árboles con 1 y 2 años de crecimiento.

En el primer año no se observó una respuesta a la fertilización nitrogenada. Sin embargo, en el 2^o año aparece una respuesta en los tratamientos que consideraban una refertilización. Hay que señalar que el manejo anterior correspondía a una pradera natural. Es posible que el "peak" de mineralización se haya producido en el primer año después de la incorporación de la pradera natural. En el caso de reforestación la respuesta puede aparecer en el

CUADRO 11

Efecto de distintas dosis de N en el índice de biomasa semestral de los árboles en El Cerezo durante las dos temporadas de crecimiento de los árboles.

Effect of the different N doses in the semestral biomass index of the trees at El Cerezo in two growing seasons.

El Cerezo

Dosis N (g N/planta)	Índice biomasa ($D^2 \cdot H$)		DMS 0.05
	12 meses	24 meses	
0	446	6875	c
10	488	6809	c
10+10	506	7575	b
20	441	7160	bc
20+20	465	8182	a
40	405	7620	b
80	323	7078	bc
DMS (0.05)	75	527	
DMS (0.10)	62	431	
CV (%)		5	

Sólo se calculó coeficiente de variación a los 24 meses de edad.

tercer año debido a que el "peak" de mineralización se concentra en el 2^o y 3^{er} año después de la cosecha (Smethurst y Nambiar 1990; Fife *et al.* 1991). El incremento del índice debido a la dosis óptima de N fue de alrededor de 20%.

Dosis de fósforo. En el cuadro 12 se muestra el efecto de distintas dosis de P (superfosfato triple, SFT) en el índice de biomasa ($D^2 \cdot H$) de árboles con 1 y 2 años de crecimiento.

El suelo del ensayo presentó un nivel inicial de P-Olsen de 2.1 ppm (muy bajo) y un contenido de aluminio-extractable de 1.030 ppm (muy alto).

En el primer año la dosis que permitió el índice más alto de biomasa fue la de 200 gr P_2O_5 /planta al igual que en 2^o año. El incremento debido a la fertilización fosforada fue de 160%.

Una respuesta similar a la fertilización fosforada ha sido señalada por Snowdon y Waring (1985). Estos autores australianos aplicaron dosis hasta 234 kg P/ha (es decir, 535 gr P_2O_5 /planta, aplicados al

CUADRO 12

Efecto de distintas dosis de P sobre el índice de biomasa de los árboles de El Cerezo durante las dos temporadas de crecimiento.

Effect of the different P doses on the biomass index of the trees at El Cerezo in two growing seasons.

El Cerezo

Dosis P (g P ₂ O ₅ /planta)	Indice biomasa (D ² *H)		DMS 0.05
	12 meses	24 meses	
0	252	5389	e
25	425	7296	d
25+25	352	7164	d
50	450	7969	cd
50+50	496	9181	bc
100	561	9693	b
200	753	14229	a
DMS (0.05)	132	1664	
DMS (0.10)	109	1560	
CV (%)		12	

voleo) en el establecimiento y cuatro años después concluyeron que no hubo evidencias en la optimización del crecimiento debido a los niveles más altos de P adicionado. La curva de respuesta que obtuvieron es muy similar a la de los árboles de El Cerezo.

En este ensayo la demanda de P fue alta y el suministro muy bajo y la capacidad de retención del P del suelo muy alta. Por otra parte, no hubo un efecto de la refertilización estadísticamente significativo.

Dosis de potasio. En el cuadro 13 se presenta el efecto de distintas dosis de K en el índice de biomasa durante las dos temporadas de crecimiento.

El contenido de K de intercambio del suelo fue de 101 ppm. En el experimento no hubo respuesta estadísticamente significativa de las dosis de K sobre el índice de biomasa de los árboles. El contenido relativamente alto de K para suelos forestales explica la falta de respuesta a la fertilización potásica, que por lo demás es poco frecuente en plantaciones de *Pinus radiata* D. Don.

Dosis de boro. En el cuadro 14 se presenta el efecto de distintas dosis de B (boronatrocálita, BNC) en el índice de biomasa de árboles con uno y dos años de crecimiento.

CUADRO 13

Efecto de distintas dosis de K sobre el índice de biomasa de los árboles en El Cerezo durante las dos temporadas de crecimiento.

Effect of the different K doses on the biomass index of the trees at El Cerezo in two growing seasons.

El Cerezo

Dosis K (g K ₂ O/planta)	Indice biomasa (D ² *H)	
	12 meses	24 meses
0	400	8237
10	455	8906
10+10	487	9629
20	479	9387
20+20	515	9793
40	451	9163
80	415	8885
DMS (0.05)	n.s.	n.s.
DMS (0.10)	n.s.	n.s.
CV (%)		12

CUADRO 14

Efecto de la fertilización bórica sobre el índice de biomasa de los árboles de El Cerezo durante las dos temporadas de crecimiento.

Effect of boric fertilisation on the biomass index of the trees at El Cerezo in two growing seasons.

El Cerezo

Dosis P (g BNC/planta)	Indice biomasa (D ² *H)		DMS 0.05
	12 meses	24 meses	
0	473	7915	ab
20	504	8627	a
20+20	397	7619	ab
40	365	6994	bc
40+40	355	6832	bc
60	345	6838	bc
80	370	6108	c
DMS (0.05)	121	1335	
DMS (0.10)	100	1102	
CV (%)		12	

En el ensayo no hubo un efecto positivo estadísticamente significativo de la aplicación de B. Cabe señalar que el índice de biomasa de los árboles más altos correspondió a la aplicación de 20 gr BNC/planta. Sin embargo, se manifestó un efecto tóxico a partir de la aplicación de 40 gr BNC/planta, que no alcanzó a ser estadísticamente significativo. Este sitio experimental es el que presenta el régimen hídrico del suelo más favorable. El contenido inicial de B fue de 0.39 ppm.

CONCLUSIONES

Dado el corto tiempo de desarrollo del estudio, sólo es posible mencionar aquellos aspectos que han sido relevantes en el apoyo a la toma de decisiones de fertilización de la empresa Forestal Mininco S. A.

1. Se han logrado establecer los parámetros de un modelo de fertilización (que funciona bajo indicadores de demanda de nutrientes de las plantas en los dos primeros años de desarrollo, suministro de nutrientes del suelo y eficiencia de la fertilización), lo que ha contribuido a precisar la dosis de fertilizantes a aplicar al establecimiento de plantaciones de *Pinus radiata* D. Don.
2. Se han encontrado respuestas significativas a la fertilización fosforada (mejor dosis de 200 gr P₂O₅/planta), bórica (mejor dosis de 20 gr B/planta) y nitrogenada (mejor dosis de 20 + 20 gr N/planta).
3. No se han encontrado respuestas significativas a la fertilización potásica.
4. La mejor forma de aplicación de fertilizantes lograda en los ensayos es la de dos bandas de 60 cm de largo, a 15 cm de la planta ya 15 cm de profundidad.
5. No se encontraron diferencias significativas en el uso de distintas fuentes de nitrógeno, por lo que se sugiere optar por la de menor costo.
6. En donde hay respuesta a la fertilización fosforada, la fuente superfosfato triple logra una productividad alrededor de un 15% superior a roca fosfórica parcialmente acidulada, para un mismo sitio.

7. La mejor fuente de boro corresponde a boronatrocalcita.
8. A pesar de los avances logrados, aún falta mucho por hacer en cuanto a determinar los efectos de la fertilización de establecimiento en el largo plazo, disminuir costos en la aplicación de fertilizantes, determinar efectos de la fertilización en etapas intermedias de desarrollo y evaluar el comportamiento de la fertilización sobre la base de distintos genotipos.

LITERATURA CITADA

- ADAMS, M. A., P.J. POLGLASE, P.M. ATTIWILL, C.J. WESTON. 1989. "In situ studies of nitrogen mineralization and uptake in forest soils; some comments on methodology", *Soil Biology & Biochemistry*. 21: 423-429.
- BARROW, N. J. 1989. "The reaction of plant nutrients and pollutants with soils", *Australian Journal of Forest Research* 24: 475-492.
- BEETS, P.O. M., D. S. POLLOCK. 1987. "Accumulation and partitioning of dry matter in *Pinus radiata* as related to stand age thinning", *New Zealand Journal of Forestry Science* 17 (2/3):246-271.
- CELLIER, K. M., R. BOARDMAN, D. B. BOOMSMA, P.G. ZED. 1985. "Response of *Pinus radiata* D. Don to various silvicultural treatments on adjacent first-and second-rotation sites near Tantanoola, South Australia. I. Establishment and growth up to age 7 years", *Australian Forestry Research* 15:431-437.
- FORESTAL MININCO S. A. 1994. Informe técnico interno. Resumen de experiencias sobre fertilización de pino radiata: Revisión bibliográfica, 4 p.
- FORESTAL MININCO S. A. 1997. Informe técnico interno Evaluación de crecimiento radicular *in situ*, 5 p.
- MATUS B, F. J. 1997. "Mineralización de nitrógeno en suelos agrícolas. Predicción, medición y recomendaciones de fertilización", *Ciencia e Investigación Agraria*. Facultad de Agronomía e Ingeniería Forestal, Pontificia Universidad Católica de Chile 24: 59-72.
- NAMBIAR, E. K. S. 1983. "Root development and configuration in intensively managed radiata pine plantations", *Plant and Soil*. 71: 37-47.
- NOORDWIJK, DE WILLIGEN. 1988. Roots, plants production and nutrient use efficiency Doctoral Thesis, Agricultural University of Wageningen, The Netherlands.
- PINOCHET, D. 1995. The residual effect of applications of P fertilizer measured by the Olsen Method. Doctoral Thesis, University of Reading, United Kingdom.
- RAISON, R. J., M.J. CONNELL, P.K. KHANNA. 1987. "Methodology for studying fluxes of soil-mineral-N *in situ*", *Soil Biology & Biochemistry* 19: 521-530.
- RODRIGUEZ, J. 1992. La fertilización de los cultivos, un método racional. Facultad de Agronomía Pontificia Universidad Católica de Chile, 291 p.
- SANTIBAÑEZ, F., J. URIBE. 1993. Atlas agroclimático de Chile VI, VII, VIII y IX Regiones Laboratorio de Agroclimatología, Facultad de Ciencias Agrarias y Forestales, Universidad de Chile Ministerio de Agricultura, Fondo de Investigación Agropecuaria, Corporación de Fomento de la Producción Santiago. 73 p.

JOSE ALVAREZ, JOSE RODRIGUEZ, DOMINGO SUAREZ

- SCHLATTER, J., V. GERDING. 1984. Fertilización en plantaciones de *Pinus radiata* D. Don. Universidad Austral de Chile. Serie Técnica, Valdivia, Chile.
- SMETHURST, P. J., E. K. S. NAMBIAR. 1990. "Distribution of carbon and nutrients and fluxes of mineral nitrogen after clear-felling a *Pinus radiata* plantation", *Canadian Journal of Forest Research* 20: 1490-1497.
- SUAREZ D., J. RODRIGUEZ. 1997. Proyecto fertilización eucalipto. Informe técnico (1994-1997) Forestal y Agrícola MonteAguila - PUC.
- STANFORD, G., S. J. SMITH. 1972. Nitrogen mineralization potentials of soils Soil Science Society of America Proceedings 36: 465-472.

Recibido: 05.10.98