

UNIVERSIDAD DE LA REPUBLICA

FACULTAD DE AGRONOMIA

**FERTILIZACION NITROGENADA DE PLANTACIONES JOVENES
DE *E. grandis*: EFICIENCIA DE USO Y DISTRIBUCIÓN INTERNA DEL N 45
DIAS POST- APLICACIÓN**

POR

María Magdalena LÓPEZ DE LOS SANTOS

**TESIS presentada como uno de
los requisitos para obtener el
título de Ingeniero Agrónomo
(Orientación Forestal)**

**MONTEVIDEO
URUGUAY
2010**

Tesis aprobada por:

Director: -----

Ing. Agr. (Ph.D.) Carlos H. Perdomo

Ing. Agr. (Ph.D.) Amabelia del Pino

Ing. Agr. Rafael Escudero

Fecha: -----

Autor: -----

María Magdalena López de los Santos

AGRADECIMIENTOS

Deseo dejar mi expreso agradecimiento a quienes de una u otra forma hicieron posible la presentación de este trabajo y la culminación de mi carrera.

Agradezco especialmente a toda mi familia, por el apoyo que me dieron siempre y muy especialmente a mí querida madre que hoy no está físicamente pero sigue junto a mí ayudándome y dándome estímulo.

A Carlos Perdomo, por su asistencia en la definición y dirección del tema ha sido decisivo para el desarrollo de este trabajo.

A la empresa FORESTAL ORIENTAL S.A. en donde se llevo a cabo el trabajo de campo y su personal por la colaboración brindada. También quiero agradecer especialmente a J. García de León por ayudarme en la búsqueda de bibliografía.

Al personal del Departamento de Suelos y Aguas particularmente:

- Patricia Barreto
- Daniel Arana
- Amílcar Rodríguez.

Al personal del CATNAS (Centro de Aplicaciones de Tecnología nuclear en Agricultura Sostenible de Facultad de Agronomía, particularmente:

- Cristina Mori
- Verónica Berriel.

Y a todos mis amigos y compañeros de trabajo que en distintas oportunidades estuvieron presentes y se interesaron porque este trabajo llegara a su fin.

TABLA DE CONTENIDOS

	Página
PÁGINA DE APROBACIÓN.....	II
AGRADECIMIENTOS.....	III
LISTA DE CUADROS E ILUSTRACIÓN.....	VI
1. <u>INTRODUCCION</u>	1
1.1 SITUACION MUNDIAL.....	2
1.2 SITUACION NACIONAL.....	2
1.3 OBJETIVOS.....	2
2. <u>REVISION BIBLIOGRAFICA</u>	3
2.1. INTRODUCCION A LA REVISION.....	3
2.2. METODOS ISOTOPICO Y DE LA DIFERENCIA.....	5
2.3. CARACTERISTICAS DEL NITROGENO.....	7
2.4. CARACTERISTICAS DE LA ESPECIE EN ESTUDIO.....	7
2.5. FISIOLOGIA DE LA NUTRICION DE EUCALYPTUS.....	8
2.5.1. <u>Ciclo de nutrientes y su relación con la edad de los montes</u>	9
2.5.2. <u>Variación estacional</u>	11
2.5.3. <u>Particularidades de la absorción de nutrientes de Eucaliptos en relación a otras especies</u>	12
2.5.4. <u>Especie: otro factor que afecta la absorción de nutrientes</u>	15
2.5.5. <u>Razones para la mayor eficiencia de nutrientes de eucaliptos</u>	15
2.5.5.1. Eficiencia de uso de nutrientes.....	16
2.5.5.2. Estructura de la hoja y tasa de crecimiento	17
2.5.5.3. Reserva de nutrientes.....	17
2.5.5.4. Retranslocación de nutrientes de hojas, madera y corteza.....	18
2.5.5.5. El ciclo bioquímico y requerimientos anuales de nutrientes.....	19
2.5.5.6. Suministro de nutrientes	19
2.6. EFICIENCIA DE UTILIZACION DEL FERTILIZANTE N... ..	20
2.7. DISTRIBUCION DEL FERTILIZANTE N.....	20
2.7.1. <u>En Especies Perennes</u>	20
2.7.2. <u>En Especies Caducas</u>	21
3. <u>MATERIALES Y METODOS</u>	22
.....3.1. ÁREA DE ESTUDIO Y MUESTREO.....	22
3.2. METODOLOGIA.....	23
3.3. PROCESAMIENTO DE LAS MUESTRAS.....	26
3.4. ACONDICIONAMIENTO DE LAS MUESTRAS A ANALIZAR Y PESAJE.....	26
3.5. DETERMINACIONES.....	27
3.5.1. <u>Contenido total de N (% de N en la materia seca) y por partes</u>	27

3.6. CÁLCULOS DE LOS EXPERIMENTOS CON ^{15}N	27
4. <u>RESULTADOS Y DISCUSION</u>	29
4.1. RENDIMIENTO DE BIOMASA Y ABSORCIÓN DE N.	29
4.1.1. <u>Biomasa total y por partes de los árboles</u>	30
4.1.2. <u>Concentración, rendimiento y distribución entre componentes de la biomasa aérea del N absorbido por los árboles</u>	32
4.2. ABSORCIÓN DE N DEL FERTILIZANTE.....	33
4.2.1. <u>Kg Nddf (g/árbol y Kg/ha)</u>	33
4.2.2. <u>Distribución de Nddf (g) en los componentes de la biomasa aérea de las parcelas bajo tratamiento</u>	34
4.2.3. <u>Nitrógeno derivado del suelo</u>	36
4.3. EFICIENCIA DE USO DEL FERTILIZANTE.....	36
4.4. DISTRIBUCIÓN DE Nddf EN LA COPA, FUSTE Y CORTEZA DE LOS ÁRBOLES.....	37
4.5. ABSORCIÓN DE Nddf POR ÁRBOLES ALEDAÑOS EN FILA DE PLANTACION Y FILA DE ENFRENTA EVALUADO A TRAVÉS DE LA CONCENTRACIÓN DE LAS HOJAS.....	39
4.5.1. <u>Eficiencia de Uso del N del fertilizante estimada con los árboles aledaños de la misma fila</u>	42
5. <u>CONCLUSIONES</u>	43
6. <u>RESUMEN</u>	44
7. <u>SUMMARY</u>	45
8. <u>BIBLIOGRAFIA</u>	46
9. <u>ANEXOS</u>	48

LISTA DE CUADROS E ILUSTRACIONES

Cuadro No.	Página
1. Datos analíticos de los suelos de los sitios experimentales.....	23
2. Cantidad de N (g) que deriva del suelo en árboles de <i>E. grandis</i> en sitios de la zona Litoral-oeste.....	36
3. Distribución de la biomasa (B) y N entre los distintos componentes y concentración (%) de N de árboles de <i>E. grandis</i> de 2 años de edad sometidos a dos tratamientos en dos sitios.	31
4. Nitrógeno derivado del fertilizante (N _{ddf}) determinado con ¹⁵ N en los distintos componentes de la biomasa aérea de árboles de <i>E. grandis</i> y expresado como masa y como proporción del N total presente en cada componente.....	34
5. Ubicación, caracterización de los sitios estudiados y datos de la plantación de <i>E. grandis</i>	22
Figura No.	
1. Acumulación interna de nitrógeno en los principales componentes aéreos de <i>E. grandis</i> con adición de nutrientes durante los primeros tres años de crecimiento en plantaciones cerca de, Queensland, Australia.....	12
2. Distribución de la biomasa del árbol entre los diferentes componentes en los que se dividió la biomasa aérea (fuste, rama, corteza, hoja).....	30
3. Distribución de la Biomasa aérea y nutrientes en los componentes aéreos de un rango de poblaciones de <i>Eucalyptus sp.</i> de edad adulta y otras especies forestales.....	13
4. Distribución del N del fertilizante absorbido entre los diferentes componentes en los que se dividió la biomasa aérea del árbol (madera, rama, corteza, hoja).....	35
5. Distribución de N proveniente del fertilizante en dos posiciones de la copa de árboles fertilizados de <i>E. grandis</i> de dos años de edad para los sitios estudiados.....	37
6. Distribución de N proveniente del fertilizante en Fuste y Corteza de árboles fertilizados de <i>E. grandis</i> de dos años de edad para los sitios	38

7. Factores que afectan la EUF.....	5
8. Los tres estados nutricionales distintos, en la vida de una parcela forestal.....	11
9. Rango de absorción de Nddf (%) de árboles de <i>E. grandis</i> pertenecientes a la misma fila de plantación del árbol fertilizado, y a la fila de enfrente en los dos sitios estudiados.....	40
10. Ubicación del área de distribución natural de <i>E. grandis</i> en Australia.....	8
11. Ubicación de los árboles muestreados.....	24
12. Variación en la concentración de nitrógeno en el follaje de <i>E. deglupta</i> de cuatro años de edad desde la corona externa (hojas jóvenes) hasta la corona interna (hojas adultas) de las posiciones de la copa superior, medio e inferior.....	14
13. Variación en la tasa de acumulación de nitrógeno en la biomasa aérea de pino Corsican y <i>E. diversicolor</i> en relación a la edad de la población.....	15

1. INTRODUCCION

1.1 SITUACIÓN MUNDIAL

La productividad de las plantaciones de eucaliptos (*Eucalyptus sp.*) depende en buena medida del aporte de nitrógeno (N), sobre todo cuando estas son instaladas sobre sitios pobres y degradados. En estas situaciones, el N frecuentemente limita el crecimiento temprano y la sobrevivencia (Ringrose y Neilsen, citados por Crucci 2007); siendo necesaria la aplicación de N externo al sistema, especialmente durante el establecimiento de la plantación.

Tradicionalmente para cubrir las recomendaciones de N se utilizan fertilizantes de bajo costo, pero estas recomendaciones se realizan sin mayor consideración por la variabilidad espacial y los potenciales efectos en el medio ambiente (Rice et al., citados por Cabrera 2003). Actualmente, se considera importante desarrollar prácticas racionales de fertilización de N que asegure el uso eficiente de este nutriente bajo principios económicos y ambientales. Las recomendaciones de fertilizante requieren ser tan específicas como sea posible, para ello es necesario conocer los requerimientos de N por la planta, las fuentes de N externas y las pérdidas de N del sistema, como se señala en la ecuación 1 (Rice et al., citados por Cabrera 2003).

$$N_{\text{fertilizante}} = N_{\text{req. plantación}} - (N_{\text{aportado suelo}} - N_{\text{pérdidas}}) [1]$$

El N requerido por la plantación es una función o integración de lo que la planta demanda para alcanzar determinado nivel de producción (rendimientos de materia seca y concentración de N en el tejido). La estimación precisa de este parámetro es difícil, considerando las variaciones climáticas, la variabilidad genética y de tecnologías de manejo (Urquiaga y Zapata, citados por Cabrera 2003).

Las entradas de N al sistema incluyen fertilizante inorgánico, orgánico y la fijación biológica de N, y de menor impacto se consideran las entradas mediante el riego y la precipitación. Las pérdidas de N incluyen el lavado de NO_3 , las pérdidas gaseosas (desnitrificación), la volatilización del N del fertilizante, del suelo y de la vegetación, y la erosión (Cabrera, 2003).

El manejo agronómico en un programa de fertilización debe buscar la reducción de las pérdidas de N y maximizar la recuperación del N aplicado, a través de un aumento de la eficiencia de uso del N. La aplicación de las técnicas nucleares en la agricultura, ha promovido el desarrollo de tecnologías fundamentadas en el uso de isótopos estables de ^{15}N para estudiar la eficiencia (EUF) de utilización de fertilizantes. Estos estudios han permitido establecer el efecto de prácticas como la época, la forma y la fuente de aplicación de fertilizante sobre la eficiencia de uso; así como

determinar la eficiencia de absorción y redistribución de N en la planta de diferentes genotipos (Cabrera, 2003).

Sin embargo la información proveniente de la bibliografía es escasa en lo que respecta a la absorción, reserva, distribución y uso de varias formas de N en eucaliptos, aunque existen estudios de este tipo en árboles frutales y otros árboles forestales (van den Driessche, citado por Attiwill y Adams 1996). Por lo tanto, se considera necesario una mayor investigación para comprender la capacidad de absorción del N del fertilizante por los árboles en plantaciones de eucaliptos (Salifu y Timmer, 2003).

1.2 SITUACION NACIONAL

Hasta la fecha, en Uruguay no existen antecedentes publicados de investigaciones que hayan utilizado técnicas isotópicas para el estudio de la eficiencia de uso de N o de la distribución interna del fertilizante N en árboles de cualquier especie.

Por otra parte, los estudios de fertilización nitrogenada en eucaliptos revelan que la respuesta medida como incremento en volumen es baja, aun en suelos pobres (Perdomo et al., 2007). Estos resultados arrojan dudas sobre los niveles de absorción de N del fertilizante por las plantaciones, y la eficiencia de uso de este nutriente. Por lo tanto, se considera relevante el estudio de esta temática, ya que tanto a nivel productivo como ambiental interesa obtener el mayor rendimiento posible con la mínima aplicación de fertilizantes (Zapata, 1990).

1.3 OBJETIVOS

Los objetivos del presente trabajo son:

- 1) Ajustar la metodología isotópica de ^{15}N en plantaciones de eucaliptos.
- 2) Obtener los primeros datos cuantitativos sobre la eficiencia de uso de N en esta especie obtenidos con ^{15}N .
- 3) Estudiar la redistribución interna y la competencia entre árboles de una misma fila y de filas aledañas por el N aplicado

La hipótesis principal es que en etapas tempranas de desarrollo la mayor parte del N aplicado a esta especie se encuentra en hojas y ramas, y que solo un bajo porcentaje se localiza en el fuste.

Se espera que la información obtenida en este trabajo pueda ser útil para mejorar el diseño de estudios futuros sobre dinámica de N en plantaciones de eucaliptos, ya sea que estos involucren el uso de isótopos o que se basen en metodologías no isotópicas.

2. REVISION BIBLIOGRAFICA

2.1 INTRODUCCION DE LA REVISION

Los fertilizantes constituyen unos de los insumos esenciales que deben utilizarse para mantener o aumentar el nivel de fertilidad del suelo en los sistemas agrícolas intensivos. El propósito primordial de la aplicación de fertilizantes es proporcionar al cultivo los nutrientes esenciales (N, P y K) (Zapata, 1990).

Según Broeshart, Fried, citados por Zapata (1990) los fertilizantes se aplican para facilitar que las plantas absorban un nutriente específico y el incremento de la absorción puede dar lugar a una respuesta en el rendimiento. Esta respuesta es una consecuencia de la absorción adicional de nutrientes, cuando otros factores de producción son adecuados.

La EUF, en este caso de N, consiste en una medición cuantitativa de la absorción real de N del fertilizante por la planta en relación con la cantidad de N que se añade al suelo. Una forma de expresión común de la eficiencia en la utilización es el porcentaje de utilización del fertilizante añadido (Zapata, 1990). Esto se muestra en la ecuación [2]:

$$EUF\% = (gNddF / GNF) * 100 \quad [2]$$

donde EUF% es el Porcentaje de utilización del fertilizante añadido, gNddF es la cantidad de N en la planta derivado del fertilizante y GNF es la cantidad de N agregado como fertilizante. Tanto gNddF como GNF pueden ser expresados en base a la dosis por árbol o por unidad de superficie. El EUF es a menudo expresado como porcentaje y llamado "eficiencia de recuperación del fertilizante nitrogenado en la planta" o "coeficiente de utilización" (Zapata, 1990).

Según Zapata (1990) el concepto detallado de la EUF es amplio y más complejo que la simple recuperación de N del fertilizante por un cultivo, ya que involucra:

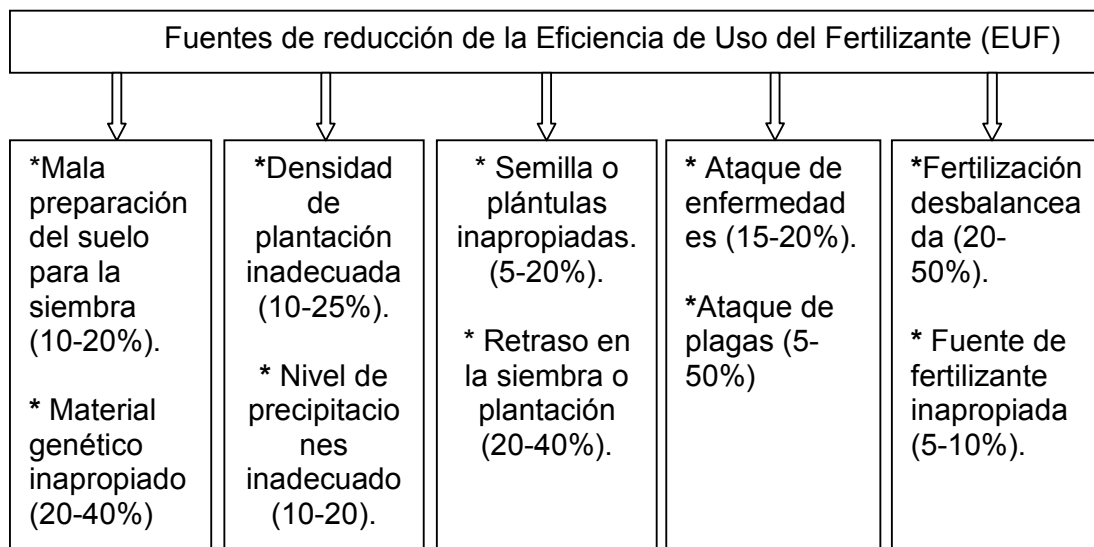
- maximización de la absorción por la planta del fertilizante nitrogenado aplicado;
- minimización de las pérdidas de fertilizante nitrogenado del sistema suelo-planta; y
- promoción de condiciones favorables (suelo, clima, planta, manejo, agua, etc.) previniendo que el N aplicado se convierta en no disponible para el cultivo y para el sistema cultivo como un todo.

Las investigaciones en fertilizantes nitrogenados tradicionalmente han tenido en cuenta el primer aspecto, es decir la obtención de respuestas en el

rendimiento económico de cultivos de interés. Investigaciones recientes enfocan el segundo y tercer aspecto, en proyectos orientados al estudio del medio ambiente. Sin embargo un abordaje integrado de todos estos aspectos de manejo del fertilizante nitrogenado es necesario para lograr sistemas de cultivos equilibrados en zonas agro-ecológicas seleccionadas (Zapata, 1990).

Los esfuerzos para mejorar EUF involucran factores controlables y no controlables. La Figura 1 muestra posibles fuentes y estimaciones de reducciones en la EUF debido a factores controlables (Zapata, 1990).

Figura 1. Factores que afectan la eficiencia de uso del fertilizante.



Fuente: adaptado de Zapata (1990).

Los tres principales factores controlables que afectan adversamente la EUF son: fertilización desbalanceada (20-50% de reducción), material genético inadecuado (20-40%) y retraso en la plantación (20-40%). Sin embargo, el principal factor incontrolable es el clima, que influencia a ambas transformaciones de N, del fertilizante y del suelo y, consecuentemente, su disponibilidad y absorción por las plantas para el crecimiento y desarrollo. Las condiciones climáticas actuales también determinan, en gran magnitud, los caminos de pérdidas del fertilizante nitrogenado por desnitrificación (N_2 , NO_2 , NO), lavado de NO_3 ó volatilización de NH_3 y otra parte queda en el suelo. La significación relativa de las condiciones climáticas y sus cambios en el tiempo necesitan ser contabilizados para el desarrollo de estrategias apropiadas para mejorar la EUF (Zapata, 1990).

2.2 MÉTODOS ISOTÓPICO Y NO ISOTOPICO

El método isotópico es el principal y único método directo que mide la absorción de nutrientes del fertilizante aplicado mediante el uso de isótopos, la información recuperada es conocida como "coeficiente de utilización real" (Zapata, 1990).

Los siguientes tipos de estudios de EUF son posibles usando el método isotópico:

- Prácticas de manejo de fertilizantes (momento, aplicación, fuentes);
- Diferencias genotípicas en la captación y eficiencia de uso de N;
- Interacciones del fertilizante N con el suelo /agua/ cultivo, manejo de variables (riego, laboreo, sistema de cultivo, densidad de población, enmiendas en suelo, espaciamiento entre plantas, etc.);
- Balance del fertilizante N /determinaciones presupuestales (contabilizadas/no-contabilizadas por);
- Medición directa de pérdidas del fertilizante N marcado (lavado, pérdidas gaseosas) (Zapata, 1990).

En todos estos estudios el principal objetivo es mejorar la EUF a través de varios enfoques. En una primera instancia, el objetivo inicial es medir la captación del fertilizante N aplicado y determinar el nivel actual de EUF en el sistema con el fin de idear una forma y opción de mejoras. Por lo tanto el objetivo principal es el suministro de N como fertilizante para la planta en la cantidad correcta en el momento y forma de aplicación adecuados, teniendo en cuenta las necesidades de los cultivos (Zapata, 1990).

La utilización de técnicas isotópicas es de considerable importancia en los estudios de la dinámica de N en el sistema suelo-planta. La misma se basa en el agregado de fertilizante enriquecido con ^{15}N , utilizando como referencia la concentración de ^{15}N del aire, es decir el N_2 atmosférico; esta concentración se le denomina abundancia natural, y constituye un 0.3663 % (Létolle, citado por Mori 2009). El Porcentaje de abundancia de ^{15}N en planta es la composición isotópica de N, es decir la relación ^{15}N / total de N de cualquier material y puede expresarse en átomos % de abundancia de ^{15}N o sencillamente porcentaje de abundancia de ^{15}N (Zapata, 1990).

La hipótesis básica que se maneja al utilizar fertilizante marcado con isótopos es que el comportamiento del isótopo y del portador es idéntico en el sistema suelo-planta (Zapata, 1990). Es decir tales efectos raramente afectan la exactitud de las medidas o la interpretación de los resultados (Hauck y Bremner, citados por Mori 2009). El uso de estas técnicas basadas en el enriquecimiento artificial con ^{15}N permite (Mori, 2009):

- 1- Conocer el destino del fertilizante aplicado
- 2- Cuantificar pérdidas de fertilizante
- 3- Cuantificar las tasas brutas o reales de los procesos de N en el suelo: mineralización-inmovilización
- 4- Evaluar prácticas de manejo de fertilizantes
- 5- Cuantificar la fijación biológica del N_2 atmosférico

El método por diferencia se basa sobre las diferencias en la absorción de N entre las plantas fertilizadas y las no-fertilizadas. La captación de nutrientes por el cultivo en las parcelas control es sustraída de la captación

de nutrientes de las parcelas fertilizadas. La información recuperada estimada usando el método por diferencia es bien referida como coeficiente de utilización aparente (Zapata, 1990).

2.3 CARACTERÍSTICAS DEL NITRÓGENO

El N es un macronutriente esencial para los seres vivos, ya que es uno de los constituyentes principales de los compuestos vitales como aminoácidos, proteínas, enzimas, nucleoproteínas, ácidos nucleicos, así como también de las paredes celulares y clorofila en los vegetales. Es, además, el nutriente que en general mas influye en el rendimiento y calidad del producto a obtener en la actividad agropecuaria (Perdomo y Barbazán, 1999).

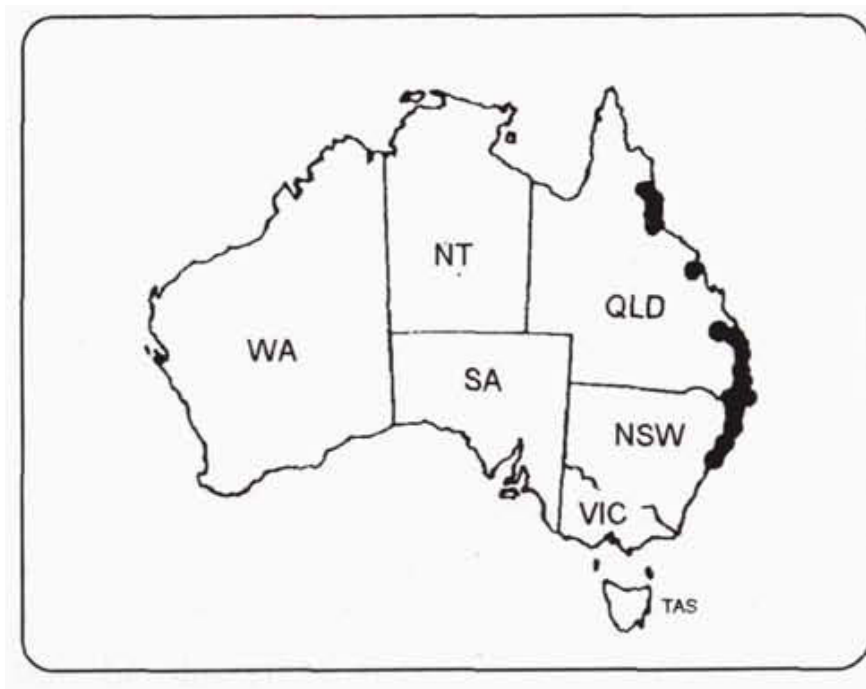
Existen dos fuentes principales de reserva de N para las plantas. La mayor es la atmósfera, el N se encuentra en forma molecular (N_2). La otra reserva importante de N es la materia orgánica del suelo. El N presente en el suelo bajo formas orgánicas tampoco está disponible como tal para las plantas, sino que para ser absorbido tiene que pasar a formas inorgánicas (Perdomo y Barbazán, 1999).

La dinámica del N en el suelo está regulada básicamente por procesos biológicos que afectan las formas minerales y a las formas orgánicas de reserva. Estos procesos biológicos son comprendidos dentro del balance de N. Los principales mecanismos de ganancia de N son: N aportado por las lluvias; N proveniente de las fijaciones no simbióticas y simbióticas; N aportado por los fertilizantes y abonos orgánicos y el N proveniente del proceso de mineralización a partir de los restos frescos (vegetales y animales). Los principales mecanismos de pérdida de N son: N extraído por los cultivos y los animales; inmovilización; desnitrificación; volatilización; lixiviación y erosión (Perdomo y Barbazán, 1999).

2.4 CARACTERÍSTICAS DE LA ESPECIE EN ESTUDIO

Eucalyptus grandis Hill ex Maiden es una especie de árboles grandes, de tronco recto y muy buen desrame natural. Su área de distribución natural se localiza en el este del continente australiano, en áreas disjuntas de la región norte y centro, costero (sur) y continental (norte) (Figura 3), con diferentes registros altitudinales; clima templado (sur) hasta templado-cálido (norte), con un promedio de temperaturas máximas de 24-30°C (sur) 29-32 (norte), mínimas de 3-8°C (sur) y 10-17 (norte), con heladas escasas en localizaciones alejadas de la costa; húmedo, con precipitaciones estivales con una media anual de 1000 a 3500 mm (Brussa, 1994).

Figura 2: Ubicación del área de distribución natural de *E. grandis* en Australia.



Fuente: Aguerre et al., citados por Crucci (2007).

Prefiere suelos con buena capacidad de retención de agua, profundos, de texturas limosas, bien drenados (Kelly et al., Golfari, citados por Brussa 1994).

Su cultivo en el Uruguay se difunde a escala comercial en la década de 1960 luego que se introdujera en 1963 de huertos semilleros de Sudáfrica, no obstante ello, ya existían algunas plantaciones escasas con esta especie en los departamentos de San José y Rivera.

Actualmente se trata de uno de los cultivos más empleados en forestaciones comerciales por su conformación y velocidad de crecimiento (Brussa, 1994).

2.5 FISIOLÓGÍA DE LA NUTRICIÓN DE EUCALIPTOS

Según Attiwill y Adams (1996) los aumentos en la productividad de los eucaliptos en la producción forestal requieren de la integración de la investigación y el conocimiento de la fisiología nutricional y la genética. Un buen conocimiento en esta área de la nutrición de los eucaliptos tiene el potencial para beneficiar la producción forestal por:

- 1) proveer las bases para el desarrollo de métodos de diagnóstico de deficiencias de nutrientes y predicción de requerimientos para fertilizantes;
- 2) ganancia como prácticas de manejo para bosques de eucaliptos afectados por la retención y uso de nutrientes por el árbol; y
- 3) determinación de efectos de largos periodos de adición de fertilizantes sobre el uso de nutrientes, sobre el crecimiento y desarrollo de la plantación.

El uso eficiente de los nutrientes es gobernado por los procesos que afectan el ciclo interno de nutrientes y entre los componentes del ecosistema. Estos procesos involucran la absorción, distribución y la retención de nutrientes; los cuales pueden ser controlados genéticamente (Attiwill y Adams, 1996) y están afectados en gran medida por la edad del árbol

2.5.1 Ciclo de nutrientes y su relación con la edad de los montes

Pritchett., citado por Garategui (2002) propuso:

a) Ciclo geoquímico (externo): sistema abierto, se refiere a la importación-exportación de nutrientes en el ecosistema. Los ciclos geoquímicos suponen la transferencia de elementos minerales entre el interior y el exterior del ecosistema. La entrada de nutrientes estaría dada a través de fuentes como polvo, precipitación, meteorización de la roca madre, fijación biológica y fertilización; la salida incluiría la lixiviación, pérdidas por erosión hídrica, por volatilización y por desnitrificación, además de la eliminación en las cosechas. El mismo autor, indica que la aplicación de fertilizantes constituye un medio adecuado para aumentar los ritmos en la circulación de nutrientes, así como el crecimiento de los arboles en campos deficientes de nutrientes. La adición de fertilizantes puede además acelerar la descomposición de los materiales acumulados en la cubierta forestal y apresurar el proceso de recirculación.

Switzer y Nelson, citados por Garategui (2002) propusieron:

b) Ciclo bioquímico: trata sobre el transporte de nutrientes dentro del árbol. Según estos autores la circulación interna de nutrientes puede explicar las respuestas de crecimiento a largo plazo, luego de realizar fertilizaciones especialmente con fósforo (P) y potasio (K) Ambos autores sostienen que las transferencias internas son de gran importancia, este es el motivo por el cual, las consideran un ciclo independiente.

Para los nutrientes móviles, y particularmente aquellos que limitan el crecimiento, este ciclo tiene mucho significado y es la vía de

mayor aporte de N (O' Connell et al., Baker, Attiwill, citados por Attiwill y Adams 1996), en el crecimiento de las poblaciones naturales de eucaliptos (nativas de Australia). La retranslocación de nutrientes desde las hojas constituye el mayor componente (34-92%) de los ciclos bioquímicos de N, P y K en los eucaliptos (Attiwill et al., Turner y Lambert, Baker y Attiwill et al., citados por Attiwill y Adams 1996).

- c) **Ciclo biogeoquímico:** trata sobre la relación suelo-planta, la transferencia entre el suelo y la biomasa arbórea. Este ciclo implica el retorno de nutrientes de las plantas al suelo (Switzer et al., citados por Garategui 2002). Esta es la vía más importante en el ciclaje de nutrientes inmóviles dentro de las plantas, o relativamente inmóviles, como el calcio (Ca) y para nutrientes que han sido lavados del follaje de los árboles, como el K (Attiwill et al., O'Connell; citados por Attiwill y Adams 1996).

Attiwill, Miller, citados por Attiwill y Adams (1996) propusieron a su vez tres estados nutricionales distintos en la vida de una forestación, los cuales guardan gran similitud con los ciclos: geoquímico, bioquímico y biogeoquímico ya mencionados. Estos estados representan importantes cambios en los procesos que contribuyen a la demanda total de nutrientes, su distribución y almacenaje (Figura 3).

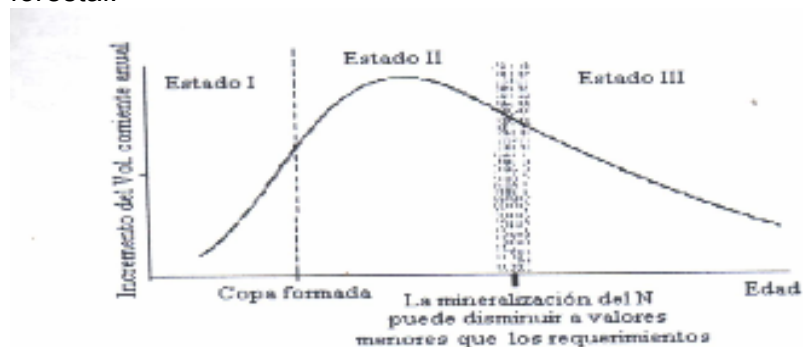
Durante los primeros años existe una redistribución de nutrientes asociada con la senescencia foliar y una gran proporción de nutrientes absorbidos es después retenido internamente en el árbol. Esta etapa de crecimiento es caracterizada por incremento en las tasas de acumulación de nutrientes que tienen un máximo cerca del periodo de cierre de copa (Attiwill, Grove, citado por Attiwill y Adams 1996). En esta etapa el crecimiento del árbol está probablemente más limitado por el suministro de nutrientes del suelo debido a la gran demanda por nutrientes por el árbol y también a causa de que las raíces no han explorado el suelo completamente (Attiwill y Adams, 1996). Esta etapa coincide con el ciclo geoquímico.

En la segunda etapa que ocurre luego del cierre de copas la biomasa foliar es relativamente estable y la formación de madera explica la mayor parte de la productividad primaria neta. El contenido de nutrientes de la madera es generalmente bajo y la tasa de acumulación de nutrientes en árboles disminuye. La exploración del volumen del suelo por las raíces finas llega a su máximo, y los procesos del ciclo de nutrientes son completamente desarrollados (Attiwill y Adams, 1996). Esta etapa coincide con el ciclo bioquímico.

En la última etapa en el crecimiento de las poblaciones de eucaliptos la mayor parte de la productividad primaria neta está asociada con el

mantenimiento de la población (Attiwill y Adams, 1996). Esta etapa coincide con el ciclo biogeoquímico.

Figura 3. Los tres estados nutricionales distintos, en la vida de una parcela forestal.



Fuente: Miller, citado por Garategui (2002).

Inicialmente, la partición de la materia seca (MS) o biomasa (B) aérea entre hojas y tallos puede ser relativamente constante (Sheriff y Nambiar, Mulligan y Sands, citados por Attiwill y Adams 1996). Sin embargo, los tallos y ramas tienden luego a crecer a tasas más rápidas que otras partes de la planta, incrementándose la proporción de la MS de las mismas (Cromer y Jarvis, Kirschbaum et al., Cromer et al., citados por Attiwill y Adams 1996). Este incremento ocurre particularmente durante el cierre de copa, cuando la biomasa foliar es relativamente estable. Consecuentemente la proporción de la MS aérea y el contenido interno de nutrientes de las hojas disminuye con la edad de la población (Attiwill y Adams, 1996).

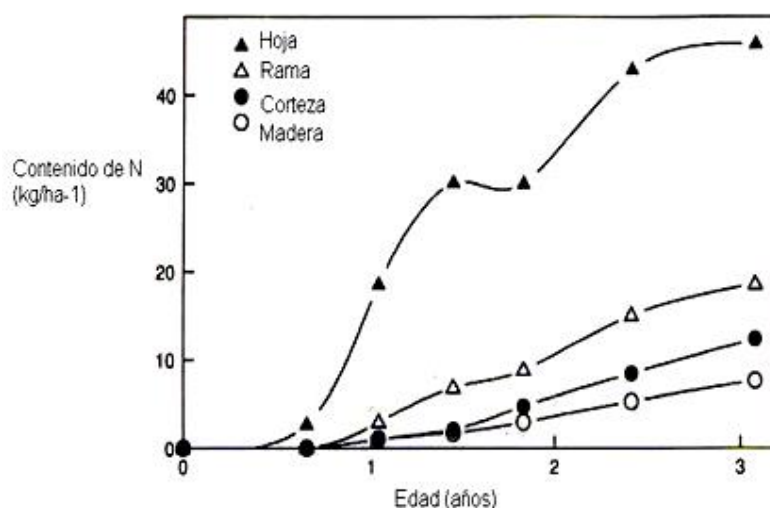
2.5.2 Variación estacional

Las fluctuaciones estacionales de humedad y temperatura de la superficie del suelo, afectan marcadamente los procesos suministradores de nutrientes (O' Connell y Grove, Chapar, citados por Attiwill y Adams 1996) por lo que también ejercen un fuerte efecto sobre la captación de nutrientes por las raíces. Esta variación en la captación de nutrientes en plantaciones establecidas es difícil de cuantificar directamente a causa de que los cambios en el contenido de nutrientes de los árboles son pequeños en relación a su contenido total. Por otra parte, los cambios fenológicos que acompañan las estaciones también resultan en la redistribución interna de nutrientes en el árbol (Attiwill y Adams, 1996).

2.5.3 Particularidades de la absorción de Nutrientes de Eucaliptos en relación a otras especies

El follaje de eucaliptos contiene la mayor proporción del N por encima del suelo en árboles jóvenes (Figura 4). En cambio en árboles longevos son los tallos y las ramas los que contienen la mayor parte de los nutrientes y son los destinos principales de la absorción adicional de nutrientes cuando el suministro del suelo es incrementado. El requerimiento de nutrientes de eucaliptos jóvenes es satisfecho ampliamente por la captación de los suelos, mientras que los ciclos bioquímicos y biogeoquímico de nutrientes explican la mayor parte de la demanda de nutrientes de eucaliptos adultos. Un mecanismo importante que contribuye a una eficiente captación o absorción de nutrientes por parte de los eucaliptos es la simbiosis entre las raíces finas y los hongos ectomicorríticos (Attiwill y Adams, 1996).

Figura 4. Acumulación interna de nitrógeno en los principales componentes aéreos de *E. grandis* con adición de nutrientes durante los primeros tres años de crecimiento en plantaciones de Queensland, Australia.

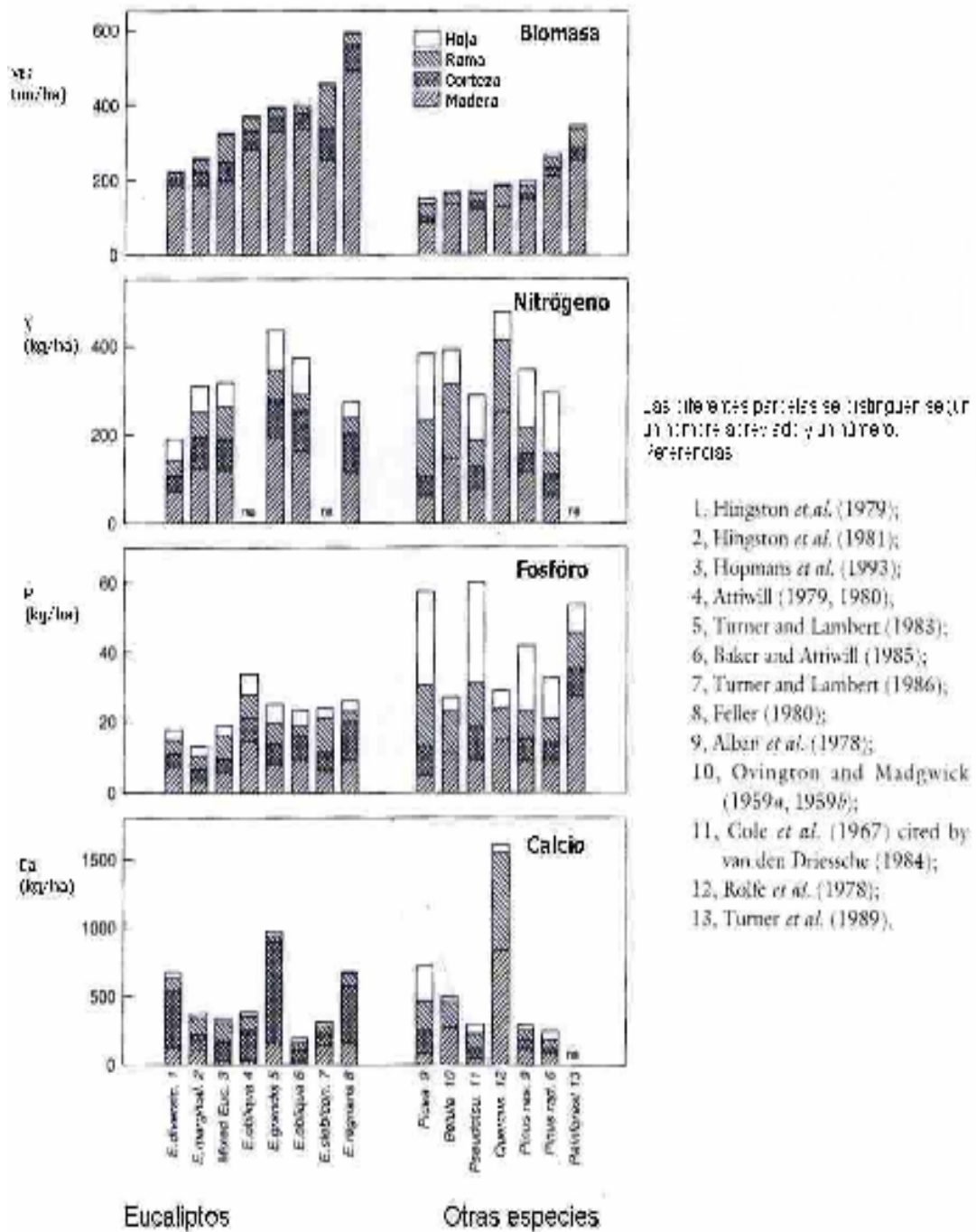


Fuente: adaptado de Attiwill y Adams (1996).

Las líneas son valores acumulativos y las distancias verticales entre líneas representan el contenido de N por componente.

Existen grandes diferencias entre especies de eucaliptos en el contenido de nutrientes de individuos longevos y la distribución de estos entre componentes (Fig. 5) (Attiwill y Adams, 1996).

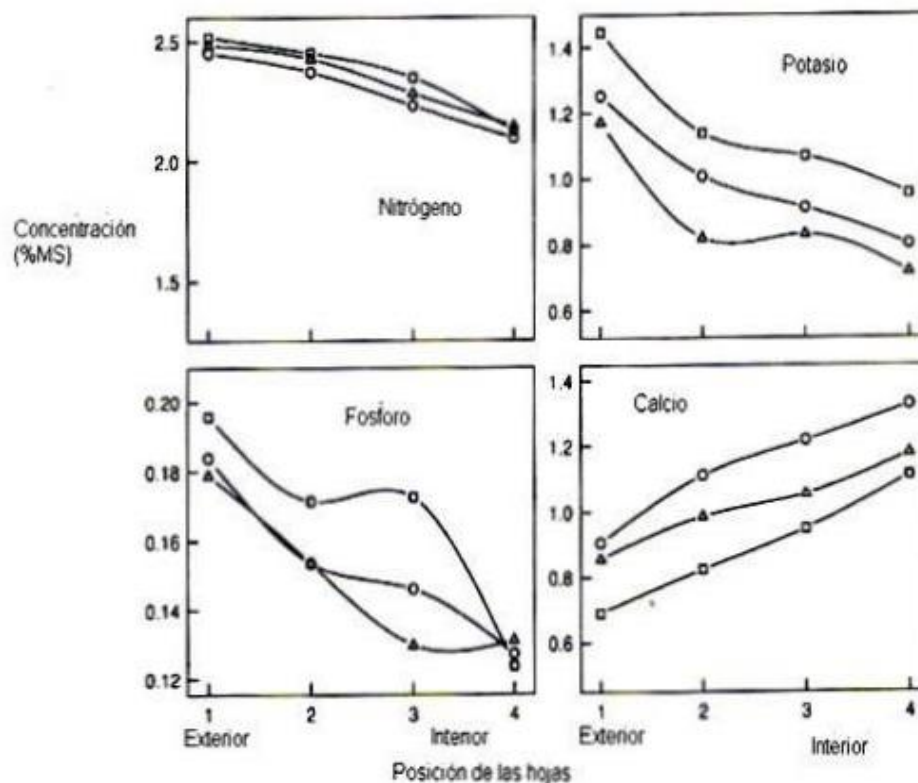
Figura 5. Distribución de la Materia Seca y nutrientes en los componentes aéreos de un rango de poblaciones de eucaliptos de edad adulta y otras especies forestales.



Fuente: adaptado de Attiwill y Adams (1996).

Las concentraciones de nutrientes en el follaje de eucaliptos varían marcadamente durante todo el dosel con patrones de distribución contrastantes entre algunos nutrientes individuales. La concentración de N es generalmente mayor en la corona externa (hojas jóvenes) aumentando desde la posición inferior hasta la posición superior de la copa (Figura 6) (Lamb, Kingston et al., Leuning et al., citados por Attiwill y Adams 1996). Estos gradientes de concentración interna del canopy del árbol, y las diferencias en tendencias entre nutrientes, son explicados por un aumento de la clorofila (contenidos de lignina y celulosa) con la edad de la hoja, y por diferencias entre nutrientes en su función y movilidad interna en el árbol. A esto se lo suman los efectos de cambios en el espesor de las hojas y las cantidades de constituyentes estructurales, que afectan principalmente los gradientes de concentraciones de N en hoja de eucaliptos. La retranslocación de N de hojas viejas a jóvenes para satisfacer los requerimientos de nuevos crecimientos también contribuye probablemente a estas tendencias (Attiwill y Adams, 1996).

Figura 6. Variación en la concentración de nitrógeno en el follaje de *E. deglupta* de cuatro años de edad desde la corona externa (hojas jóvenes) hasta la corona interna (hojas adultas) de las posiciones de la copa superior (\square), media (Δ) e inferior (\circ).

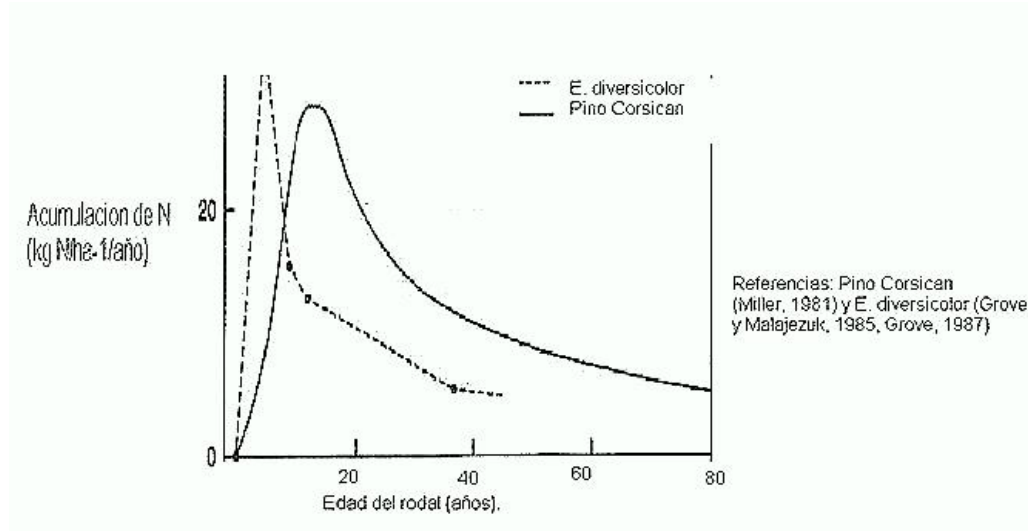


Fuente: adaptado de Attiwill y Adams (1996).

2.5.4 Especie: otro factor que afecta la absorción de nutrientes

El contenido de nutrientes y su distribución entre componentes varía entre géneros de árboles de comparable biomasa o edad (Figura 5), donde por ejemplo las concentraciones de N en las ramas de eucaliptos son generalmente menores que en coníferas. Esto se debe a que los primeros generalmente tienen bajos contenidos de N en comparación con las especies del hemisferio Norte. En los primeros la biomasa promedio del follaje es aproximadamente solo el 2% de la total, pero la misma contiene el 20% del N presente en los componentes aéreos. En contraste en cuatro especies de coníferas, la biomasa foliar es cerca del 7% de la biomasa total y contiene 40% del N en los componentes aéreos (figura 7). De acuerdo a esta información, estos autores indican que la madera, corteza y ramas son la reserva de nutrientes más importante en eucaliptos, pudiendo tener estos un rol más significativo en el ciclo bioquímico de nutrientes de eucaliptos que en el de coníferas (Attiwill y Adams, 1996).

Figura 7. Variación en las tasa de acumulación de nitrógeno en la biomasa aérea de pino Corsican y *E. diversicolor* en relación a la edad de la población.



Fuente: adaptado de Attiwill y Adams (1996).

2.5.5 Razones para la mayor eficiencia de nutrientes de eucaliptos

Según Attiwill y Adams (1996) los eucaliptos tienen desarrolladas estrategias que le permiten sobrevivir y crecer en hábitats limitados en nutrientes. Estas comprenden:

- 1) regulación de la tasa de crecimiento, y posteriormente de la demanda de nutrientes, para competir por el abastecimiento de nutrientes (Grime y Hunt; Chapín, citados por Attiwill y Adams 1996);
- 2) eficiencia de utilización de nutrientes interna de la planta a causa del ciclo bioquímico (Switzer y Nelson, citados por Attiwill y Adams 1996); y
- 3) retención de nutrientes en el árbol (Attiwill y Adams, 1996).

2.5.5.1 Eficiencia de uso de nutrientes

El cociente de Steenbjerg y Jacobsen, citados por Attiwill y Adams (1996) es una medida de la MS producida por unidad de nutriente en la planta. Este índice es el recíproco de la concentración de nutrientes y es interpretado (Barrow, citado por Attiwill y Adams 1996) como la relación entre los requerimientos de nutrientes y el crecimiento de la planta. Esta relación depende de varios factores que interactúan entre sí (Loneragan, citado por Attiwill y Adams 1996). Por ejemplo la tasa de crecimiento y la partición de asimilados de los árboles, son factores que pueden afectar su eficiencia de utilización de nutrientes. En un estudio de Turner y Lambert, citados por Attiwill y Adams 1996) se demostró que en una población madura de *E. grandis* la producción de MS por unidad de N suministrado por el suelo fue 1.4 veces mayor, en *E. grandis* que en *P. radiata*.

Según Attiwill y Adams (1996) los más altos cocientes de utilización reportados para especies de lento crecimiento es probable que se produzcan gracias a la disminución de las pérdidas de nutrientes y el eficiente reciclaje interno de nutrientes en las plantas. El ciclo bioquímico de nutrientes mencionado anteriormente (Switzer y Nelson, citados por Attiwill y Adams 1996), involucra la retranslocación de nutrientes móviles desde los tejidos senescentes hasta los tejidos jóvenes, siendo este mecanismo de particular significación en la eficiencia de utilización de los nutrientes (Loneragan et al., Attiwill, Bowen, citados por Attiwill y Adams 1996). Sin embargo, no existe acuerdo respecto a si este proceso se ha desarrollado en especies adaptadas a ambientes pobres en nutrientes. Hay algunos autores como Chapín y Kedrowski, citados por Attiwill y Adams (1996) que consideran que los árboles con bajo estatus de N retranslocan una pequeña proporción del N foliar previo a la caída de las hojas en comparación con los árboles con un estatus más favorable de nutrientes. Estos autores constataron bajas concentraciones de nutrientes en tejidos senescentes y establecieron que las mismas fueron a causa de que las concentraciones iniciales también fueron bajas en estos tejidos, y no debido a que los mismos tenían una retranslocación eficiente. Estos autores concluyen que una alta eficiencia de retranslocación de nutrientes no es un mecanismo adaptativo para plantas que crecen en suelos pobres en nutrientes.

Por otra parte Mulligan, citado por Attiwill y Adams (1996) considera que las hojas de los eucaliptos tienen grandes contenidos de N y P en formas que pueden ser removilizadas. Por lo tanto la mayor parte del N y P pueden ser retranslocados de estas hojas, pero no sucede lo mismo en hojas con un bajo contenido inicial de estos nutrientes (Attiwill y Adams 1996). Attiwill y Adams concluye que la retranslocación de nutrientes evoluciona como un mecanismo que mejora la eficiencia de uso de los nutrientes, pero que este proceso opera en un amplio rango de suministro externo de nutrientes, es decir que este mecanismo puede contribuir en gran proporción a los requerimientos para el crecimiento cuando el suministro externo de nutrientes no limita el crecimiento del árbol.

2.5.5.2 Estructura de la hoja y tasa de crecimiento

Según Clarkson, Grime, Chapín, citados por Attiwill y Adams (1996) una menor tasa máxima de crecimiento reduce los requerimientos internos de nutrientes de la planta, y es considerada un mecanismo adaptativo de las plantas en hábitats pobres en nutrientes. Plantas con bajas tasas de crecimiento llegan a un crecimiento máximo con un menor nivel de suministro de nutrientes y responden menos a la aplicación de fertilizantes que plantas de rápido crecimiento adaptadas a hábitats ricos en nutrientes (Rorison; Chapín et al., citados por Attiwill y Adams 1996). Parte de esta estrategia de crecimiento lento puede ser relacionado con características del dosel de la planta, que resultan en una menor tasa de fotosíntesis, como por ejemplo las pequeñas hojas observadas en algunas especies de eucaliptos contribuyen a un lento crecimiento y a una reducción de los requerimientos de nutrientes en suelos deficientes en nutrientes (Beadle, Bowen, citados por Attiwill y Adams 1996).

En particular, el hábito perenne y el incremento en la longevidad de las hojas pueden mejorar la retención de los nutrientes e incrementar la eficiencia de uso de los mismos. Además de este incremento en la eficiencia de uso de nutrientes, la vida útil de las hojas perennes conserva los nutrientes y reduce el ciclo de nutrientes a través de la caída de hojas, pero la inmovilización en la materia orgánica y en suelos que son fuertemente reactivos puede disminuir el suministro de nutrientes para las raíces (Grime, citado por Attiwill y Adams 1996). También las propiedades de las hojas en algunas especies de eucaliptos, incluyen una cutícula gruesa, reteniendo los nutrientes en la planta a través de la disminución de las pérdidas por lavado (Attiwill y Adams, 1996).

2.5.5.3 Reserva de nutrientes

La utilización de nutrientes en suelos pobres es maximizada en eucaliptos a través de la reserva de nutrientes cuando la captación excede los requerimientos, y a la retranslocación de una gran proporción de los

nutrientes móviles desde los tejidos senescentes al nuevo crecimiento (Attiwill y Adams, 1996). Rorison, Grime y Hunt, Chapín, citados por Attiwill y Adams (1996) observaron en plantas creciendo sobre suelos pobres que las mismas podían acumular nutrientes cuando sus requerimientos eran cubiertos y las condiciones del suelo eran favorables para la captación adicional de nutrientes; de esta forma sus reservas mantenían su propio crecimiento cuando la captación del suelo era restringida.

Según Miller et al., Fife y Nambiar, van den Driessche, citados por Attiwill y Adams (1996) en un gran número de árboles de hoja perenne incluyendo los eucaliptos existen cambios estacionales en las concentraciones de nutrientes en el follaje y madera, lo que indica una alternancia de periodos de almacenaje temporarios y de reutilización de nutrientes. Aunque la reserva de nutrientes en condiciones de suministro excesivo es común a todas las especies forestales, varía marcadamente entre especies, con la edad o tamaño del árbol y como un resultado de cambios en el suministro interno de nutrientes (Attiwill y Adams, 1996).

2.5.5.4 Retranslocación de nutrientes de hojas, madera y corteza

La proporción de nutrientes removilizados durante la senescencia foliar depende de su movilidad interna relativa en el floema y de la concentración inicial de nutrientes (Loneragan et al., Chapín y Kedrowski, citados por Attiwill y Adams 1996). En latifoliadas o frondosas el contenido de nutrientes móviles incrementa rápidamente durante la expansión foliar, alcanzando a un máximo en forma relativamente temprana en la vida de la hoja (Attiwill y Adams, 1996).

En estudios de mediciones de MS de nutrientes se comprobó que la proporción de N removilizado de las hojas senescentes es mayor en eucaliptos que en especies de cultivos anuales (Specht y Grove, citados por Attiwill y Adams 1996) y otras especies forestales (Attiwill, citado por Attiwill y Adams 1996). A pesar de la controversia entre distintos autores mencionada en el punto donde se habla de la eficiencia de uso de nutrientes, en una investigación realizada por Ashton, citado por Attiwill y Adams 1996 en bosques de *E. regnans* se concluyó que el ciclo interno de nutrientes no fue tan importante en bosques húmedos descansando sobre suelos ricos en comparación con bosques secos descansando sobre suelos pobres. En coincidencia con lo mencionado anteriormente en bosques de eucaliptos del suroeste de Australia se observó que grandes cantidades de N y P fueron removilizadas de las hojas de *E. marginata* (64% de N) creciendo sobre suelos pobres, en comparación con *E. diversicolor* (48% de N) creciendo sobre suelos más húmedos y de mayor fertilidad natural (Attiwill y Adams 1996).

Según Attiwill y Adams (1996) uno de los principales componentes en el ciclo bioquímico de nutrientes en eucaliptos es el retiro de nutrientes de la

corteza, y de la madera durante su transición de albura (porción externa del leño con actividad conductora) a duramen (parte interna del leño sin actividad conductora).

En general las concentraciones de nutrientes del duramen de los eucaliptos son menores, sin embargo las concentraciones promedio de nutrientes, es decir teniendo en cuenta su producción de MS y en arboles adultos son a menudo mucho mayores en este componente (Attiwill y Adams, 1996). Existiendo en el caso de N solo una pequeña diferencia entre la concentración de albura y duramen (Beadle y White 1968, Hingston et al. 1979, Lambert 1981, citados por Attiwill y Adams 1996).

A su vez las concentraciones promedio de nutrientes son a menudo mucho mayores en corteza que en la madera del tallo (Beadle y White, Lambert, citados por Attiwill y Adams 1996) y aunque la corteza representa menos del 30% de la biomasa total del tallo, la misma contiene una gran proporción del contenido de nutrientes de todo el tallo (Hingston et al., Feller, Turner y Lambert, citados por Attiwill y Adams 1996).

El aumento en la captación de nutrientes como resultado de la aplicación de fertilizantes puede incrementar marcadamente el contenido de N del tallo, pero estos cambios en eucaliptos son aún mayores cuando finaliza la actividad del cambium, es decir al comienzo del reposo invernal. Cuando la captación de N excede los requerimientos corrientes para el crecimiento durante solo un corto periodo, debido a la fluctuación en las condiciones de la estación o para el corto periodo de eficacia del fertilizante aplicado, esta reserva de nutrientes en el tallo puede ser importante como una fuente de nutrientes para sustentar el crecimiento (Attiwill y Adams 1996).

2.5.5.5 El ciclo bioquímico y requerimientos anuales de nutrientes

En bosques maduros de *E. oblicua* y de *E. grandis* cerca de un tercio de los requerimientos anuales de N es suplido por el ciclo bioquímico (Turner y Lambert, Baker y Attiwill, citados por Attiwill y Adams 1996). La retranslocación de nutrientes de los tallos es menos significativa que la de las hojas, aunque la reserva de nutrientes y la retranslocación desde la corteza, ramas y brotes es difícil de cuantificar. Más allá de esto, la madera y la corteza de los tallos y ramas puede asumir gran significancia en el ciclo bioquímico en condiciones en las que los aumentos en el suministro resultan en aumentos en la reserva de nutrientes (Attiwill y Adams, 1996).

2.5.5.6 Suministro de nutrientes

La variación del suministro de nutrientes debido a las diferencias del estado de nutrientes del suelo o a la adición de nutrientes afecta la distribución de nutrientes entre los componentes del árbol. La aplicación de

N, por ej., incrementa las concentraciones de este nutriente en cada uno de los tejidos de la planta, pero en tejidos de madera este aumento es proporcionalmente menos marcado que el que ocurre para P (Attiwill y Adams, 1996).

La relativamente pequeña proporción de MS y nutrientes existente en el follaje en eucaliptos longevos, junto a los pocos cambios en las concentraciones de nutrientes foliar en esta etapa, sugiere que la madera y la corteza de fustes y ramas son los principales destinos para el incremento en las cantidades de N absorbido durante la aplicación del fertilizante (Attiwill y Adams, 1996).

2.6 EFICIENCIA DE UTILIZACIÓN DE FERTILIZANTE N

Según Binkley (1993) las mayores tasas de recuperación el fertilizante se han observado en árboles que han recibido aplicaciones repetidas o con baja frecuencia. Este autor sugiere que el patrón general de distribución de los fertilizantes comprende:

1. menos de una cuarta parte del fertilizante se absorbe por los árboles en los primeros años.
2. la mayor parte del fertilizante se inmoviliza en la biomasa de los microorganismos y en la materia orgánica del suelo.
3. una cantidad variable y difícil de medir se pierde del ecosistema forestal mediante los procesos de lixiviación y volatilización.

Marshall y McMullan, citados por Binkley (1993) en un experimento de fertilización controlada de *Pseudotsuga menziesii* encontraron que cerca del 24% del N fue asimilado en las plántulas al cabo de ocho meses, mientras que el 75% restante permaneció en el suelo. Por otra parte, Salifu y Timmer (2003), observaron que si bien la fertilización promovió la absorción de N incrementando esta en un 125-258%, el ¹⁵N recuperado en plantas de *Picea mariana* fue solo de 12 y 19%; indicando una baja EUF en árboles jóvenes, y sugiriendo que parte del N adicional provino del suelo. Otros autores como Millar y Neilsen; Mead y Preston, citados por Salifu y Timmer (2003) encontraron datos que estuvieron dentro del rango reportado en el trabajo anteriormente citado.

2.7 DISTRIBUCION DE FERTILIZANTE N

2.7.1 En especies perennes

En una población de *Pinus sylvestris* L se estudio la recuperación y distribución del fertilizante nitrogenado (¹⁵N), en la cual se constato que el 19% del N suministrado fue recuperado en los árboles, del cual la mitad

ocurrió en la biomasa de acículas. La cantidad de ^{15}N en acículas y brotes mostró una tendencia a incrementar con la altura. En la corteza y madera las tendencias fueron similares, pero la cantidad absorbida fue superior en la primera (J. Melin et al., 1983). Por otra parte Mattos et al. (2003) en arboles de citrus confirmaron que el fruto fue el principal destino del ^{15}N aplicado como $^{15}\text{urea}$ (10.2%) y en la redistribución del N. La acumulación promedio en hojas jóvenes del ^{15}N aplicado fue de 4,2% y fue baja en la madera.

En arboles de dos años de edad de *Acacia mangium* y *Acacia auriculiformis* se comprobó para ambas especies que aproximadamente un tercio del ^{15}N estuvo contenido en las hojas jóvenes. La concentración de ^{15}N en estas hojas indicó que más del 90% del N provino de otra fuente distinta a la del fertilizante. Teniendo en cuenta la alta tasa de fertilización que se aplicó en el experimento y la pobre fertilidad del suelo, estos investigadores concluyen que la mayor parte del N contenido en las hojas recientemente desarrolladas provino de la removilización de otras partes del árbol (N. Zakra et al., 1993).

2.7.2 En especies de hoja caduca

En árboles de *Prunus pérsica* (L.), c.v. Maycrest de tres años de edad, se constató que durante la floración y la formación del fruto solo un 7% del N establecido en el nuevo crecimiento provino del fertilizante, el resto provino del N almacenado en los órganos viejos (Muñoz et al., 1993).

3 MATERIALES Y METODOS

3.1 CARACTERIZACIÓN DE LOS SITIOS.

Para el siguiente trabajo se seleccionaron 2 rodales de *Eucalyptus grandis* de dos años de edad. Estos rodales estaban ubicados en el departamento de Paysandú, pertenecientes al establecimiento “El Refugio”; de la empresa FORESTAL ORIENTAL S.A. (Cuadros 1 y 2). Los rodales corresponden a una replantación del clon X107 realizada entre los meses de febrero-marzo del 2004, y al momento de la plantación fueron fertilizados con aproximadamente 20 unidades (kg/ha) de N y 100 de P₂O₅. Cada rodal fue considerado como un sitio diferente.

Según MGAP (1994), el suelo del sitio 6 corresponde al grupo 9.3 de los índices de productividad CONEAT, los suelos predominantes son Planosoles Districos Ocricos, a veces Melánicos y Argisoles Districos Ocricos Abrupticos, a veces Típicos. El color de los horizontes superiores es pardo grisáceo oscuro, la textura es arenoso franca y son de baja fertilidad e imperfectamente drenados. Como asociados, en las laderas medias y bajas de pendiente máxima de 1%, existen Brunosoles Subèutricos, a veces Districos Típicos y Lúvicos. Son de color pardo muy oscuro, textura franco arenosa, fertilidad media y drenaje moderadamente bueno a imperfecto. El suelo del sitio 8 corresponde al grupo 10.1 de CONEAT (MGAP, 1994), los suelos que comprende son Brunosoles Eutricos Típicos y Vertisoles Rúpticos Típicos, a veces Lúvicos, de color negro o pardo muy oscuro, textura franco arcillo limosa, fertilidad muy alta y moderadamente bien drenados. Se asocian Brunosoles Eutricos Lúvicos y, en las concavidades, Planosoles Eutricos Melánicos.

Sitio	Ubicación	Fert. Plantación	Marco Plantación	Edad (años)	Altura aprox. (m)
6	32°22.601' S	30gr/pl.(18-46-46-0)	4 x 1.8	2	9
	57°26.960' W				
8	32°21.617' S				
	57°26.204' W				

Cuadro N° 2: Datos analíticos de los suelos de los sitios experimentales.							
Sitio	Asoc. De suelo	K	Na	Ca	Mg	MO	Clase Textural
		----- meq/100g-----				%	
6	Alg	0,22	0,32	1,3	0,5	1,63	FAr
8	Alg	0.29	0,34	1,89	0,69	1,37	FAr

Fuente: Noble¹

3.2 METODOLOGIA

El enfoque agronómico de este estudio es el manejo del sistema suelo- cultivo sobre la captación o absorción del fertilizante N por una plantación aplicado durante una única estación de crecimiento. Las estimaciones de la captación del fertilizante N se realizaron por medio del método isotópico y por el método no-isotópico o método por diferencia (Zapata, 1990).

El 29 de octubre del 2006 se seleccionaron en cada rodal dos grupos de nueve árboles contiguos, estando cada segmento localizado enfrente del otro, en filas adyacentes. Estos dos grupos de árboles enfrentados (denominados filas en adelante) fueron seleccionados en base a similitud de sanidad, altura y diámetros de los árboles. El árbol central de ambas filas fue identificado con el número 0, y los otros ubicados a cada lado de este fueron identificados como 0d y 0iz, según estuvieran a la izquierda o derecha de este (Fig. 8). Los seis árboles restantes fueron identificados de +1 a +3 ó de -1 a -3 según estuvieran ubicados con el mismo criterio a la derecha o a la izquierda de los árboles 0.

A los tres árboles centrales (0, 0d y 0iz) de una de las filas (fila fertilizada) se les aplicó una dosis de 100 g de N por árbol (137 kg/ha) como UREA marcada (100 ¹⁵N) con una abundancia de 1,36 ¹⁵N%. El resto de los árboles de esta fila (seis) y todos los de la otra (nueve) no recibieron fertilizante (en este estadio, ya que todos habían sido fertilizados al momento de la plantación por la empresa).

¹ Noble, K. 2007. Com. personal

Figura 8. Esquema de los árboles fertilizados y muestreados



Referencias:

0: árbol cosechado de la fila fertilizada (100^{15}N) ó no fertilizada (0 N).
 0iz y 0de: árboles 100^{15}N ó 0N dejados para cosecha posterior
 +1, +2, +3 – árboles a la derecha del tratado, fila de plantación.
 -1, -2, -3 – árboles a la izquierda del tratado, fila de plantación.

El fertilizante se preparó mezclando 295.4g de urea al 10% de abundancia de ^{15}N con 2569.75 g de urea normal (2865.15 g de urea totales), disolviendo en agua y luego aforando la mezcla a 4 litros.

La fertilización se realizó en dos pozos de 10-15cm de profundidad aproximadamente, uno a cada lado de cada árbol, depositándose la mitad de la dosis en cada pozo, tapándose luego estos.

El muestreo de las diferentes partes de los árboles se realizó un mes y medio después de la fertilización. Primeramente se colectaron hojas de la copa superior e inferior de los tres árboles fertilizados (árboles 0, 0iz 0d de la fila fertilizado) y de los árboles aledaños (árboles +1, +2, +3, -1, -2 y -3). Un procedimiento similar se utilizó para la fila sin fertilizar. En todos los casos cada muestra consistió de cinco hojas jóvenes completamente desarrolladas, libres de tejidos enfermos y daños de insectos. Este muestreo de hojas se realizó para conocer la distribución del N aplicado en la copa del árbol fertilizado y su grado de absorción por los árboles vecinos no fertilizados, tanto de la propia fila (fila fertilizada) como de la de enfrente (fila no fertilizada). Este fue el muestreo cualitativo.

Posteriormente se realizó el muestreo cuantitativo, para obtener las muestras de hoja (H), rama (R), madera (M) y corteza (C). Para esto se aparearon de cada sitio los dos árboles 0 centrales, uno fertilizado (100^{15}N) y otro no fertilizado (0N), ambos procedentes de diferente fila (Fig. 8). Los árboles 0d y 0iz fueron dejados en pie para cosechas posteriores.

De cada árbol 0 se obtuvieron los pesos frescos totales de Ramas+Hojas (PFT R+H) y de este total, se separó una submuestra (S) representativa de R+H de peso fresco conocido (PFS R+H), del que se extrajo las hojas y se determinó su peso (PFS H). Luego se estimó el peso total de R y H de las formulas:

$$PFT H = \frac{PFS H}{PFS R + H} PFT R + H \quad [2]$$

$$PFT R = PFT R+H - PFT H \quad [3]$$

El fuste (F) se separó en trozas de altura (h) de aproximadamente 1,5 m, luego se cortó de la base de cada troza un disco de espesor variable (entre 0,035 y 1,21m) dependiendo del diámetro de la troza; es decir que cuanto menor era el diámetro de la troza, el espesor del disco fue mayor. Se separó la corteza (C) de cada troza, y se obtuvo el PFT C de las trozas, el cual sumado al PFT C de los discos equivale al PFT de C de todo el árbol.

Los discos fueron descortezados en el laboratorio, obteniéndose así el PF de cada disco para M y C, así como las medidas de espesor y diámetro de cada disco.

Los valores de peso seco total (PST) de H, R, C se obtuvieron de multiplicar el correspondiente PFT por la concentración de MS. No se discriminó entre Rama fina y Rama gruesa, por lo que PST R representa ambas.

Una porción representativa de H y todos los discos de M fueron llevados a estufa (65°C) para determinar el contenido de materia seca (MS). Las muestras de R y C se dejaron secar naturalmente hasta peso constante (dos meses en galpón).

Para estimar el PS de M, se estimó el Volumen (V) de cada troza (Ti) (Wikipedia, 2009) como:

$$V tr_i = \frac{\pi h_i}{3} (r_i^2 + r_{i+1}^2 + r_i r_{i+1}) \dots \dots \dots [4]$$

donde tr_i representa la troza n° i, mientras que r_i y r_{i+1} son los radios de los discos inferior y superior previamente extraídos de esta troza.

El PS de cada troza se estimó como el producto de $V tr_i$ por la densidad (d) promedio de los discos inferior (i) y superior (i+1).

$$PS tr_i = V tr_i \left(\frac{d_i + d_{i+1}}{2} \right) \dots \dots \dots [5]$$

A su vez la densidad de cada disco se estimó como la relación entre el PS de éste y su volumen. El PST M se obtuvo de la sumatoria de los PS de todos los discos y trozas de cada árbol.

$$PST M = \sum_{i=1}^n PS tr_i \dots\dots\dots[6]$$

3.3 PROCESAMIENTO DE LAS MUESTRAS

Las muestras para análisis de M y R (gruesas) se obtuvieron utilizando un taladro, para lo cual se realizaron perforaciones en el centro de cada disco o en las propias R obtenidas de los cuatro puntos cardinales y las R (finas) se fragmentaron con una maceta. Las muestras de C se pusieron dentro de una morsa, obteniéndose fibras de las mismas mediante fragmentación con una escofina de metal. Las muestras de M, R y C fueron molidos luego en el molino de material vegetal Retsch Mühle. Las muestras de H del muestreo cualitativo se molieron en un molino vegetal Micro Waley, mientras que las del muestreo cuantitativo se molieron en el molino Retsch Mühle.

Para evitar la contaminación de las muestras, en todos los casos entre molienda y molienda se limpio el molino con aire comprimido. Todas las muestras molidas fueron mantenidas dentro de bolsas de nylon hasta su análisis.

Posteriormente se realizó un molido más fino, para esto se deposito una pequeña parte de la muestra en frascos de vidrio (aproximadamente un cuarto del frasco) previamente lavados y secados, se colocaron tres cilindros metálicos por frasco, se los tapo, y se dejaron moler en una banda rotatoria, donde la muestra se molió a textura de talco por fricción entre los cilindros metálicos, durante 14 horas aproximadamente.

3.4 ACONDICIONAMIENTO DE LAS MUESTRAS A ANALIZAR Y PESAJE

Para pesar las muestras se utilizo una balanza analítica de alta precisión. Debido a que las muestras de M y C tenían un bajo contenido de N se pesó entre 15-18 miligramos por muestra, mientras que para H el peso fue entre 1,0-1,20 miligramos². Este material fue luego introducido dentro de cápsulas de estaño de 0.5mm de ancho por 0.7mm de largo. Previo al pesaje las muestras fueron secadas durante aproximadamente dos horas en estufa (60°C). Para observar si existía alta variación analítica, se realizaron al inicio dos repeticiones de cada muestra, pero debido a que no existió gran variación posteriormente se analizó solo una muestra. Todas las determinaciones isotópicas se realizaron siguiendo los procedimientos analíticos del Laboratorio CATNAS (Centro de Aplicaciones de Tecnología Nuclear en Agricultura Sostenible) (Mori, 2007).

Debido a que el espectrómetro no registró el pico de N (^{15}N) de las muestras más pobres en este nutriente como ser las de madera, se modificó el método usado en el software que dirige el funcionamiento del espectrómetro; se aumentó la concentración de oxígeno y se eliminó la etapa de dilución ².

3.5 DETERMINACIONES

3.5.1 Contenido total de N (% de N en la materia seca) y por partes

La cantidad de N en las diferentes partes del árbol y el total para cada árbol, se determinó según la siguiente fórmula (Zapata, 1990):

$$gN = PS \text{ Total} * \% N \dots\dots\dots [7]$$

donde gN son los gramos de N total o de una parte del árbol.

3.6 CÁLCULOS DE LOS EXPERIMENTOS CON ^{15}N

Para el cálculo del % de átomos de ^{15}N en exceso de las muestras vegetales y del fertilizante marcado se realizaron los siguientes cálculos:

$$\%^{15}\text{N a.e. m.v.} = a \%^{15}\text{Nm.v.} - a_o \% \text{ de }^{15}\text{N} \dots\dots\dots [8]$$

donde $\%^{15}\text{N m.v}$ es el porcentaje de abundancia de ^{15}N en la muestra vegetal y $a_o \% \text{ de }^{15}\text{N}$ es el % de abundancia natural de ^{15}N (0,3663) (Zapata, 1990).

$$\%^{15}\text{N a.e. f.m.} = \%^{15}\text{Nf.m.} - 0,3663 a. \% \text{ de }^{15}\text{N} \dots\dots\dots [9]$$

donde $\%^{15}\text{Nf.m}$ es el % de abundancia de ^{15}N en el fertilizante (Zapata, 1990).

Con los valores de abundancia de ^{15}N de las muestras ($\%^{15}\text{N a.e. m.v}$) y del fertilizante ($\%^{15}\text{N a.e. f.m.}$) se calculó la fracción de N en la planta derivado del fertilizante (NddF) marcado con ^{15}N , según la siguiente fórmula (Zapata, 1990):

$$\%NddF = \%^{15}\text{N a.e. m.v.} / \%^{15}\text{N a.e. f.m.} \dots\dots\dots [10]$$

donde $\%^{15}\text{N a.e. m.v.}$ es el porcentaje de átomos en exceso de ^{15}N en la muestra vegetal y $\%^{15}\text{N a.e. f.m.}$ es el porcentaje de átomos en exceso de ^{15}N en el fertilizante marcado (Zapata, 1990).

² Mori, C. 2007. Com. personal

La cantidad en gramos de Nddf se calculo según la siguiente fórmula:

$$gNddf = \% Nddf * gN \dots\dots [11]$$

donde Nddf es la fracción de N en la planta que proviene del fertilizante marcado con ^{15}N y gN es la cantidad en gramos de N total (Zapata, 1990).

La cantidad en gramos de Ndds se calculo según la siguiente fórmula:

$$gNdds = 100 - gNddf \dots\dots [12]$$

donde Ndds es la cantidad en gramos de N en la planta que proviene del suelo (Zapata, 1990).

Finalmente la EUF aplicado se calculo según la siguiente ecuación:

$$\%EUF = gNddf / GNF * 100 \dots\dots\dots [13]$$

donde EUF es el porcentaje de eficiencia de uso del fertilizante y GNF es la cantidad de N agregado como fertilizante (Zapata, 1990).

4. RESULTADOS Y DISCUSION

4.1 RENDIMIENTO DE LA BIOMASA Y ABSORCIÓN DE N

Cabe aclarar que la información presentada en los ítems 4.1.1 y 4.1.2 no forma parte de los objetivos de este estudio y la misma es de carácter complementario.

4.1.1 Biomasa total y por partes de los árboles

El mayor componente porcentual fue madera (M) (más del 50%) en todos los sitios, pero los demás componentes variaron entre sitios ya que el segundo componente fue rama (R) en el Sitio 6 ó corteza (C) en el Sitio 8. En este sitio, los tres componentes excepto M se distribuyeron en similar proporción, pero en el Sitio 6 C superó a las demás. La distribución de los componentes de la biomasa no se vio prácticamente alterada por la fertilización, posiblemente debido al corto tiempo transcurrido desde la misma (Fig. 9).

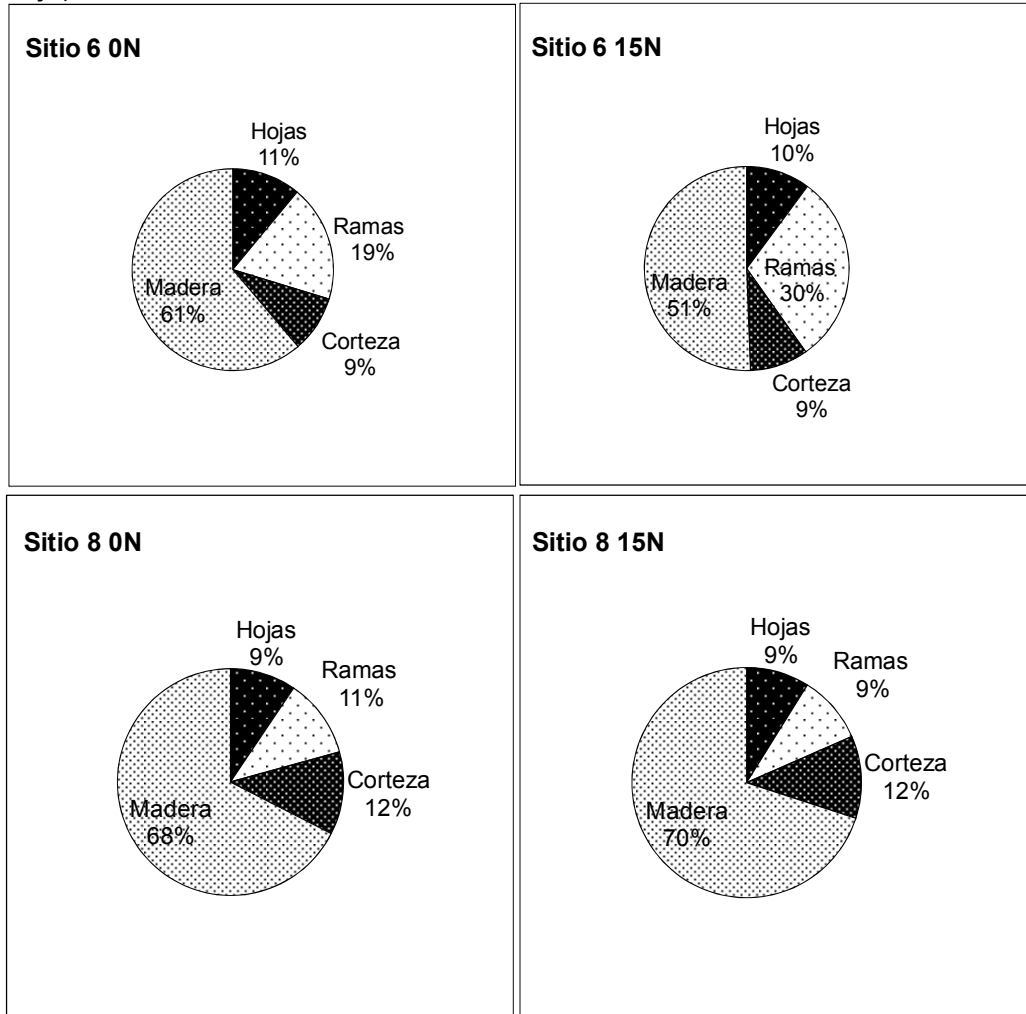
Estos valores estuvieron dentro del rango obtenido por otro estudio en árboles de *E. grandis* de similar edad a los de este trabajo los cuales acumularon más del 50% de la biomasa total en M y menos de un 20% en hoja (H)³.

Nuestros resultados (Figura 9 y Cuadro 3) también fueron coherentes con lo mencionado por Cromer y Jarvis, Kirschbaum et al., Cromer et al., citados por Attiwill y Adams (1996), quienes constataron que en árboles jóvenes H representa una proporción mayor de la biomasa total, mientras que en árboles de edades similares a la de este ensayo (comienzo de cierre de copa), la productividad de biomasa se explica más por la contribución de M y R, ya que H tiende a permanecer relativamente estable.

Según Attiwill y Adams (1996) la biomasa promedio del follaje de eucaliptos es aproximadamente solo el 2% de la total, pero la misma contiene el 20% del N presente en los componentes aéreos, no obstante en nuestro trabajo se obtuvieron resultados aún mayores (Cuadro 3, Figuras 9 y 10).

³ Vaz de Arruda, Silveira, de Andrade, Bianchini y Buona. 2007. 6º Curso de Nutrición de Eucalipto: Campo (sin publicar).

Figura 9. Distribución de la biomasa del árbol entre los diferentes componentes en los que se dividió la biomasa aérea (fuste, rama, corteza, y hoja).



Cuadro 3. Distribución de la biomasa (B) y N entre los distintos componentes y concentración (%) de N de árboles de *E. grandis* de 2 años de edad sometidos a dos tratamientos en dos sitios. El % de N de todo el árbol se estimó del cociente entre la masa de N y la biomasa de cada árbol.

Sitio	Tratamiento	Componente del árbol	N Total		
			B -Kg-	--%--	--g--
6	0N	Hojas	2,8	2,20	60,58
		Ramas	4,7	0,25	11,80
		Corteza	2,3	0,25	6,19
		Madera	15,3	0,09	13,52
		Todo	24,9	0,37	92,08
6	¹⁵ N	Hojas	1,9	2,69	50,29
		Ramas	5,5	0,32	17,43
		Corteza	1,7	0,31	5,62
		Madera	9,3	0,12	11,59
		Todo	18,4	0,46	84,93
8	0N	Hojas	2,4	2,31	56,42
		Ramas	2,9	0,34	10,07
		Corteza	3,1	0,21	6,33
		Madera	17,5	0,08	14,94
		Todo	25,9	0,34	87,76
8	¹⁵ N	Hojas	2,0	2,43	48,66
		Ramas	2,2	0,42	9,13
		Corteza	2,6	0,31	8,00
		Madera	15,8	0,11	17,49
		Todo	22,6	0,37	83,27

En los Sitios 6 y 8 respectivamente, las parcelas sin fertilizar produjeron un 26 y 13% más biomasa total que las fertilizadas. Este resultado fue inesperado, ya que ocurrió solo 45 días luego de la fertilización. Existen frecuentes reportes de efectos tóxicos temporarios y aún permanentes de N sobre el crecimiento (Perdomo, 2007), pero no hay reportes de estos efectos tan cerca luego de la fertilización. Es posible también que estas diferencias fueran producto del azar, ya que no se comprobó que los árboles 0 de cada fila tuvieran similar crecimiento al momento de la fertilización. Debido a que el objetivo de este ensayo no era evaluar diferencias en producción de biomasa no se puede concluir con certeza acerca de la causa de estas diferencias en producción. Esta menor producción de biomasa de las filas fertilizadas se observó en todos los componentes, excepto en R en el Sitio 6. Los árboles del Sitio 8 acumularon un 11% más biomasa que los árboles del Sitio 6 (Cuadro 3), posiblemente debido a la diferente fertilidad de los sitios y a la variabilidad natural de la especie.

4.1.2 Concentración, rendimiento y distribución entre componentes de la biomasa aérea del N absorbido por los árboles.

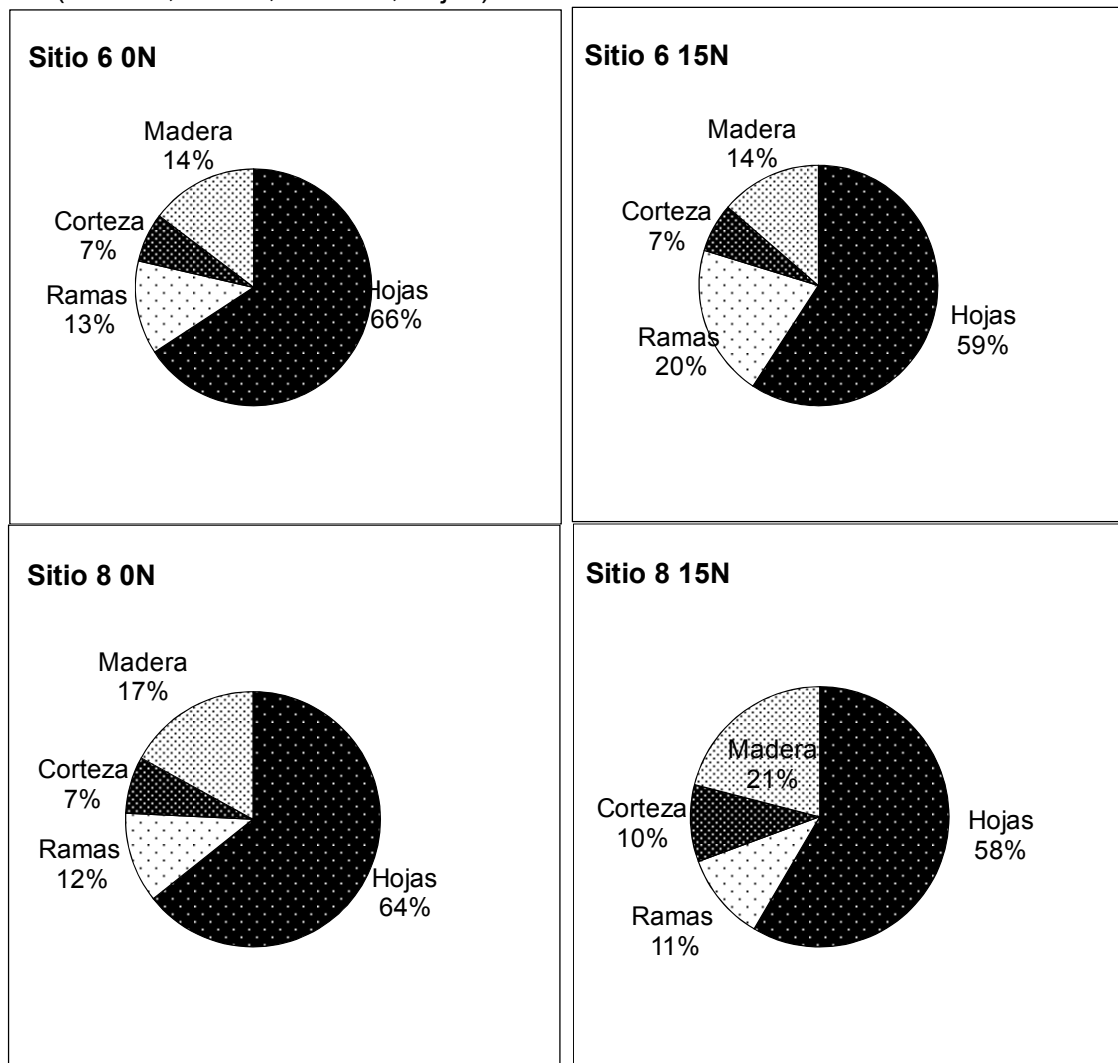
La cantidad de N de los diferentes componentes fue similar a lo encontrado por Silva, citado por de Moraes y Benedetti (2000) en *E. grandis* de 7 años de edad para H (64) y R (12), pero diferentes a los valores reportados para C (21) y M (58), todos estos valores en g de N/árbol.

Teniendo en cuenta la edad más joven de la plantación de nuestro estudio los resultados parecen ser acertados. Hubo un incremento de la concentración de N (% de N de todo el árbol) en las parcelas fertilizadas (de 0,37 a 0,46% y de 0,34 a 0,37%), en los Sitios 6 y 8 respectivamente). Este aumento se observó también en todos los componentes, y según lo esperado el incremento relativo fue mayor en H (Cuadro 3).

En los dos sitios las parcelas control que tuvieron mayor rendimiento en biomasa absorbieron también mayor cantidad de N (g) que las parcelas fertilizadas para el total del árbol (Cuadro 3). Este resultado implica que el aumento de concentración de N de las parcelas fertilizadas tuvo menos peso que la disminución de biomasa debido al efecto tóxico inicial de la fertilización nitrogenada. Se observaron diferencias de 7 y 4 g por árbol de N absorbido de las parcelas sin fertilizar con respecto a las fertilizadas, en los Sitios 6 y 8 respectivamente, las cuales llevadas a una hectárea (en promedio 1389 árboles/ha) representan 10 y 6 Kg/ha respectivamente.

Dentro del total de N absorbido por árbol, el componente H acumuló porcentualmente más cantidad de N (Fig. 10 y Cuadro 3), luego siguió M, excepto para el tratamiento ^{15}N del sitio 6, en el cual R absorbió más N. En tercer lugar R, con la excepción anterior, y por último C. Este resultado evidencia de que si bien H acumuló porcentualmente poca biomasa concentra gran parte del N.

Figura 10. Distribución porcentual del nitrógeno (N) total absorbido entre los diferentes componentes en los que se dividió la biomasa aérea del árbol (Madera, ramas, corteza, hojas).



4.2 ABSORCION DE N DEL FERTILIZANTE

4.2.1 Kg NddF (g/árbol y Kg/ha)

De acuerdo a lo esperado, el N proveniente del fertilizante solo se detectó en las filas fertilizadas (Cuadro 4), lo que indica que en el corto período post-fertilización no existió competencia por la fila adyacente. Las cantidades de N del fertilizante por árbol y por unidad de superficie en el tratamiento testigo fueron iguales a cero en todos los casos, y las diferencias por encima y por debajo de este valor solo reflejan el error experimental en la determinación.

En la fila fertilizada la recuperación en la planta en g/árbol y en kg/ha del N proveniente del fertilizante fue mayor en el Sitio 6 con respecto al 8. La absorción de N del fertilizante fue contraria a la producción de biomasa en los dos sitios, se constató que el Sitio 8 que produjo más biomasa absorbió menos fertilizante.

4.2.2 Distribución de NddF (g) en los componentes de la biomasa aérea de las parcelas bajo tratamiento

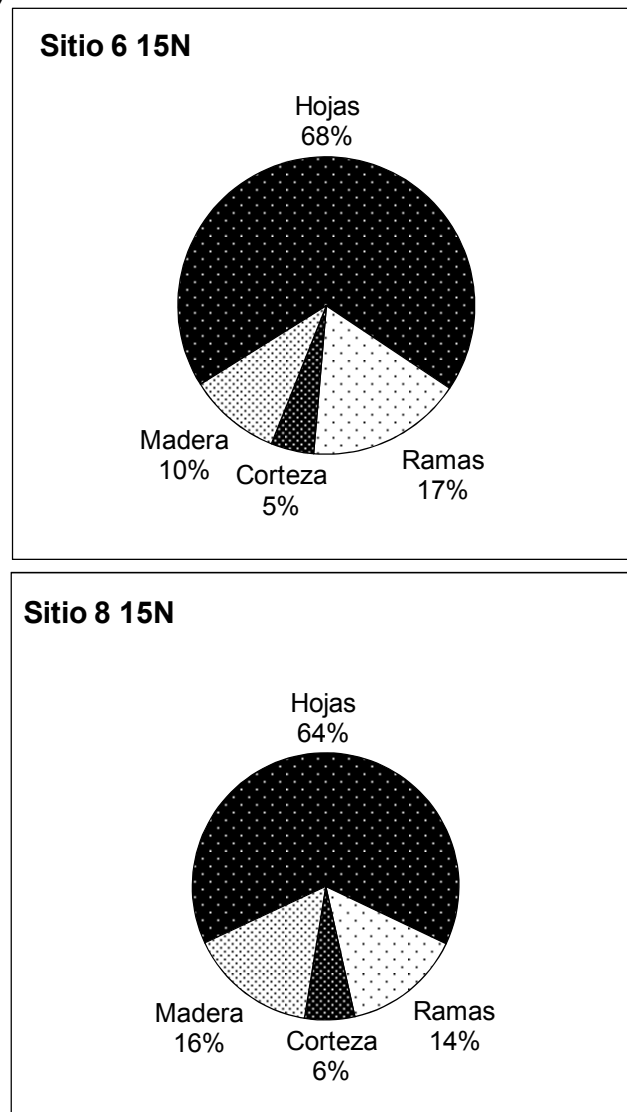
En los dos sitios, las cantidades de NddF en los árboles fertilizados fueron bajas, representando menos de un 10% del total de N presente en el árbol (Cuadro 4).

Cuadro 4. Nitrógeno derivado del fertilizante (NddF) determinado con ^{15}N en los distintos componentes de la biomasa aérea de árboles de *E. grandis* y expresado como masa y como proporción del N total presente en cada componente

Sitio	Componente	NddF	
		g	%
6	Hojas	5,5	10,95
6	Ramas	1,4	7,88
6	Corteza	0,4	6,52
6	Fuste	0,8	7,06
6	Total	8.1	9,50
8	Hojas	3.0	6,24
8	Ramas	0,7	7,49
8	Corteza	0,3	3,61
8	Fuste	0,7	4,21
8	Total	4,7	5,70

En los dos sitios la distribución de NddF en los componentes del árbol fue similar a la distribución del N total, ya que H fue el componente que acumuló porcentualmente más y C menos (Fig. 11 y Cuadro 4). De todas maneras, esta tendencia fue aun más marcada que para el caso de N total absorbido (Figuras 10 y 11). En ambos sitios se confirmó nuestra hipótesis principal, ya que la mayor parte del N aplicado (85 a 80%) se encontró en H y R.

Figura 11. Distribución del nitrógeno (N) absorbido del fertilizante entre los diferentes componentes en los que se dividió la biomasa aérea del árbol (madera, ramas, corteza, hojas).



4.2.3 Nitrógeno derivado del suelo

De acuerdo a lo esperado, el N absorbido por la planta derivado del suelo (gNdds) fue mayor en las filas sin fertilizar que en las fertilizadas. Los árboles fertilizados de ambos sitios absorbieron similares cantidades de N del suelo, y este representó en las filas fertilizadas más del 85% del N total (Cuadro 5).

Cuadro 5. Cantidad de nitrógeno (g) que deriva del suelo en árboles de *E. grandis* en sitios de la zona Litoral-oeste.

Sitio	Tratamiento	Ndds ¹ -----g-----
6	ON	92
6	¹⁵ N	77
8	ON	88
8	¹⁵ N	78

¹ Ndds: gramos de N en el árbol que deriva del suelo.

4.3 EFICIENCIA DE USO DEL FERTILIZANTE

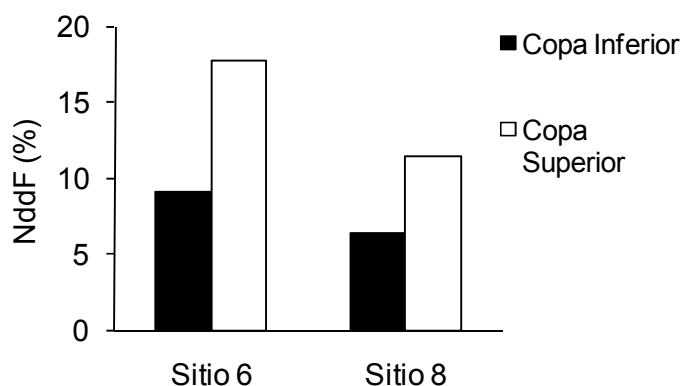
Los resultados de EUF determinado por el Método Isotópico ya fueron presentados, debido a que en este caso, como la dosis de N aplicado fue de 100 g por árbol, la EUF coincide con los valores de gNddF (Cuadro 4 y Figura 11). Los valores obtenidos en nuestra investigación coincidieron con lo expuesto por Binkley (1993), quien sostiene que los árboles forestales en general absorben menos de una cuarta parte del fertilizante en los primeros años. Nuestros resultados fueron aun más bajos (8.1 y 4.7% en los Sitios 6 y 8 respectivamente) con respecto al obtenido por Salifu y Timmer (2003), quienes constataron una recuperación del N que promedio entre 12 y 19% en árboles de *Picea mariana*. De todas maneras estos menores valores serian esperables, porque en nuestro estudio la eficiencia se evaluó solo un mes y medio luego de la fertilización.

También se estimo la EUF por el Método No Isotópico, el cual se calculó como la diferencia de la absorción de N entre los tratamientos fertilizados y el control. Los valores de EUF tuvieron en ambos sitios signo negativo (-7 y -4%, en los Sitios 6 y 8 respectivamente). La explicación más razonable es que esto se pudo deber a que las parcelas fertilizadas redujeron su absorción de N del suelo debido a la presencia de N del fertilizante. Como en este método se asume que las parcelas fertilizadas y no fertilizadas absorben iguales cantidades, si esto no ocurre la estimación puede ser negativa ó positiva, según que la parcela fertilizada absorbe menos o más N del suelo que la parcela testigo (Zapata, 1990). En este caso la fertilización nitrogenada redujo la absorción de Ndds por lo cual los resultados del método isotópico proporcionaron información más precisa para determinar la EUF en árboles.

4.4 DISTRIBUCIÓN DE NddF EN LA COPA DE LOS ÁRBOLES, FUSTE Y CORTEZA

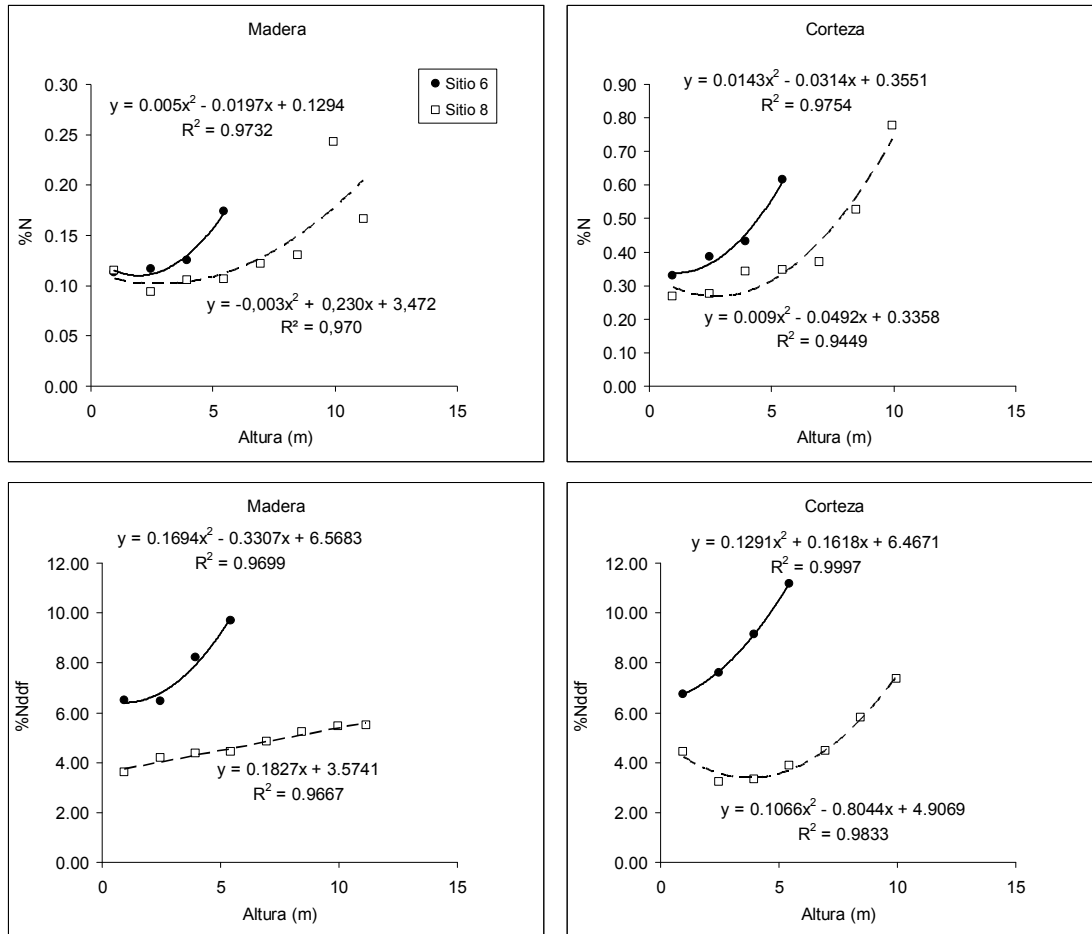
El contenido de NddF fue mayor en las hojas ubicadas en la parte superior de la copa, constatándose una considerable variación entre la misma y la copa inferior (Figura 12). Este patrón de variación lo observaron también Lamb, Kingston et al., Leuning et al., citados por Attiwill y Adams (1996) (Figura 6), J. Melin et al., (1983), Crucci (2007). Esto indica que muestrear hojas de la copa media permitiría obtener resultados con menor variabilidad (Bellote, citado por de Moraes y Benedetti 2000) y de forma más práctica.

Figura 12. Distribución de N proveniente del fertilizante en dos posiciones de la copa de árboles fertilizados de *E. grandis* de dos años de edad para los sitios estudiados.



Existió también un marcado incremento del N total y del NddF en C y M con la elevación en altura de la troza, con incrementos de más del doble entre la primera y última troza para los dos sitios. Esto es coherente con lo observado por Attiwill, Zen et al., Lemoine et al., citados por de Moraes y Benedetti (2000) quienes encontraron en la corteza variaciones en el contenido de nutrientes a lo largo de todo el fuste, el contenido de estos nutrientes crecieron en forma ascendente desde la base hasta el ápice. Esta variación del contenido de N con la altura en C y M fue observada también por Melin et al., (1983). En los dos sitios la concentración de N fue claramente mayor en C que en M (similar a lo observado por Melin et al., 1983), y esta tendencia también ocurrió en general para NddF, excepto que en las trozas 2, 3 y 4 del Sitio 8 los resultados se invirtieron. A su vez M y C de los árboles del Sitio 6 registraron las mayores concentraciones de N y NddF. (Figura 13).

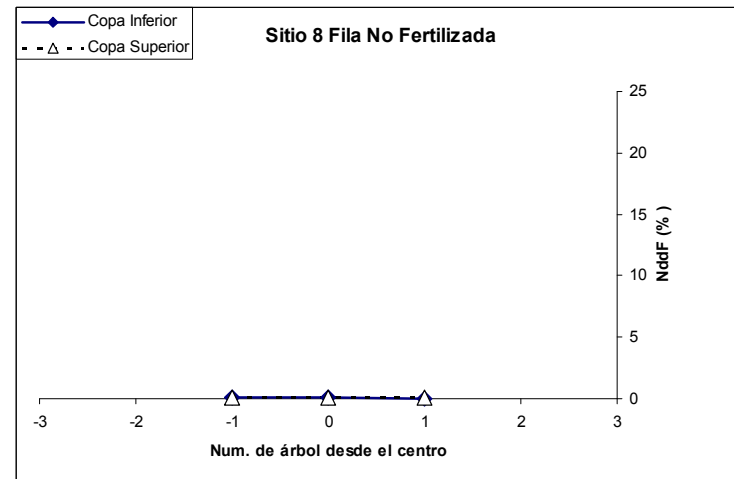
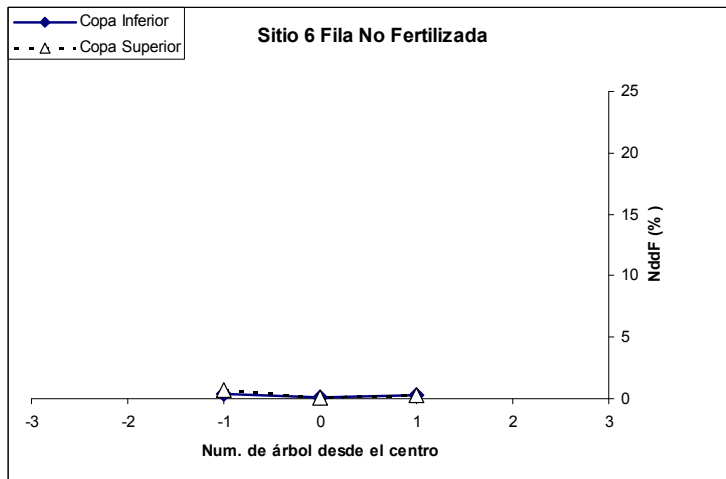
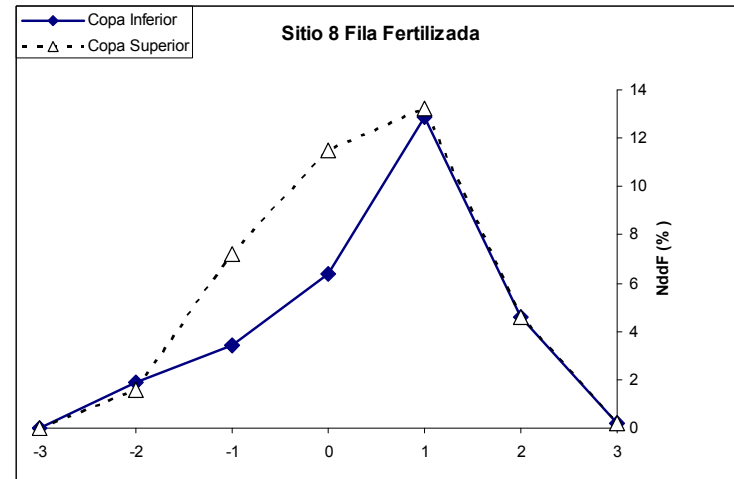
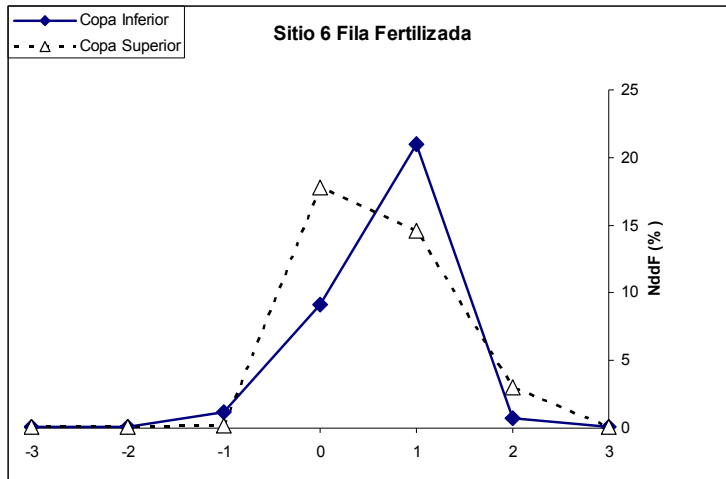
Figura 13. Distribución de N proveniente del fertilizante en Fuste y Corteza de árboles fertilizados de *E. grandis* de dos años de edad para los sitios



4.5 ABSORCIÓN DE Nddf POR ÁRBOLES ALEDAÑOS EN FILA DE PLANTACION Y FILA DE ENFRETE EVALUADO A TRAVÉS DE LA CONCENTRACIÓN DE LAS HOJAS

El resultado de %Nddf de las hojas de la copa superior e inferior de los árboles de la fila fertilizada muestra que en forma contraria a lo esperado, el árbol fertilizado (Árbol 0) no fue en todos los casos el que mostró el mayor %Nddf. Tanto en la copa superior como inferior del Sitio 8, como en la copa inferior del Sitio 6, el Árbol 1 (el más contiguo a la derecha) fue el que absorbió más Nddf. Los Árboles 2 y 3, en cambio, absorbieron menos N agregado, especialmente en el Sitio 6. Esto indica la gran competencia entre árboles contiguos de una misma fila por el N agregado. Es importante resaltar además que también contrariamente a lo esperado, de acuerdo a lo observado en el árbol 0 (Fig. 12), los valores de %Nddf del árbol 1 y 2 fueron similares en la copa inferior y superior (o incluso superiores en la copa inferior. Este resultado posiblemente fue debido a que en los árboles 1 y 2 el Nddf había sido absorbido más recientemente en relación al árbol 0, y por lo tanto estaba todavía siendo translocado hacia la copa superior. En los dos sitios los valores de %Nddf de los árboles de la fila de enfrente fueron prácticamente iguales a cero, por lo cual se confirma que en este momento de muestreo la competencia por N solo ocurrió dentro de la fila de plantación (Figura 14).

Figura 14. Rango de absorción de Nddf (%) de árboles de *E. grandis* pertenecientes a la misma fila de plantación del árbol fertilizado, y a la fila de enfrente en los dos sitios estudiados



4.5.1 Eficiencia de Uso del N del fertilizante estimada con los árboles aledaños de la misma fila

Si bien la EUF del árbol fertilizado presentada previamente fue baja (Cuadro 6), resulta evidente de la Fig. 14 que algunos árboles aledaños de la misma fila también absorbieron N del fertilizante. Por tanto, se trató de estimar la absorción de gNddf de los árboles aledaños por medio de un índice, bajo la asunción de que la relación entre el %Nddf_p (promedio de la copa superior e inferior) y los gNddf del árbol 0 fue similar a la de los demás árboles aledaños, en los que se muestreó solo hojas de la copa superior e inferior. Por lo tanto, para el árbol 1 gNddf se estimó como:

$$gNddf_{\text{árbol1}} = \frac{gNddf_{\text{árbol0}} \%Nddf_p_{\text{árbol1}}}{\%Nddf_p_{\text{árbol0}}} \quad [14]$$

Con la función [14] también se estimó el valor de gNddf de los cinco árboles aledaños restantes, y se asumió que la suma de todos estos valores (incluyendo el árbol 0) representó la cantidad total de Nddf absorbida. Obviamente, la eficiencia calculada a partir de este índice fue mayor a la calculada solamente del árbol_0 (19,7 y 15,5 vs 8,1 y 4,8%, para los Sitios 6 y 8 respectivamente), más que duplicando la EUF estimada previamente. Más allá de que desde el punto de vista cuantitativo este valor es incierto, este resultado demuestra la conveniencia de cosechar por lo menos 1 a 2 árboles más a cada lado del árbol fertilizado para estimar mejor la EUF.

5. CONCLUSIONES

Las cantidades de Nddf en plantaciones comerciales de *E. grandis* en Uruguay , estimadas por el método isotópico usando un solo árbol y después de sólo un mes y medio post-aplicación del fertilizante, fueron bajas en los dos sitios, representando menos de un 10% del total de N presente en el árbol. Por otra parte la recuperación en la planta en g/árbol y en kg/ha del N proveniente del fertilizante fue mayor en el Sitio 6 con respecto al 8.

El componente H acumuló porcentualmente más Nddf y C menos. Esta tendencia fue aun más marcada que para el caso de N Total absorbido. En ambos sitios se confirmó nuestra hipótesis principal, ya que la mayor parte del N aplicado (80 a 85%) se encontró en H y R.

Las EUF estimadas por el método isotópico fueron bajas para los dos sitios estudiados, menores al 10% de la tasa de aplicación del fertilizante por planta (100g/árbol). El componente más eficiente en el uso de N fue H, sucedió lo contrario con el componente C. Los resultados del método isotópico proporcionaron información más precisa para determinar la EUF en árboles.

La distribución del Nddf varió significativamente de la posición inferior a la posición superior de la copa de los árboles, esto indica que es útil muestrear las hojas nuevas completamente expandidas de la posición media para obtener resultados con menor variabilidad y simplificar el trabajo.

La EUF estimada como índice promedio de absorción de N del fertilizante fue considerablemente mayor que la eficiencia calculada con el método isotópico y usando un solo árbol, lo que demostró la conveniencia de cosechar por lo menos 1 a 2 árboles a cada lado del árbol fertilizado.

6. RESUMEN

La productividad de las plantaciones de *Eucalyptus sp.* depende considerablemente del aporte de nitrógeno (N), principalmente cuando estas son establecidas sobre sitios pobres. Tradicionalmente para cubrir las recomendaciones de N se utilizan fertilizantes de bajo costo, pero estas recomendaciones se realizan sin mayor consideración por la variabilidad espacial y los potenciales efectos en el medio ambiente. Actualmente, se considera importante racionalizar la fertilización N para asegurar el uso eficiente de este nutriente bajo principios económicos y ambientales. El manejo agronómico en un programa de fertilización debe buscar la reducción de las pérdidas de N y maximizar la recuperación del N aplicado, a través de un aumento de la eficiencia de uso (EUF) del N. La aplicación de las técnicas nucleares en la agricultura, ha promovido el desarrollo de tecnologías fundamentadas en el uso de isótopos estables de ^{15}N para estudiar la EUF. Los objetivos de este trabajo fueron ajustar la metodología isotópica de ^{15}N en plantaciones comerciales de *Eucalyptus*, obtener los primeros datos cuantitativos sobre la EUF en esta especie, obtenidos con ^{15}N y estudiar la redistribución interna del N aplicado. Dentro de plantaciones comerciales de 2 años se seleccionaron 2 rodales representativos; en cada rodal se seleccionaron 2 filas de 9 árboles representativos de los cuales a 3 se les aplicó uno de los tratamientos, fertilizado (100^{15}N) y sin fertilizar (0N). El muestreo de las diferentes partes se realizó un mes y medio después de la fertilización. Hubieron dos clases de muestreo: cualitativo y cuantitativo. Para el primero se colectaron hojas (jóvenes y completamente desarrolladas) de la parte superior e inferior de las copas de los árboles fertilizados, árboles aledaños a estos y de los árboles de la fila sin fertilizar. En el muestreo cuantitativo, se apearon los árboles fertilizado y sin fertilizar de cada sitio. De cada árbol se obtuvieron muestras de hojas (H), ramas (R), corteza (C) y madera (M). A todas las muestras se les determinó la concentración de N Total y Nddf. Se compararon los resultados con estudios similares en otras especies, encontrándose que las EUF de las plantaciones estudiadas fueron menores a las reportadas en estos estudios aunque nuestros resultados fueron obtenidos a partir de un muestreo realizado solo 45 días post-fertilización. La EUF estimada como índice promedio de absorción de Nddf fue considerablemente mayor que la EUF estimada usando un solo árbol, demostrando la conveniencia de cosechar 1 a 2 árboles a cada lado del árbol fertilizado. El método isotópico proporcionó información más precisa para determinar la EUF en árboles. Las cantidades de Nddf por árbol fueron bajas en los dos sitios, representando menos de un 10% del total de N presente en el mismo. Para ambos sitios se constató que la mayor parte del Nddf (80 a 85%) se encontró en H y R. El componente H acumuló porcentualmente más Nddf y este fue menor en C.

Palabras clave: *Eucalyptus grandis*; Fertilización nitrogenada; Nddf; EUF

7. SUMMARY

The productivity of *Eucalyptus sp.* plantations depends considerably on the contribution of nitrogen (N), especially when these are established on poor sites. Traditionally, low cost fertilizers are used to cover N recommendations, but these recommendations are realized without considering the spatial variability and the potential effects in the environment. Nowadays, it is considered important to rationalize the N fertilization to assure an efficient use of this nutrient under economic and environmental principles. The agronomic management in a fertilization program must reduce N losses and maximize the recovery of the applied N, through an increase of the efficiency in the N use (EUF). The application of nuclear technologies in agriculture, has promoted the development of technologies based on the use of stable isotopes of ^{15}N to study the EUF. The objectives of this work were, to adjust the isotopic methodology of ^{15}N in commercial plantations of eucalypts, to obtain the first quantitative information on the efficiency of N use in this specie obtained with ^{15}N and to study the internal redistribution of the applied N. In 2 years old commercial plantations, 2 representative stands were selected; in every stand 2 rows with 9 representative trees were selected and in 3 of these trees one of the treatments was applied, fertilized (100^{15}N) and not fertilized (0N). The sampling of the different parts was realized one month and a half after the fertilization. There were two types of sampling: qualitative and quantitative. For the first one there were collected leaves (young and completely developed) from the top and low part of the crowns of fertilized trees, from neighbour trees and from trees of the row without fertilizing. In the quantitative sampling, the fertilized and not fertilized trees of each site were harvested. From every tree were collected samples of leaves (L), branches (B), bark (Ba) and wood (W). In all the samples it was determined the concentration of Total N and Nddf. The results were compared with similar studies in other species, finding that the EUF of the studied plantations were lower than the reported ones in the studies in other species. This fact could be because the collect of the sampling results was realized only 45 days post-fertilization. The EUF estimated as average index of Nddf absorption was considerably higher than the estimated EUF using only one tree. This shows the convenience of harvesting 1 to 2 trees around the fertilized tree. The isotopic method provided precise information to determine the EUF in trees. Nddf quantities per tree were low in both sites, representing less than 10 % of the whole N present in each tree. For both sites it was stated that most of the applied N (80 - 85 %) was found in L and B. The L component, in percentage terms, accumulated the highest Nddf and the least C.

Key words: *Eucalyptus grandis*; nitrogenous Fertilization; Nddf; EUF

8. BIBLIOGRAFIA

1. ATTIWILL, P.M.; ADAMS, M.A. 1996. Nutrition of eucalyptus. Australia. CSIRO 440p.
2. BINKLEY D. 1993. Nutrición forestal; prácticas de manejo. México, Limusa. 340p.
3. BRUSSA, C. A. 1994. Eucalyptus; especies de cultivo más frecuente en Uruguay y regiones de clima templado. Montevideo, Hemisferio Sur. 328 p.
4. CABRERA, E. 2003. Las técnicas isotópicas en la dinámica de nitrógeno en el continuo suelo-planta de agrosistemas en Venezuela. (en línea). Revista de la Sociedad Venezolana de la Ciencia del Suelo y del Instituto de Edafología de la Facultad de Agronomía de la Universidad Central de Venezuela. Volumen 11(1 y 2). Consultado 11 set. 2007. Disponible en http://www.redpav.avepagro.org.ve/venesuel/v11_1-2/VENESUELOS%20%20VOL%2011.pdf
5. CRUCCI, M. 2007. Evaluación de DRIS y nivel crítico en el diagnóstico nutricional de *Eucalyptus grandis*. Tesis Ing. Agr. Montevideo, Uruguay, Facultad de Agronomía. 50p.
6. DE MORAES, J.L.; BENEDETTI V. 2000. Nutrição e fertilização florestal. Piracicaba. IPEF. 427p.
7. GARATEGUI, A.L. 2002. Estudio de la respuesta al nitrógeno en *Eucalyptus dunnii* Maiden, para producción de biomasa. Tesis Ing. Agr. Montevideo, Uruguay. Facultad de Agronomía. 87p.
8. MATTOS, D.; DONALD, JR.; GRAETZ, A.; ALVA, A. K. 2003. Biomass distribution and nitrogen-¹⁵ partitioning in citrus trees on a sandy entisol. Soil Science Society of America Journal. 67 (2): 555-563.
9. MELIN J.; NÔMMIK H.; LOHM U.; FLOWER-ELLIS J. 1983. Economía del fertilizante nitrogenado en ecosistemas de *P. sylvestris* usando parcelas con raíces aisladas y técnicas de marcadores de N15. Plant and Soil. 74(2): 249-263.
10. MORI C. 2009. Cambios en la abundancia natural de ¹⁵N debidos a la perturbación agrícola. Tesis Magíster en Ciencias Agrarias. Montevideo, Uruguay. Facultad de Agronomía. 72p.
11. MUÑOZ, N.; GUERRI, J.; LEGAZ, F.; PRIMO-MILLO, E. 1993. Captación estacional de nitrato marcado con N15 y distribución del nitrógeno absorbido en árboles de pera. Plant and Soil. 150 (2):263-269.

12. PERDOMO, C.; BARBAZAN, M. 1999. Nitrógeno. Montevideo, Facultad de Agronomía. 69 p.
13. _____.; DURÁN, J.; LLOVET, P. 2007. Soil and plant indices for predicting eucalypt response to nitrogen in Uruguay. Soil Science Society of American Journal. 71: 1708-1718.
14. SALIFU, K.F.; TIMMER V.R. 2003. Nitrogen retranslocation response of young of *Picea mariana* to Nitrogen-15 supply. Soil Science Society of America Journal. 67 (1): 309-317.
15. URUGUAY. MINISTERIO DE GANADERÍA, AGRICULTURA Y PESCA. DIRECCIÓN GENERAL DE RECURSOS NATURALES RENOVABLES. 1994. Índice de productividad grupos CONEAT. Montevideo. 182 p.
16. [Wikipedia](#). 2009. Tronco de cono (en línea). s.l. s.p. Consultado 11 dic. 2009. Disponible en [http://wapedia.mobi/es/Tronco de cono](http://wapedia.mobi/es/Tronco_de_cono))
17. ZAKRA, N.; WEAVER, R. W.; DE TAFFIN, G. 1993. Distribution of ¹⁵N from ammonium fertilizer in field grown Acacia. (en línea). Plant and Soil. 151 (1): 147-150. Consultado 15 set. 2007. Disponible en <http://www.springerlink.com/content/x647771327g3x535/>
18. Zapata, F. 1990. Técnicas isotópicas en estudios sobre la fertilidad del suelo y la [nutrición](#) de las plantas; [empleo](#) de técnicas nucleares en los estudios de la relación suelo-planta. IAEA. Viena, Austria. 171p.

9. ANEXOS

9.1 PESO SECO DE COMPONENTES (H, R, C y M)

9.1.1 Peso seco de rama (R)

Sitio	Trat.	PFS R	PSSub. Rama	% MS Rama	PSSub R+H	%MS R+ H	PSTot R+H	PSTot. Rama
6	⁰ N	1,502	0,871	57,99	1,39	55,45	7,40	4,65
6	¹⁵ N	2,296	1,356	59,06	1,82	59,53	7,38	5,51
8	⁰ N	1,5	0,558	37,20	1,02	40,12	5,38	2,93
8	¹⁵ N	1,5	0,47	31,33	0,90	30,16	4,16	2,16

9.1.2 Peso seco de rama (R)

Sitio	Trat.	PFS H	PFSub. 2 Hoja	PSSub 2 Hoja	% MS Hoja	PSSub Hoja	PSSub R+H	PSTot. Hoja
6	⁰ N	0,754	0,12	0,082	68,33	0,52	1,39	2,75
6	¹⁵ N	0,563	0,12	0,098	81,67	0,46	1,82	1,87
8	⁰ N	0,946	0,12	0,059	49,17	0,47	1,02	2,44
8	¹⁵ N	1,023	0,12	0,051	42,50	0,43	0,90	2,00

9.1.3 Peso seco de corteza (C)

Sitio	Trat.	PF Muestra Cort.	PF Subm. Cort.	PS Subm. Cort.	% MS	PS Tot. Cort.
6	0	3,75	0,9	0,545	60,56	2,27
6	15	2,9	1,1	0,647	58,82	1,71
8	0	6,1	1,3	0,599	46,08	2,81
8	15	5,85	0,727	0,296	40,72	2,38

9.1.4 Áreas y densidades de discos de madera

Sitio	Trat.	Nº disco	Radio (m)	Altura (m)	P. Seco(kg)	Área (m ²)	Vol. (dm ³)	Den. (kg/dm ³)
6	15N	1	0,15	0,06	0,21	0,07	0,42	0,51
6	15N	2	0,10	0,04	0,08	0,03	0,12	0,72
6	15N	3	0,09	0,09	0,10	0,02	0,22	0,45
6	15N	4	0,07	0,11	0,07	0,01	0,17	0,44
6	15N	5	0,04	0,28	0,04	0,00	0,11	0,41
6	0N	1	0,17	0,05	0,22	0,09	0,47	0,48
6	0N	2	0,14	0,08	0,20	0,06	0,49	0,41
6	0N	3	0,12	0,10	0,22	0,05	0,47	0,46
6	0N	4	0,10	0,10	0,15	0,03	0,33	0,46
6	0N	5	0,09	0,14	0,14	0,02	0,31	0,45
6	0N	6	0,05	0,26	0,10	0,01	0,22	0,45
8	15N	1	0,18	0,07	0,31	0,10	0,64	0,48
8	15N	2	0,14	0,07	0,18	0,06	0,40	0,45
8	15N	3	0,13	0,07	0,14	0,05	0,34	0,42
8	15N	4	0,11	0,08	0,13	0,04	0,28	0,44
8	15N	5	0,09	0,11	0,12	0,03	0,27	0,42
8	15N	6	0,06	0,21	0,11	0,01	0,27	0,40
8	15N	7	0,03	0,33	0,05	0,00	0,11	0,42
8	0N	1	0,18	0,07	0,36	0,11	0,69	0,52
8	0N	2	0,15	0,07	0,17	0,07	0,45	0,39
8	0N	3	0,13	0,13	0,27	0,05	0,65	0,41
8	0N	4	0,11	0,10	0,17	0,04	0,42	0,41
8	0N	5	0,09	0,10	0,13	0,03	0,28	0,45
8	0N	6	0,07	0,21	0,13	0,01	0,28	0,47
8	0N	7	0,04	0,30	0,07	0,01	0,17	0,42

9.2 ABSORCIÓN DE N DEL FERTILIZANTE

9.2.1 KG NDDF (g/árbol y Kg/ha)

Sitio	Tratamiento	Nddf	Nddf	Nddf
		kg/árbol	g/árbol	kg/ha *
6	⁰ N	0,000136064	0,14	0,2
6	¹⁵ N	0,007992526	7,99	11,1
8	⁰ N	0,00011046	0,11	0,2
8	¹⁵ N	0,004748068	4,75	6,6

Nddf: fracción de N en el árbol que se deriva del fertilizante marcado con ¹⁵N

* Para una densidad de 1388,9 arboles/ha.

9.2.2 Cantidad en gramos de N total y Nddf.

Sitio	Trat.	Parte árbol	Amt N%	PS Tot.	g N	AT% ¹⁵ N/ ¹⁴ N	AT % ¹⁵ N Exc.	% Nddf	g Nddf	% Nddf en cada parte
8	15N	Hoja (H)	2,43	2,00	48,66	0,43	0,06	6,25	3,04	6,25
8	15N	Rama (R)	0,84	2,16	9,13	0,88	0,14	14,37	0,68	7,49
8	15N	Corteza (C)	2,94	2,51	7,71	2,88	0,32	31,61	0,28	3,61
8	15N	Madera (M)	1,11	15,79	17,49	3,30	0,38	37,60	0,74	4,21
Total				22,46	82,98				4,74	5,70
8	0N	Hoja (H)	2,31	2,44	56,42	0,37	0,00	0,13	0,07	
8	0N	Rama (R)	0,69	2,93	10,07	0,73	0,00	0,19	0,01	
8	0N	Corteza (C)	2,61	3,06	6,33	2,94	0,02	1,50	0,01	
8	0N	Madera (M)	0,75	17,51	14,94	2,93	0,01	0,60	0,01	
Total				25,94	87,76				0,11	
6	15N	Hoja (H)	2,69	1,87	50,29	0,48	0,11	10,95	5,51	10,95
6	15N	Rama (R)	0,63	5,51	17,43	0,91	0,18	17,76	1,37	7,88
6	15N	Corteza (C)	2,08	1,79	5,62	2,24	0,41	41,19	0,37	6,52
6	15N	Madera (M)	0,53	9,30	11,59	1,77	0,31	30,88	0,82	7,06
Total				18,47	84,93				8,07	9,50
6	0N	Hoja (H)	2,20	2,75	60,58	0,37	0,00	0,14	0,09	
6	0N	Rama (R)	0,51	4,65	11,80	0,73	0,00	0,21	0,02	
6	0N	Corteza (C)	2,14	2,47	6,19	2,58	0,01	1,31	0,03	
6	0N	Madera (M)	0,55	15,27	13,52	2,20	0,00	0,24	0,00	
Total				25,15	92,08				0,14	

9.2.3 Cálculos del Nitrógeno derivado del suelo

Sitio	Tratamiento			Ndds
		g Nddf	g N	g
6	0N	0,14	92,08	92
6	15N	8,07	84,87	77
8	0N	0,11	87,76	88
8	15N	4,75	83,27	79

Ndds: fracción de N (%) en la planta que deriva del suelo.

9.2.4 Absorción de N del fertilizante estimado según el método de la diferencia

Sitio	Absorción Trat. ¹⁵ N *	Absorción Trat. ⁰ N **	Absorción de N del fertilizante ***
	g	g	%
6	84,9	92,1	-7,2
8	83,3	87,8	-4,5

* Absorción de N del tratamiento fertilizado; ** absorción de N del trat. control; *** absorción de N del fertilizante referido a la tasa de aplicación.

9.3 DISTRIBUCIÓN DE N TOTAL Y Nddf EN FUSTE Y CORTEZA

9.3.1 Sitio 8

Posición de la troza	Alturas	%N	%Nddf
Madera Troza 1	0,95	0,12	3,60
Madera Troza 2	2,45	0,09	4,19
Madera Troza 3	3,95	0,11	4,36
Madera Troza 4	5,45	0,11	4,43
Madera Troza 5	6,95	0,12	4,85
Madera Troza 6	8,45	0,13	5,22
Madera Troza 7	9,95	0,24	5,47
Madera Troza 8	11,16	0,17	5,49
Corteza Troza 1	0,95	0,27	4,45
Corteza Troza 2	2,45	0,28	3,24
Corteza Troza 3	3,95	0,34	3,32
Corteza Troza 4	5,45	0,35	3,90
Corteza Troza 5	6,95	0,37	4,46
Corteza Troza 6	8,45	0,53	5,80
Corteza Troza 7	9,95	0,78	7,37

9.3.2 Sitio 6

Posición de la troza	Alturas	%N	%Nddf
Madera Troza 1	0,95	0,11	6,51
Madera Troza 2	2,45	0,12	6,46
Madera Troza 3	3,95	0,12	8,22
Madera Troza 4	5,45	0,17	9,69
Corteza Troza 1	0,95	0,33	6,75
Corteza Troza 2	2,45	0,39	7,60
Corteza Troza 3	3,95	0,43	9,16
Corteza Troza 4	5,45	0,62	11,17

9.4 EFICIENCIA DE USO DEL N DEL FERTILIZANTE ESTIMADA CON LOS ÁRBOLES ALEDAÑOS DE LA MISMA FILA (IPAN)

Sitio	Árbol N°	Posición Vertical	Posición Horizontal	% Nddf	% Nddf promedio	gNddf /árbol
6	0 (¹⁵ N)	Arriba		17,76	13,42	7,80
6	0 (¹⁵ N)	Abajo		9,08		
6	1	Arriba	Derecha	14,64	17,83	10,36
6	1	Abajo	Derecha	21,02		
6	2	Arriba	Derecha	3,02	1,89	1,10
6	2	Abajo	Derecha	0,76		
6	3	Arriba	Derecha	0,06	0,06	0,03
6	3	Abajo	Derecha	0,05		
6	-1	Arriba	Izquierda	0,14	0,67	0,39
6	-1	Abajo	Izquierda	1,19		
6	-2	Arriba	Izquierda	0,09	0,09	0,05
6	-2	Abajo	Izquierda	0,08		
6	-3	Arriba	Izquierda	0,07	0,08	0,05
6	-3	Abajo	Izquierda	0,09		
Total (IPAN)						19,73
8	0 (¹⁵ N)	Arriba		11,50	8,97	6,85
8	0 (¹⁵ N)	Abajo		6,43		
8	1	Arriba	Derecha	13,22	13,06	2,42
8	1	Abajo	Derecha	12,90		
8	2	Arriba	Derecha	4,62	4,62	2,42
8	2	Abajo	Derecha	4,62		
8	3	Arriba	Derecha	0,18	0,18	0,10
8	3	Abajo	Derecha	0,18		
8	-1	Arriba	Izquierda	7,20	5,32	2,79
8	-1	Abajo	Izquierda	3,43		
8	-2	Arriba	Izquierda	1,56	1,72	0,90
8	-2	Abajo	Izquierda	1,89		
8	-3	Arriba	Izquierda	0,00	0,01	0,01
8	-3	Abajo	Izquierda	0,02		
Total (IPAN)						15,48

