



**UNIVERSIDAD DE CHILE**

**FACULTAD DE CIENCIAS FORESTALES**

**ESCUELA DE CIENCIAS FORESTALES**

**DEPARTAMENTO DE SILVICULTURA**

**EFFECTO DE LA FERTILIZACIÓN SOBRE PLANTACIONES DE *Eucalyptus globulus* (Labill.) Y *Eucalyptus nitens* (Maiden) DE SIETE AÑOS DE EDAD EN LA COMUNA DE MÁFIL, PROVINCIA DE VALDIVIA**

Memoria para optar al Título  
Profesional de Ingeniero Forestal

Edmundo Rodrigo Pozo Peñaloza

Calificaciones:

Prof. Guía Sr. Antonio Vita A. (calificó con un 7.0)  
Prof. Consejero Sr. Manuel Toral (calificó con 6.0)  
Prof. Consejero Sr. Manuel Ibarra (calificó con un 6.0)

**SANTIAGO - CHILE - 2005**

*A mi madre, ejemplo de entrega y tenacidad....*

*A mi padre, por su apoyo incondicional...*

*A mis hermanos, por su importante apoyo...*

*A mis amigos, por compartir los momentos*

*que me ha tocado vivir...*

## **AGRADECIMIENTOS**

El presente estudio no se hubiese podido realizar sin el apoyo y desinteresada colaboración de muchas personas, dentro de las cuales se encuentra mi familia, amigos y profesionales que se vincularon directa e indirectamente en este trabajo. Quisiera expresarles a todos mis profundos agradecimientos.

En particular, quisiera mencionar al Sr. Ing. For. (PhD) Jorge Toro, gestor del proyecto y constante colaborador, Sr. Ing. For. Antonio Vita, profesor guía a quien debo agradecer su dedicación y compromiso con este trabajo. A los Señores Ingenieros Forestales Manuel Ibarra y Manuel Toral, profesores consejeros a quienes agradezco su valiosa intervención en el desarrollo de este documento.

Al Sr. Ing. For. Osvaldo Cirano, gerente de Forestal Valdivia S.A. y al Sr. Ing. For. Victor Cubillos, subgerente de Patrimonio de Forestal Valdivia S.A. por su ayuda prestada. Al Sr. Ing. For. Claudio Caro, por su amistad y apoyo en la instalación de los ensayos. Al Sr. Ing. For. Carlos González de Bioforest S. A. por su valiosa participación y orientación constante.

A mis compañeros de promoción y amigos los que en algún momento ayudaron desinteresadamente en el proyecto Sr. Julián Arbea, Sr. Carlos González, Sr. Paulo Moreno.

A mis compañeros y amigos Sr. Martín Escobar, Srta. María Vucasovic, Srta. Josefina Leiva, Sr. Roberto Thomson, Sr. Andrés Barrios, Sr. Cristián Uribe y Sr. Jorge Castillo entre otros, por su incondicional apoyo y amistad.

## ÍNDICE

1.- INTRODUCCIÓN.....	1
2.- REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA.....	2
2.1.- Antecedentes generales.....	2
2.2.- Nutrición.....	3
2.2.1- Manejo intensivo en plantaciones de <i>Eucalyptus sp.</i> .....	3
2.2.2- Potencial nutritivo del suelo.....	5
2.2.3- Hojarasca.....	6
2.2.3.1- Principales elementos aportados por la hojarasca.....	7
2.2.3.2- Cambios en la fertilidad del suelo.....	7
2.3.-Disponibilidad de agua.....	8
2.4.-Fertilización.....	9
2.4.1.- Fertilización forestal en plantaciones del género <i>Eucalyptus</i> .....	10
2.4.1.1.- Experiencias realizadas en distintas partes del mundo.....	10
2.4.1.2.- Algunas experiencias realizadas en Chile.....	12
2.4.2.- Tipos de fertilizantes usados y respuestas obtenidas.....	14
2.4.3.- Oportunidades para fertilizar una plantación forestal.....	16
2.4.4.- Posibles causas de respuesta insuficiente.....	19
2.5.- Variables dasométricas.....	20
2.6.- Evaluación del estado nutricional.....	22
2.6.1.- Análisis Foliar.....	22
2.6.1.1.- Niveles foliares de nutrientes en especies del género <i>Eucalyptus</i> .....	23
2.6.1.2.- Relaciones entre nutrientes.....	27
2.6.1.3.- Porcentaje de desviación respecto al óptimo.....	27
2.6.1.4.- Análisis vectorial.....	27
2.7.- Parámetros indicadores de productividad.....	31
2.7.1.- Relaciones alométricas.....	33
3.- OBJETIVOS.....	34
3.1.- Objetivo General.....	34
3.2.- Objetivos Específicos.....	34
4.- MATERIAL Y MÉTODO.....	35
4.1.- Material.....	35
4.1.1.- Ubicación del ensayo.....	35
4.1.2.- Características de la plantación.....	35
4.1.3.- Características edáficas y climáticas.....	36
4.1.4.- Fertilizantes.....	36
4.2.- Método.....	37
4.2.1.- Diseño experimental.....	37
4.2.2.- Tratamientos.....	37
4.2.3.- Instalación del ensayo.....	38
4.2.4.- Aplicación de fertilizantes.....	39
4.2.5.-Mediciones y análisis foliares.....	39
4.2.6.- Análisis estadístico.....	41
5.-RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	43
5.1.- Variables Dasométricas.....	43
5.1.1.- Variable DAP.....	43
5.1.2.- Variable Altura.....	46
5.1.3.- Área basal.....	49
5.1.4.- Volumen del fuste.....	50
5.2.- Resultados a nivel foliar.....	51

5.2.1.- Concentración de nutrientes a nivel foliar.....	51
5.2.2.- Relaciones entre nutrientes.....	56
5.2.2.1.- Relación N/P.....	56
5.2.2.2.- Relación N/K.....	58
5.2.2.3.- Relación K/P.....	59
5.2.2.4.- Relación Ca/Mg.....	60
5.2.3.- Porcentaje de desviación respecto al óptimo.....	62
5.3.- Análisis vectorial del follaje.....	70
5.4.- Peso Foliar Específico.....	79
6.- CONCLUSIONES.....	80
7.-RECOMENDACIONES.....	81
8.- BIBLIOGRAFÍA.....	83
APÉNDICES.....	91

## **EFECTO DE LA FERTILIZACIÓN SOBRE PLANTACIONES DE *Eucalyptus globulus* (Labill.) Y *Eucalyptus nitens* (Maiden) DE SIETE AÑOS DE EDAD EN LA COMUNA DE MÁFIL, PROVINCIA DE VALDIVIA.**

### **RESUMEN**

La fertilización precosecha es una técnica que está probando ser muy útil en productividad de sitios. Experiencias en el extranjero y en Chile indican que al fertilizar pocos años antes de la cosecha, se logran importantes incrementos en volumen. En el presente estudio, se lleva a cabo una fertilización precosecha con el objetivo de evaluar su efecto sobre plantaciones de *Eucalyptus globulus* y *Eucalyptus nitens*, establecidas en la temporada 1993 en el predio Pampa Gorda, ubicado en la Comuna de Máfil, Provincia de Valdivia.

La fertilización se realizó al voleo con dos formulaciones distintas, que definieron las dosis de fertilizantes: 300 kg/ha de fósforo, 200 kg/ha de nitrógeno y 200 kg/ha de calcio en una primera dosis (180, 120 y 120 g por planta respectivamente); y 400 kg/ha de fósforo, 300 kg/ha de nitrógeno y 300 kg/ha de calcio en una segunda dosis (240, 180 y 180 g por planta respectivamente), dejando parcelas sin aplicación como testigo. Para determinar estas dosis de fertilización se consideraron experiencias similares provenientes de Australia, Brasil y Sudáfrica.

Se analizaron las diferencias entre los tratamientos en cuanto a los incrementos en las variables dasométricas (DAP, altura, área basal y volumen del fuste) y se efectuó una evaluación del estado nutritivo de los árboles en base a la concentración de nutrientes en el follaje y peso seco de las hojas, utilizando cuatro procedimientos distintos.

Los resultados obtenidos a la edad de nueve años, indican que no existen diferencias significativas entre los incrementos en las variables dasométricas (DAP, altura, área basal y volumen del fuste) de las distintas dosis de fertilizantes aplicadas, presumiblemente por el buen nivel nutritivo del suelo. Sin embargo, se pueden observar diferencias entre los tratamientos a nivel foliar en *E. nitens*, debido a respuestas positivas a la fertilización, que eventualmente podrían manifestarse en incrementos significativos de las variables dasométricas. En *E. globulus* no se presentaron respuestas positivas a la fertilización. Además, se determinó que *E. nitens* tuvo incrementos mayores que *E. globulus*, tanto en diámetro como en altura. Esta diferencia entre especies se debería principalmente a un factor genético, debido que *E. nitens* resiste bien las fuertes heladas de la zona, no así *E. globulus*.

**PALABRAS CLAVES:** *Eucalyptus globulus*, *Eucalyptus nitens*, fertilización precosecha, productividad de sitios.

**EFFECT OF THE FERTILIZATION ON PLANTATIONS OF *Eucalyptus globulus* (Labill.) AND *Eucalyptus nitens* (Maiden) OF SEVEN YEARS OF AGE IN THE COMMUNE OF MÁFIL, PROVINCE OF VALDIVIA.**

**SUMMARY**

The preharvest fertilization is a technique that is testing to be very useful in productivity of places. Experiences abroad and in Chile indicate that when fertilizing few years before the harvest, important increases in volume are obtained. In the present study, a preharvest fertilization is carried out with the objective to evaluate its effect on plantations of *Eucalyptus globulus* and *Eucalyptus nitens*, established in the season 1993 in the ground Pampa Gorda, located in the Common of Máfil, Province of Valdivia.

The fertilization was carried broadcast with two different formulations, that they defined the dose of fertilizers: 300 kg/ha of phosphorus, 200 kg/ha of nitrogen and 200 kg/ha of calcium in a first dose (180, 120 and 120 g by plant respectively); and 400 kg/ha of phosphorus, 300 kg/ha of nitrogen and 300 kg/ha of calcium in a second dose (240, 180 and 180 by plant respectively) leaving plots without application as witness. To determine these dose of fertilization similar experiences were considered originating from Australia, Brazil and south Africa.

The differences among the treatments as for the increases in the dasometrics variables were analyzed (DAP, height, area basal and stem volume) and an evaluation of the nutritious state of the trees in base to the concentration was performed of nutrientes in the foliage and dry weight of the leaves, utilizing four different procedures.

The results obtained to the age of nine years, indicate that they do not exist it you differentiate significant among the increases in the dasometrics variables (DAP, height, area basal and stem volume) of the different dose of fertilizers applied, likely by the good nutritious level of the soil. Nevertheless, differences among the processing to level can be observed foliar in *E. nitens*, due to positive answers to the fertilization, that eventually they would be able to be declared in significant increments of the dasometrics variable. In *E. globulus* themselves not positive answers to the fertilization were presented. Besides, it was determined that *E. nitens* had greater increments that *E. globulus*, so much in diameter as in height. This difference among species himself due mainly to a genetic factor, owed that *E. nitens* resists well the strong frosts of the zone, not thus *E. globulus*.

**KEYWORDS:** *Eucalyptus globulus*, *Eucalyptus nitens*, fertilization preharvests, productivity of sites.



## 1.- INTRODUCCIÓN

Las plantaciones forestales de rápido crecimiento, tanto en Chile como en el extranjero, han experimentado la incorporación de nuevas tecnologías y el mejoramiento de técnicas que permiten la aplicación de una silvicultura cada vez más intensiva, con el fin de obtener una mayor productividad. Este cambio también lo experimentan los procesos de post-cosecha, permitiendo a las empresas mejorar la competitividad y disminuir los riesgos en los fluctuantes mercados internacionales.

A pesar de que el género *Eucalyptus* presenta especies de rápido crecimiento, de alta productividad, que crecen bien en variadas condiciones edafoclimáticas, y que las maderas que otorga tienen mercado, las investigaciones relativas a la tecnología de sus maderas y en especial a la silvicultura del género, han sido escasas. Es por ello que INFOR - CORFO desarrolló desde 1984 un proyecto denominado "Manejo silvícola de especies del Género *Eucalyptus*", a fin de obtener antecedentes básicos que permiten mejorar la producción y productividad de este género en el país (Toral, 1988). Consecuentemente con lo anterior, las empresas forestales han establecido paulatinamente nuevas plantaciones de *Eucalyptus sp.*, incorporando técnicas silvícolas para su manejo. Una de las actividades más recurrentes es la fertilización y se ha combinado gradualmente con otras tales como la preparación de suelo y el control de malezas. Esto plantea el desarrollo del manejo nutricional de las plantaciones en Chile.

Una técnica que está probando ser muy útil en productividad de sitios es la fertilización precosecha. Experiencias en el extranjero y en Chile indican que al fertilizar pocos años antes de la cosecha, se logran importantes incrementos en volumen. En el presente estudio, se lleva a cabo una fertilización precosecha en plantaciones de *E. globulus* y *E. nitens*, y pretende aportar una experiencia más en esta línea de investigación. Los resultados serán útiles en el momento de seleccionar opciones de manejo para el género *Eucalyptus sp.*, los cuales deberán ser comparados con trabajos posteriores dentro de la misma línea de investigación.

## 2.- REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

### 2.1.- Antecedentes generales

El establecimiento y manejo de plantaciones forestales comerciales, requiere información básica para identificar los sitios más aptos y lograr los objetivos de producción propuestos. Pero la evaluación del sitio para el establecimiento de plantaciones forestales no sólo es útil para estimar la producción, sino que además permite la elección de métodos de manejo adecuados al ritmo de crecimiento del bosque. Por otra parte, permite identificar los factores componentes (clima, suelo y biológicos) que limitan la productividad y así decidir los métodos de mejoramiento genético o del suelo para crear bosques más estables y/o para optimizar la calidad del sitio (Bonelli y Schlatter, 1995).

En Chile, la incorporación de extensas superficies de tierra a los programas de forestación ha demostrado que existe una serie de factores ambientales que inciden en forma determinante en los índices de supervivencia de las plantaciones y en su desarrollo posterior, influenciando en la productividad forestal ya sea en volumen total o en calidad. A nivel local, el suelo es el factor ambiental de variación más importante (Bonelli y Schlatter, 1995).

Las especies del género *Eucalyptus* ofrecen la oportunidad de diversificar las plantaciones con ganancias y/o reducciones de la rotación, en aquellos sitios en que *P. radiata* prospera bien (Prado y Barros, 1989).

Las primeras plantaciones comerciales de varias especies de *Eucalyptus* fueron establecidas en Chile en el año 1885, siendo *E. globulus* la especie considerada como la más importante. A partir de 1990 aumentaron considerablemente las plantaciones de otras especies, entre las cuales destacan *E. nitens*, *E. delegatensis*, *E. viminalis* y *E. smithii*, las que se establecieron en sitios no aptos para el crecimiento de *E. globulus*. El aumento de las plantaciones de *Eucalyptus* se vió acompañado del desarrollo de la industria de la pulpa y papel y de la apertura del mercado local y mundial de madera para astillas. En zonas semi-áridas, donde la disponibilidad de humedad limita el crecimiento, *E. camaldulensis*, *E. cladocalyx* y *E. sideroxylon* son utilizados favorablemente como fuente de energía y madera de construcción en actividades agrícolas (Prado y Toro, 1996).

*Eucalyptus globulus* Labill es una de las principales especies forestales productoras. En la actualidad, en varias partes del mundo, se buscan procedencias y especies de *Eucalyptus* de alto rendimiento, buenas características para la producción de pasta de papel y capacidad para desarrollarse en sectores donde *E. globulus* encuentra limitaciones por frío (Kuzminsky *et al.*, 1989; Sheppard y Cannell, 1987; Español *et al.*, 2000).

*E. nitens* normalmente producirá más volumen por hectárea que *E. globulus*, pero *E. globulus* se ha plantado en suelos de mejor calidad debido al precio de mercado más alto de la madera y de la pulpa, que además es de mejor calidad. Sin embargo, las bajas temperaturas dañan a *E. globulus*, por consiguiente *E. nitens* se planta en sitios donde las heladas no permiten el óptimo crecimiento de *E. globulus*. La misma situación se vive en Tasmania y Sudáfrica, donde *E. nitens* se ha establecido en áreas en que la altura produce una condición de heladas recurrentes (Sierra *et al.*, 2001).

*Eucalyptus nitens* (Dean *et* Maiden) Maiden, es la especie de mayor expansión en cuanto a superficie plantada en el sur de Chile (Gerding *et al.*, 2001). La mayor parte de las plantaciones se encuentran en las primeras fases de crecimiento, lo que acentúa la oportunidad de un estudio que permita cuantificar las demandas nutricionales para este período (Gerding *et al.*, 2001).

## **2.2- Nutrición**

El manejo nutricional se inicia con un extremo cuidado del suelo, el cual aporta fundamentalmente un volumen arraigable, y se constituye en un reservorio de agua y nutrientes (Toro, 1995).

En una población forestal, el manejo nutricional requiere de la cuantificación de varios flujos de nutrientes en el ecosistema. En las plantaciones establecidas, la cantidad de nutrientes existentes en el suelo y la exportada durante la explotación forestal son de gran importancia en la definición del balance de nutrientes y en la eventual necesidad de aplicación de fertilizantes (Melo *et al.*, 1995c).

La evaluación en espacio y tiempo, de las formas y fracciones de los nutrientes del suelo permite cuantificar la reserva de nutrientes que pueden ser utilizados en el crecimiento vegetal (Melo *et al.*, 1995b). La reserva mineral del suelo se divide, en función del tiempo, en reserva de corto, mediano y largo plazo, tomándose como base la facilidad relativa de los minerales de liberar los nutrientes para la solución del suelo (Melo *et al.*, 1995a).

El manejo nutricional de plantaciones no finaliza en la etapa de establecimiento, sino que continúa a lo largo de la rotación a través de una juiciosa aplicación de esquemas de manejo, que incluye diversas combinaciones de raleos, podas, controles de malezas, manejo de los residuos y fertilización. Este manejo debería finalizar con una adecuada planificación de la cosecha, para evitar un deterioro irreversible del recurso, el cual es esencial para mantener en el largo plazo la productividad de las plantaciones (Toro, 1995).

### **2.2.1- Manejo Intensivo en plantaciones de *Eucalyptus***

La intensiva preparación del suelo influye directamente en la mayor productividad de las plantaciones (Pereira *et al.*, 1996), así como también otras técnicas de tratamiento silvicultural, dentro de las cuales destaca la fertilización. Una combinación entre preparación del suelo, control de malezas y adición de fertilizantes han dado como resultado incrementos en el crecimiento inicial y supervivencia en plantas de *E. delegatensis* y *E. globulus* (Lyon, 1990). La preparación del suelo actúa sinérgicamente con la fertilización. Una apropiada preparación de suelo requiere conocer previamente las limitaciones existentes en un sitio determinado (Toro, 1995).

Las mayores demandas nutricionales ocurren en la primera fase de crecimiento, desde la plantación hasta el cierre de copas, donde predomina la formación de tejidos

productores de clorofila (Aparicio *et al.*, 2001). Sin embargo, de acuerdo a lo señalado por Toro (1995), el manejo nutricional debe continuar durante toda la rotación. En este contexto, las bases de la silvicultura exigen la integración de materiales mejorados con técnicas de establecimiento, manejo (podas y raleos), cosecha y uso de residuos, que permitan conservar o mejorar las condiciones físicas y químicas del suelo (Aparicio *et al.*, 2001).

Por otra parte, la presencia de síntomas nutricionales en plantaciones forestales hace necesaria la intensificación de la fertilización fundada en una base experimental sólida que permita un análisis con resultados ciertos y una proyección en el tiempo (Aparicio *et al.*, 2001).

La alta tasa de crecimiento y las cortas rotaciones de la mayoría de las plantaciones de *Eucalyptus* comerciales son el resultado de una captación muy alta de nutrientes del suelo. De hecho, el uso de nutrientes de una plantación de *Eucalyptus* manejada intensivamente, puede ser comparable a la de una cosecha agrícola (Lima, 1993). Sin embargo, las cosechas agrícolas normalmente requieren más nutrientes que las plantaciones de *Eucalyptus* con silvicultura intensiva de rotaciones cortas (Lima, 1993). A medida que los árboles maduran, el uso de nutrientes y agua aumenta, por lo cual la competencia puede limitar el crecimiento (Judd *et al.*, 1996; Binkley *et al.*, 2002). Si uno o más recursos son escasos, el crecimiento puede ser afectado, lo que podría llevar a una relación no concordante entre las concentraciones de nutrientes del follaje y crecimiento (Judd *et al.*, 1996).

Los suelos “más fértiles”, se esperan que sean aquellos con mayor disponibilidad de nitrógeno y fósforo. Algunos autores señalan que la disponibilidad de estos nutrientes bajo el bosque está en función de la tasa de productividad, las tasas de reciclaje de la materia orgánica y descomposición, la tasa de mineralización y que no es posible separar los determinantes suelo, clima y especie de estas tasas (Judd *et al.*, 1996). Además, las concentraciones de nutrientes en el follaje estarían positivamente correlacionadas con la fertilidad del suelo (Judd *et al.*, 1996).

En comparación con los suelos agrícolas, los suelos forestales generalmente presentan deficiencias extremas en fósforo (Mc Laughlin, 1996). El grado de ortofosfato y fósforo en la solución del suelo, requeridos por algunos eucaliptos aún no se han determinado, debido a que se han desarrollado en un ambiente de bajo fósforo disponible, pero éstos cuentan con mecanismos eficientes para la adquisición y utilización del nutriente (Smethurst y Wang, 1998). Lo anterior es confirmado por Pereira *et al.*, (1996) quienes afirman que *E. globulus* crece bien en suelos pobres en fósforo, donde la vegetación nativa se mantiene con bajas tasas de productividad. Además del fósforo, existen evidencias en plantaciones de *Eucalyptus sp.* y *Pinus radiata* que indican limitaciones nutritivas de boro, en contraste con los bosques naturales de *Eucalyptus* de Australia (Judd *et al.*, 1996). Pereira *et al.*, (1996) coinciden en esta afirmación, basándose en registros de plantaciones de la Península Ibérica que indican al boro, como uno de los micronutrientes con las mayores deficiencias. Esto se explica por el manejo intensivo que se le da a las plantaciones, las cuales presentan en general una mayor cantidad de nutrientes en el follaje comparada con los bosques naturales (Judd *et al.*, 1996).

El empleo del fuego como medida de manejar los residuos dejados por la cosecha de los rodales anteriores, o para la habilitación de nuevos terrenos, debe ser muy juicioso, debido a que la base bioquímica del suelo puede sufrir un daño irreversible, pueden acelerarse los procesos erosivos que eliminan inicialmente el material coloidal del suelo y luego reducen su volumen útil a niveles críticos (Toro, 1995).

### **2.2.2- Potencial nutritivo del suelo**

Las características físicas del suelo, como la textura, densidad y la profundidad son muy importantes en el éxito del desarrollo de los cultivos, incluyendo los forestales. Las características químicas y microbiológicas determinan el estado nutricional del terreno, donde los árboles han de encontrar una parte importante de los elementos minerales que necesitan. Aunque las condiciones químicas tienen una importancia inferior a las físicas, debido a que una diferencia de macro o micronutrientes puede corregirse con fertilización.

La materia orgánica influye positivamente en la textura del suelo haciéndolo en la práctica suelto y poroso. Dentro de los macroelementos, la materia orgánica contiene importantes cantidades de nitrógeno, el cual necesita mineralizarse para ser liberado, debiéndose fundamentalmente a un proceso biológico, llevado a cabo por bacterias. Las especies forestales dependen, para su nutrición, de los nitratos y los compuestos amoniacales. Se estima que las masas forestales absorben por hectárea, anualmente, de 30-55 kg de nitrógeno, retornando al suelo el 80% de esta cantidad por la caída de las hojas, quedando el 20% restante en la madera (Lugo, 1986).

El pH del suelo influye en la disponibilidad de la mayor parte de los nutrientes, en las propiedades físicas y en la vida microbiana. *Eucalyptus globulus* tolera suelos muy ácidos, con relaciones C/N elevadas (mineralización lenta) y niveles de nutrientes muy bajos (Lugo, 1986).

El fósforo (P) del suelo puede clasificarse en dos grupos: orgánico e inorgánico. El pH influye en la disponibilidad del P inorgánico, disminuyendo en suelos ácidos. Actúa marcadamente en la reproducción y crecimiento vegetal, así como en el desarrollo de las raíces y buena formación de los frutos. Los árboles absorben de 4-12 kg/ha por año de fósforo, retornando el 80% con la caída de las hojas (Lugo, 1986).

El potasio (K) se encuentra en minerales (feldespatos, mica e illita), disuelto en agua y en estado cambiante y no cambiante. El K disuelto en agua y el cambiante son los que mejor se asimilan, y el no cambiante actúa como reserva. El papel de este elemento en la fisiología de las plantas es importante y está relacionado con la síntesis de glúcidos y prótidos y con la resistencia que presentan las distintas especies vegetales a las heladas y a las enfermedades. Los árboles pueden absorber entre 6 y 30 kg/ha por año de potasio, retornando un 50% con las hojas caídas (Lugo, 1986).

La reserva de calcio (Ca) en los suelos ácidos de las zonas húmedas se encuentra en forma de silicatos. Facilita la absorción de otros nutrientes (P, Mo), neutraliza el aluminio y el manganeso, y activa la vida microbiana, al modificar el pH. En España (Galicia), se ha constatado que las especies forestales pueden absorber entre 30 y 100 kg/ha por año de calcio, reincorporándose a través de la caída de las hojas en un 75% (Lugo, 1986).

El magnesio (Mg) desempeña un papel importante en la fisiología de la planta: por su presencia en la clorofila; interviene en el metabolismo del fósforo y en la síntesis de glúcidos, prótidos y grasas. Este elemento se encuentra en el suelo formando parte de silicatos y carbonatos (Lugo, 1986).

Dentro del grupo de los micronutrientes, se consideran al manganeso, hierro, boro, zinc, molibdeno, cloro y sodio. Una importancia especial tiene el manganeso que está implicado en los procesos de respiración y actúa como catalizador en la síntesis de clorofila. Teóricamente no presenta problemas de asimilación en suelos con pH entre 5 y 6 (Lugo, 1986).

### **2.2.3- Hojarasca**

La hojarasca ("litter") es una importante fuente de nutrientes minerales para los árboles, principalmente en suelos muy pobres químicamente. Los elementos nutritivos liberados por la descomposición de la hojarasca son importantes aportes complementarios a los requerimientos nutricionales. El reciclaje de los nutrientes depende de la calidad y cantidad de material vegetal depositado y de la velocidad de su descomposición. La velocidad de los procesos de descomposición depende del tipo de biomasa (hojas, ramas, etc.), la temperatura, precipitaciones, composición química de la hojarasca y microorganismos (Ferreira *et al.*, 1995).

Bajo bosques de *Eucalyptus sp.*, la mayor parte de las preocupaciones relacionadas con el "litter" trata de los efectos del vaciamiento de nutrientes y alelopatías causadas por las hojas que se dice que ejerce un efecto antibiótico en microorganismos. Esta preocupación fue verificada por investigaciones que mostraron una concentración muy baja de bacterias nitrificantes en plantaciones de *Eucalyptus sp.* (Lima, 1993). Sin embargo, muchos de los problemas del "litter" pueden ser aliviados alternando la rotación o mezclando especies y clones para promover descomposición. Una revisión de la extensa literatura demuestra que las plantaciones de *Eucalyptus* mejoraron la fertilidad del suelo en el largo plazo en varias localidades del mundo (Lima, 1993). Por ejemplo en Minas Gerais (Brasil) plantaciones adultas de 25 años de *E. citriodora* y *E. paniculata*, permitieron afirmar que los suelos de los bosques de *Eucalyptus* contienen 27 toneladas de "litter" por hectárea, comparada con sólo 12 toneladas producida por el bosque nativo, y una mayor cantidad de microorganismos y nutrientes (Lima, 1993).

#### **2.2.3.1- Principales elementos aportados por la hojarasca**

Laclau *et al.*, (2001), señalan que el flujo de nutrientes en el suelo de una plantación de *Eucalyptus* es muy dinámica, la cantidad de nutrientes aportados por la hojarasca es importante, lo cual indica un ciclo biológico alto en este ecosistema, pero también la cantidad de nutrientes absorbida por la plantación es muy alta. Entre los elementos que aporta la hojarasca se pueden mencionar el fósforo, calcio, magnesio, nitrógeno y potasio.

A pesar de que la concentración foliar de N y P en las hojas que caen al suelo es baja, debido a la eficiente redistribución de estos nutrientes, tanto para *E. globulus*, como para *E. nitens*, la importante masa de hojas que se acumulan en el suelo generan un apreciable aporte de nutrientes (Bonomelli *et al.*, 2002). Además, los rodales fertilizados aumentan la producción de biomasa foliar, produciendo mayor cantidad de hojarasca. Similares resultados obtuvieron Moroni y Smethurst (2003), quienes encontraron una mayor producción de hojarasca en ensayos fertilizados de *E. nitens* en comparación con los no fertilizados. Este estudio realizado en Tasmania, corroboró que el aporte de nutrientes es mayor en las hojas del "litter", comparada con el de las ramillas y corteza, siendo mayor la caída de hojas entre febrero y marzo, momento en el que la concentración de N y P en las hojas del "litter" es más baja y el flujo de estos nutrientes es más alto. Entre julio y septiembre, los flujos de nutrientes en el "litter" se reducen al máximo y en los meses primaverales, se encontró el punto más bajo de aporte de hojas al suelo. La mayor concentración de N y P en el "litter" durante los meses más fríos ha sido comprobada por distintos estudios (Moroni y Smethurst, 2003).

Las tasas de acumulación de hojarasca en general están positivamente correlacionadas con productividad del bosque (Moroni and Smethurst, 2003).

La tasa de producción de hojarasca, durante el período de máxima producción, probablemente ayude a diagnosticar la tasa de crecimiento de las plantaciones de *Eucalyptus*. Además, el entendimiento de los ciclos de N y P en la hojarasca, podrían ser útilmente utilizados para guiar el manejo de fertilizaciones en plantaciones de *Eucalyptus* (Moroni and Smethurst, 2003).

Ferreira *et al.*, (1995), verificaron que la descomposición de la hojarasca, es por lo menos tres veces más rápida en fertilizaciones con aplicación de cenizas y residuos de fabricación de pulpa, comparado con la aplicación solo de fertilizantes, la liberación de N, P, K, Ca y Mg en los primeros es de por lo menos tres veces mayor que en el segundo. Estos resultados pueden explicar en parte el aumento de la productividad de madera obtenida, al añadir aquellos componentes.

### **2.2.3.2- Cambios en la fertilidad del suelo**

Se ha constatado que las plantaciones forestales van produciendo cambios al suelo en cuanto a algunas de sus características. El pH y la disponibilidad de nutrientes varían con los años, debido del reciclaje de nutrientes producido por el aporte de la hojarasca. En el caso de las plantaciones de *Eucalyptus* se ha constatado el aumento del pH y contenido de nitrógeno, potasio extraíble, calcio y magnesio después de 6 años de realizada la plantación. Las experiencias indican que la disponibilidad de fósforo extraíble

sufre ciertas variaciones, que no permiten llegar a una conclusión acertada (Cheng and Horng, 1994).

La realización de raleos, incrementa las demandas nutritivas. Por otro lado, el fuste (madera + corteza) aumenta en forma continua su proporción en la composición de la biomasa. En este sentido, se incrementa la demanda de bioelementos, en particular de los elementos que más disminuyen en sus reservas del suelo, lo cual señala la necesidad de un monitoreo de la evolución en el ciclo biogeoquímico (Aparicio *et al.*, 2001).

### **2.3- Disponibilidad de agua**

La capacidad del suelo en retener agua está directamente relacionada con la cantidad de microporos existentes, los cuales, a su vez, son dependientes de las fracciones coloidales del suelo (Bellote *et al.*, 1995). Los tratamientos físicos son una alternativa para mejorar los regímenes de agua y aire y favorecer así el desarrollo radicular (Bonelli y Schlatter, 1995).

Las lluvias pueden ser un factor muy importante y afectan directamente el comportamiento de las plantaciones de *Eucalyptus*. Con el aumento de oferta de agua, aumenta el crecimiento y disminuye la evaporación. (Harper *et al.*, 1999). En concordancia con esto, Stape *et al.*, (2002b), estudiando la utilización de los recursos agua, luz y nitrógeno sobre una amplia zona de plantaciones de *Eucalyptus* del noreste de Brasil, confirman que el aumento del recurso agua, incrementa las tasas de crecimiento e indirectamente aumenta el uso de la luz y el nitrógeno, como consecuencia de un incremento del IAF (Índice de Área Foliar) y la eficiencia en la absorción de nitrógeno. Oliva *et al.*, (1995) señala que una fertilización con P y Ca en una plantación juvenil de *E. camaldulensis* produjo notorios aumentos en área foliar y producción de materia seca, pero estos efectos se anulan con estrés hídrico.

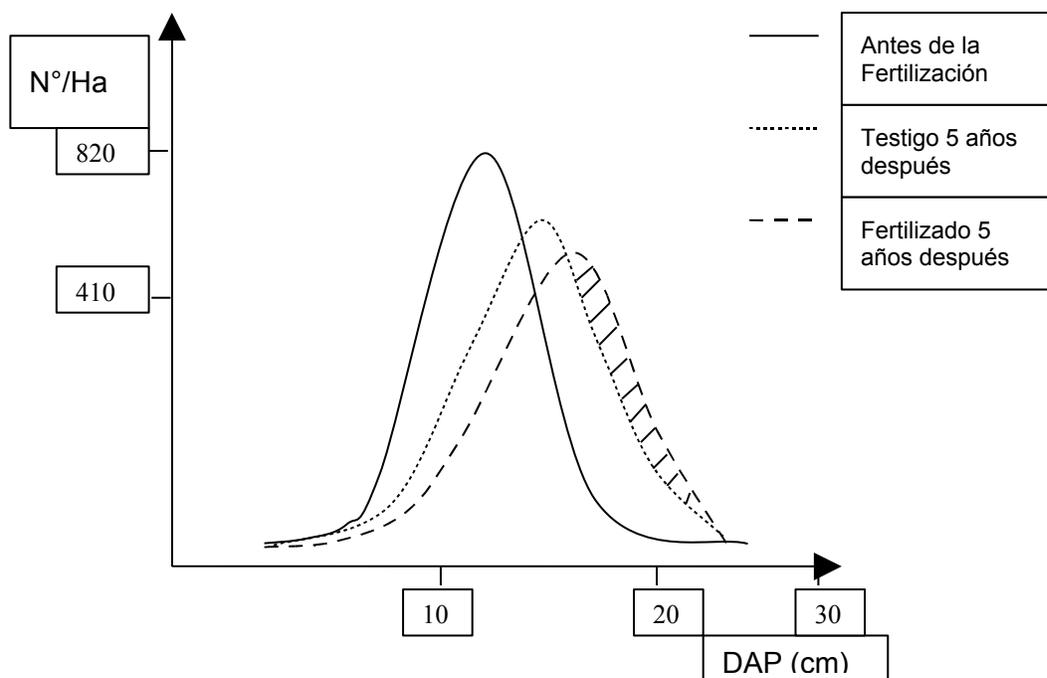
Las concentraciones de nutrientes obtenidas en el agua de lluvia bajo una plantación forestal, suelen ser más altas que las concentraciones nutritivas del agua de lluvia en una zona abierta (Andrade *et al.*, 1995). Esto se debe a un lavado de los elementos depositados en seco y/o una lixiviación de los nutrientes de la copa, resultando en transferencias para el suelo, las cuales varían en función de la localización geográfica, estación del año y de la cantidad de partículas existentes en el aire (Andrade *et al.*, 1995). Diversos autores han sugerido que una parte del nitrógeno presente en el agua de lluvia es absorbida por las partes aéreas de los árboles (Andrade *et al.*, 1995), como lo confirmaron otros autores en árboles de *Picea abies*, bajo condiciones controladas. Los otros nutrientes (P, K, Ca y Mg) generalmente sufren lixiviación y/o arrastre hacia el suelo (Andrade *et al.*, 1995), aumentando la oferta de estos nutrientes al suelo bajo una plantación forestal comparada con el suelo en área abierta.

### **2.4.-Fertilización**

La fertilización es la técnica más eficiente para acelerar el crecimiento y aumentar la supervivencia, tanto de la planta en vivero como de las masas de *Eucalyptus* una vez establecidas en el campo (Ruiz *et al.*, 2001). En términos operacionales, pueden distinguirse tres tipos de fertilización cuando ésta se realiza sobre masas de *Eucalyptus* ya establecidas: a) Fertilización inicial o de arranque; b) Fertilización de mantenimiento o a mediana edad; c) Fertilización de brotación o post-aprovechamiento. La aplicación de cualquiera de ellas exige el conocimiento de la demanda nutricional de la planta en cada momento, además de la capacidad del terreno para asegurar dicha nutrición en la cantidad y tiempo adecuados (Ruiz *et al.*, 2001).

La aplicación de fertilizantes tiene por objetivo entregar a las plantas el complemento nutricional necesario para que éstas se desarrollen apropiadamente y logren tasas de crecimiento que satisfagan los requerimientos de los propietarios de las plantaciones (Toro, 1995). Para ello, es preciso considerar las características físicas y químicas de los suelos, las dosis y época de aplicación de nutrientes, y las características de la especie, como también, el clima local que predomina en un sitio determinado. Esto permite emplear la combinación óptima de factores, de suelo, planta y clima (Toro, 1995). La respuesta a un fertilizante será mayor donde la presencia de otros factores de crecimiento sea beneficiosa para el cultivo, proposición conocida como “ley del óptimo” (Rubilar, 1998).

La fertilización en muchos casos ha permitido acelerar el crecimiento del rodal, disminuyendo el tiempo que tarda en alcanzar el límite de máximo tamaño, produciéndose además una reducción de las limitaciones del sitio (Binkley, 1993).



**Figura N° 1:** La fertilización de los rodales de pino de incienso (*Pinus taeda*) con nitrógeno aumenta el volumen de los rodales y cambia la distribución del diámetro de los árboles, acelerando el desarrollo del rodal (Binkley, 1993).

La fertilización precosecha se concreta con la aplicación de fertilizantes cinco o seis años antes de cosechar un bosque, lo cual ha entregado incrementos en volumen de hasta 30 m<sup>3</sup>/ha en plantaciones establecidas en la zona de Arauco (Toro, 1995; Mora, 1996). Además, Binkley (1993), señala que este tipo de fertilización puede ser muy provechosa por el aumento de la producción, la biomasa incrementada puede ubicarse en categorías productivas de primera calidad y el período de inversión (en la fertilización) es breve. Cualquier incremento que se de en el diámetro medio del rodal hace que aumente el valor de la madera en pie por unidad de madera. Dicho aumento en el valor se debe al incremento en el valor de los fustes seleccionados de gran diámetro y a la agrupación de un mayor número de fustes de menor tamaño en categorías productivas de mayor valor.

#### **2.4.1.- Fertilización forestal en plantaciones del género *Eucalyptus***

##### **2.4.1.1.- Experiencias realizadas en distintas partes del mundo**

La bibliografía ofrece gran cantidad de experiencias de fertilización realizadas en distintas partes del mundo.

En Sudáfrica, las primeras experiencias se realizaron sobre *E. grandis* con aplicaciones de 28 g de P por árbol, a los 4 y 9 meses, no hallándose respuestas positivas (Cornejo, 1982). Sin embargo, son numerosas las experiencias provenientes de Sudáfrica que indican efectos positivos a la fertilización con N y P (Cornejo, 1982).

En Australia, investigaciones hechas en ensayos de *Eucalyptus nitens* y *Eucalyptus delegatensis*, muestran incrementos en altura a la edad de 4 años con fertilización de N y P, y no observándose respuestas al tratamiento con fósforo sólo (Cornejo, 1982). Se han registrado respuestas satisfactorias en crecimiento, a la aplicación de N y P, para varias especies de *Eucalyptus* en plantaciones jóvenes en Victoria, Australia. En los suelos arenosos de Moroco, Australia, plantaciones jóvenes de *Eucalyptus sp.*, responden positivamente a la aplicación de N-P y K (Cornejo, 1982).

Ensayos de fertilización con 1400 kg/ha de N y 500 kg/ha de P en *E. grandis* establecidos en el sudeste de Queensland (Australia), de 3 años de edad indicaron un aumento en el crecimiento volumétrico, además de un fuerte cierre de copas. Otra característica a señalar es el aumento del índice de área foliar, comparada con las parcelas sin aplicación (Kriedemann y Cromer, 1996).

Experiencias realizadas en Tasmania, Australia, con aplicaciones de 100 g de fosfato diamónico por plántula en *E. nitens*, donde se aplicó una fertilización dirigida luego de la plantación, sobre suelos de baja disponibilidad de fósforo indican un alto desarrollo radicular luego de la aplicación, por lo cual aumenta el potencial de absorción de nitrógeno en los sitios fertilizados (Smethurst & Wang, 1998).

En Hawaii, los ensayos de fertilización indican que las respuestas son muy dependientes del tipo de suelo y el historial de fertilizaciones del sitio. La aplicación de N, P, K y Ca en árboles de *E. grandis* de un año de edad aumentó el crecimiento en diámetro y altura, pero este efecto se atribuyó solo al nitrógeno, ya que los otros tres elementos no

influyeron en la respuesta, debido a los buenos niveles de estos elementos en el suelo (Santo, 2000).

Numerosas experiencias provienen de la Península Ibérica. En España, fertilizaciones hechas con NPK (0, 75 y 150 kg/ha) sobre retoños de *E. globulus* muestran efectos positivos, pero estos efectos dependen del tipo de suelo (Ruiz *et al.*, 2001). En suelos arenosos se produjo un aumento en el crecimiento volumétrico bajo cierta cantidad de nitrógeno aplicado y en suelos metamórficos el mismo efecto se consigue con cierta cantidad de nitrógeno y otra de potasio, lo cual sugiere una respuesta muy dependiente de los niveles nutritivos de los sitios. También se produjo una falta de respuesta a la aplicación de fósforo, aún cuando en ambos suelos este elemento se presenta con baja disponibilidad, lo que podría llevar a pensar que este nutriente es limitante (Ruiz *et al.*, 2001). Sin embargo, ya se han registrado la eficiencia en el uso de este elemento en general por las especies del género *Eucalyptus* (Smethurst & Wang, 1998). Además se muestran diferencias cualitativas en los requerimientos nutricionales dependiendo de la edad (Ruiz *et al.*, 2001).

En Portugal, se han realizado numerosos ensayos de fertilización, en plantaciones jóvenes de *E. globulus* y sobre distintos tipos de suelo. Los resultados en general han sido mejores para una combinación NPK con adiciones de calcio. Fertilizaciones de NPK (1700:107:470 kg/ha) con adición de calcio (piedra caliza Dolomita, 1500 kg/ha) al establecimiento arrojaron los mayores incrementos en biomasa después de 16 meses (Pereira *et al.*, 1996). Una fertilización al voleo con NPK a los 5 meses del establecimiento (20:26:50 kg/ha) seguido por adiciones de nitrógeno de 20 kg/ha a los 2 y 4 años de edad, dieron como resultado incrementos en la tasa de crecimiento comparado con el control, disminuyendo también substancialmente la mortalidad (Pereira *et al.*, 1996).

Otro estudio llevado a cabo en la parte central de Portugal, en suelos de baja disponibilidad de fósforo con una fertilización de 23 kg/ha de N, 30 kg/ha de P y 19 kg/ha de K al momento de la plantación con adiciones de N de 23 y 41 kg/ha a los 1 y 4 años respectivamente dieron como resultado diferencias en altura entre el tratamiento control y los fertilizados, las cuales disminuyeron hacia los 4 años siendo las diferencias en diámetro, relativamente constantes lo que permitió incrementos en volumen a los 5 años de un 33%, comparado con las parcelas testigo (Pereira *et al.*, 1996).

Otras experiencias llevadas a cabo con 90 – 150 kg/ha de P, 61 – 175 kg/ha de N y de 0 – 150 kg/ha de K, con adiciones de N durante la rotación indican buenos resultados en cuanto a la productividad, baja de mortalidad y un efecto negativo para adiciones mayores de 400 kg/ha de N en la productividad sobre suelos de climas secos. El óptimo en nutrición se alcanzó para *E. globulus* mediante irrigación y aplicaciones de NPK con adición de calcio (395:153:342:2438 kg/ha) durante los tres primeros años, considerando que el promedio anual de precipitaciones en la zona es de 880 mm (Pereira *et al.*, 1996).

Una fertilización con fósforo y potasio aplicados en parcelas de más de 10 años de *E. globulus* no tuvo respuesta, pero sí la aplicación de NPK, concluyendo que el nitrógeno fue fuertemente influyente en el incremento de la productividad y sugiriendo de paso aplicaciones de 400 kg/ha de N para plantaciones de sobre 10 años (Pereira *et al.*, 1996).

En Brasil, una experiencia en fertilización realizada sobre una plantación de *E. saligna* con sulfato de amonio con 60 kg/ha de N, (Barros y Novais, 1996), registró respuestas en altura después de 18 meses de la aplicación. Sin embargo, después de 5 años de la plantación, no se hallaron diferencias. Similares respuestas se han observado en fertilizaciones al establecimiento en *E. grandis* (Barros y Novais, 1996). Estos mismos autores sugieren que la nula o corta respuesta a la aplicación de nitrógeno puede deberse a la lixiviación. Algunos autores han encontrado respuestas prolongadas (sobre 5 años) a la aplicación de nitrógeno en *E. saligna* al establecimiento, sobre suelos arcillosos, donde los mejores resultados se manifestaron con aplicaciones de N de entre 25 a 75 kg/ha. Se ha sugerido para otros sitios, fertilizaciones divididas en dos o tres partes, distribuidas en el primer año y la mitad de la plantación (Barros y Novais, 1996).

Un estudio que evaluó el efecto de las dosis de N (0, 33 y 66 kg/ha), P (0, 100 y 200 kg/ha), K (0, 33 y 66 kg/ha) y Ca (0 y 2 t/ha) en la producción de *E. grandis* plantado en suelos arenosos en Brasil no encontró incrementos en producción de madera con la aplicación de N y P. En cambio, con K se obtuvo un efecto cuadrático. El *E. grandis* también respondió a la aplicación de cal. Además se estudió el efecto del fraccionamiento de dosis de K en los cinco primeros años de la plantación, en un suelo rojizo oscuro. El mayor incremento en rendimiento se obtuvo con aplicaciones de K fraccionadas anualmente en los primeros cinco años (Arruda y Malavolta, 2001).

#### **2.4.1.2.- Algunas experiencias realizadas en Chile**

Se han aplicado numerosas fertilizaciones al momento de la plantación. Ya en la década de los años ochenta, la aplicación de fertilizantes en el establecimiento fue una actividad incorporada en la mayoría de las empresas forestales, debido a los efectos positivos en cuanto al aumento en el porcentaje de sobrevivencia y crecimiento (Lyon, 1990), actividad que se mantiene actualmente.

En ensayos de fertilización con plantas en vivero de *E. nitens*, *E. delegatensis* y *E. regnans*, se utilizaron 72 kg/ha de N, 47 kg/ha de P y 41,5 kg/ha de K, con la finalidad de evaluar la producción de materia seca y la concentración de nutrientes. Para esto, se han realizado comparaciones con los valores estándar obtenidos para las diferentes especies y concluyó que las dos primeras especies tienen un alto requerimiento nutricional, aparentemente por una alta absorción especialmente de fósforo (Prado y Toro, 1996).

Fertilizaciones realizadas sobre suelos volcánicos a plantaciones recién establecidas de *E. delegatensis*, muestran mejores respuestas con aplicaciones de 100 g de urea y 50 g de superfosfato concentrado por planta (Prado y Toro, 1996).

Molina (1982), estudió el efecto de la fertilización en un monte bajo de *Eucalyptus globulus* (Labill), con retoños de 2 años de edad. Con la aplicación de urea y superfosfato triple (50, 100 y 150 kg/ha), concluyendo que en diámetro existe una evidente respuesta a la fertilización con N y P. Sin embargo, las respuestas no fueron estadísticamente significativas. La altura respondió menos a la aplicación de los fertilizantes.

También se han aplicado fertilizantes para corregir deficiencias en plantaciones de *Eucalyptus*, aunque en Chile, esto no es usual. Se ha reportado que aplicaciones de urea (60 -150 g de N por planta), superfosfato concentrado (8,7 – 21,8 g de P por planta), sulfato de potasio (16,8 – 42 g de K por planta) boronatrocalcita (2 – 4 g de B por planta) han corregido exitosamente deficiencias nutricionales en plantaciones de *E. globulus* (Prado y Toro, 1996).

Un monitoreo de fertilidad en plantaciones de *E. nitens* y *E. globulus* establecidas en la Precordillera y Valle Central de la VIII R indicó que las dosis mínimas de nitrógeno y fósforo (25 g/planta) fueron las adecuadas al momento de la plantación en ambos sitios y que las aplicaciones posteriores (1 y 2 años) no tuvieron respuesta en el incremento de la biomasa (Puentes, 2001).

En la X Región, un monitoreo nutritivo en plantaciones de *E. nitens*, desde el establecimiento al cierre de copas (cuarto año), utilizó P de baja solubilidad (Bifox) y un encalado en el establecimiento. En posplantación, como fuente de nitrógeno durante el primer y segundo año se usó urea y al cuarto Supernitro, como fuente de P se utilizó superfosfato triple y de K sulfato de potasio. Los microelementos aplicados fueron zinc y cobre como sulfatos y boro como boronatrocalcita. Los resultados indicaron que el aumento de la biomasa produjo un efecto de dilución. En las hojas, a pesar de haber ciertas variaciones entre los tercios del árbol, el tercio superior de los árboles fertilizados mantuvieron una mayor cantidad de macroelementos que los árboles sin fertilización (Aparicio *et al.*, 2001).

Algunos autores han detectado al cuarto año un aumento significativo en la concentración foliar de *E. nitens* con la aplicación de N y P, aunque sin diferencias en el crecimiento respecto al control, lo cual señalaría un “consumo de lujo” (Aparicio *et al.*, 2001).

Las experiencias muestran que las respuestas a la fertilización dependen de la edad de la plantación, lo que sugiere distintos requerimientos nutritivos. Son muchos los autores que coinciden en que el porcentaje de incremento en la producción de biomasa decrece, a medida que los árboles se acercan a la madurez.

Muchos autores concuerdan en la conveniencia de ajustar los esquemas de fertilización en función de los requerimientos de la plantación, buscando un equilibrio con las técnicas operacionales de aplicación (Aparicio *et al.*, 2001). Además de las ventajas nutritivas logradas al subdividir la dosis de fertilización haciendo aplicaciones parcializadas, se reducirían pérdidas de elementos a causa de volatilización, lixiviación, inmovilización y erosión (Aparicio *et al.*, 2001).

#### **2.4.2.- Tipos de fertilizantes usados y respuestas obtenidas**

La bibliografía muestra aplicaciones recurrentes de fertilizantes con formulaciones de N P K, tanto en forma individual como en sus distintas combinaciones. Además existen algunas experiencias con productos adicionales que aportan Ca, B, Zn, Mg, S y Cu.

Como fuentes de nitrógeno se han utilizado sulfato de amonio y urea. Bajo ciertas condiciones, dependiendo de la cantidad de materia orgánica en el suelo, las aplicaciones de sulfato de amonio pueden traducirse en mayores ganancias de volumen comparada con las de urea por los beneficios del sulfuro, como se ha verificado en ensayos con *E. grandis* sobre suelo arenoso en la sabana brasileña (Barros y Novais, 1996). Los mismos autores sugieren en suelos de pH bajos (ácidos), la aplicación de amonio como fuente de nitrógeno, debido a que el radio de absorción del elemento es mayor comparado con los nitratos, además muestra adaptaciones metabólicas a diversas condiciones nutricionales, advirtiéndose también una mayor absorción de fósforo, mediante la aplicación de formas amónicas.

La aplicación de fuentes de fósforo soluble e insoluble depende de la disponibilidad de elemento en el suelo. Por ejemplo, en suelos arcillosos, con alta capacidad de fijación del elemento, la aplicación de fuentes solubles y fuentes menos solubles como roca fosfatada, han presentado mayores incrementos volumétricos en *E. grandis* que la aplicación sola de fosfato soluble (Barros y Novais, 1996).

El potasio guarda una estrecha relación con la concentración de calcio y magnesio. Arruda y Malavolta, (2001) afirman que los efectos entre K, Ca y Mg ocurren en forma de inhibición competitiva, (normalmente a nivel de membrana celular) proceso que se desarrolla cuando dos elementos se combinan por el mismo sitio activo del cargador. Un ejemplo clásico se presenta cuando dosis altas de K inhiben la absorción de Ca y Mg, llegando muchas veces a presentarse deficiencias de estos dos nutrientes con la consecuente reducción de la producción. Además, los cationes como el K pueden atravesar la membrana plasmática con mayor velocidad, afectando la absorción de cationes más lentos como el Mg y Ca (Arruda y Malavolta, 2001). Los requerimientos de K aumentan con una baja relación Ca:Mg (<1) o por elevados valores de Ca más Mg en el suelo (Barros y Novais, 1996; Arruda y Malavolta, 2001). En Brasil, se ha registrado el uso de cloruro de potasio como fuente de potasio en plantas de vivero de *E. grandis* (Barros y Novais, 1996).

El transporte de calcio hasta los tejidos en crecimiento es importante para la síntesis y formación de pared celular (Oliva *et al.*, 1995). Como fuente de calcio se ha utilizado cal. La aplicación de grandes cantidades de cal podría debilitar la absorción de fósforo en plantaciones de *Eucalyptus*, establecidos en suelos ácidos (Barros y Novais, 1996). El mismo autor indica que la aplicación de cal es recomendada para reducir las concentraciones tóxicas de hierro y manganeso en suelos ácidos; además, es una fuente de calcio y magnesio. En suelos ácidos la solubilidad del aluminio aumenta velozmente y puede ser ocupado sustituyendo al calcio, magnesio o potasio (Macedo *et al.*, 1996). Gerding *et al.* (2001), coincide en que la cal, disminuye la posible toxicidad producida por la actividad del aluminio, hierro y manganeso; neutraliza la acidez del suelo y ayuda a incrementar los niveles de fósforo, potasio, calcio y magnesio. A pesar que los suelos ácidos presentan una mayor cantidad de aluminio, la información disponible sugiere una tolerancia mayor del *Eucalyptus* frente a otras especies y en algunas instancias, podría beneficiar los efectos de captación de N y P (Barros y Novais, 1996).

Las aplicaciones de fertilizantes en Brasil, han sido generalmente una mezcla de N P K (Barros y Novais, 1996). El fertilizante N P K aplicado en suelos de sabana brasilera podría no ser utilizado por los árboles debido a la carencia de B y/o Zn (Cornejo, 1982).

La falta de respuesta en aplicaciones de P en plantaciones recién establecidas de *Eucalyptus grandis* puede ser atribuido, según algunos investigadores, al uso de superfosfato, el cual contiene fósforo monocálcico soluble en agua, un compuesto que se filtra rápidamente, y a la omisión de nitrógeno en los tratamientos (Cornejo, 1982).

En un estudio con aplicaciones de fosfato diamónico, en *E. nitens* al establecimiento (Australia), se observó que el movimiento superficial o lateral del nutriente resultó ser muy lento y los niveles del nutriente bajan muy rápido al cabo de cuatro meses. En contraste con esto, el movimiento en profundidad del nutriente resultó ser más rápido y los niveles del nutriente fueron más altos. Se mantuvo un valor alto incluso pasados 18 y 42 meses después de la aplicación (Smethurst & Wang, 1998).

En España, se han utilizado los productos Urea (46%); Superfosfato (45%) y Sulfato Potásico (49%); como fuente de N, P y K respectivamente.

En Argentina, estudios con *E. grandis* de 4 años establecidos sobre suelos arenosos manifiesta que la fertilización con fosfato diamónico aumenta considerablemente el área basal (Dalla Tea, 1997).

Al igual que las experiencias provenientes de Brasil y Sudáfrica, para *Eucalyptus grandis*, y de Portugal para *Eucalyptus globulus*, en Chile, las plantaciones de *Eucalyptus globulus* recibieron inicialmente fertilizaciones con Nitrógeno y Fósforo al momento del establecimiento. Posteriormente, se agregó Boro y Cobre a las formulaciones, como también los macroelementos Azufre y Magnesio (Toro, 1987). A diferencia de los métodos de plantación empleados en *P. radiata*, se enfatizó el control de malezas durante la etapa previa a la plantación, y también una mejor preparación del suelo (Toro, 1995). La aplicación operacional de fertilizantes se efectúa a todas las plantaciones de *Eucalyptus* y *P. radiata*. Sin embargo, en *Eucalyptus globulus* se utilizan mezclas con varios elementos esenciales, como por ejemplo Nitrógeno, Fósforo, Potasio y Boro. En cambio, en *P. radiata*, sólo se aplica Boro para evitar posibles deformaciones causadas por deficiencia de este elemento (Toro, 1995). La tendencia observada a inicios de 1994, es fertilizar las plantaciones de *Eucalyptus nitens* también en la segunda temporada de crecimiento (Toro, 1995).

En Chile se han aplicado dosis que fluctúan entre 70 y 350 gramos por planta de mezcla de fertilizantes a todas las plantaciones de *E. globulus*, establecidas entre la VI y X Región. Los principales elementos empleados son Nitrógeno, Fósforo, Potasio, Azufre, Magnesio y Boro. Empresas especializadas han preparado formulaciones especiales para cumplir con los requerimientos específicos de cada empresa forestal. Estas aplicaciones se hacen al momento del establecimiento como una fertilización de apoyo, y la aplicación ha sido fundamentalmente localizada a una cierta profundidad y distancia del cuello de la planta (Toro, 1995).

Ensayos de fertilización realizados en la comuna de Fresia, X R., con plantaciones de *E. nitens* de 4 años, sobre suelos arcillosos, permitieron monitorear los efectos de la

aplicación de fertilizantes en el establecimiento, meses después de la plantación, a los 2 y a los 4 años de edad. El estudio reveló que la fertilización con fósforo soluble presentó mayores rendimientos, en contraposición al fósforo menos soluble (Bifox) y cal, registrándose un aumento significativo en la densidad media de la madera. Aún cuando los incrementos diamétricos, de altura y volumétricos fueron superiores en los tratamientos fertilizados, estos no presentaron diferencias significativas frente al testigo, sin embargo, la producción de biomasa aérea fue de un 55% mayor entre el tratamiento con mayor fertilización y el testigo (Gerding *et al.*, 2001).

En general, si la respuesta a la fertilización es positiva, esta se manifiesta en una mayor actividad fotosintética, existiendo una estrecha relación entre el aumento del área foliar y el aumento en el crecimiento de área basal (Binkley, 1993). El mismo autor señala que son muchas las experiencias que muestran una respuesta positiva en los rendimientos después de un período de 5 a 10 años.

Barros y Novais (1996), basados en estudios de producción de biomasa y utilización de nutrientes, indican que la eficiencia en la utilización de los nutrientes depende de la edad, especie, incluso dentro de la especie, varía de acuerdo al clon.

Las respuestas a los fertilizantes pueden variar entre sitios distintos, edad del rodal, condición del rodal, especies y genotipos. Las interacciones genotipo – ambiente han sido consideradas ampliamente en el ámbito forestal. La disponibilidad de nutrientes forma parte del componente ambiental, la cual interactúa con el genotipo, dando pie a variaciones en la respuesta esperada.

### **2.4.3.- Oportunidades para fertilizar una plantación forestal**

Según Toro (1995), existen distintas oportunidades para fertilizar:

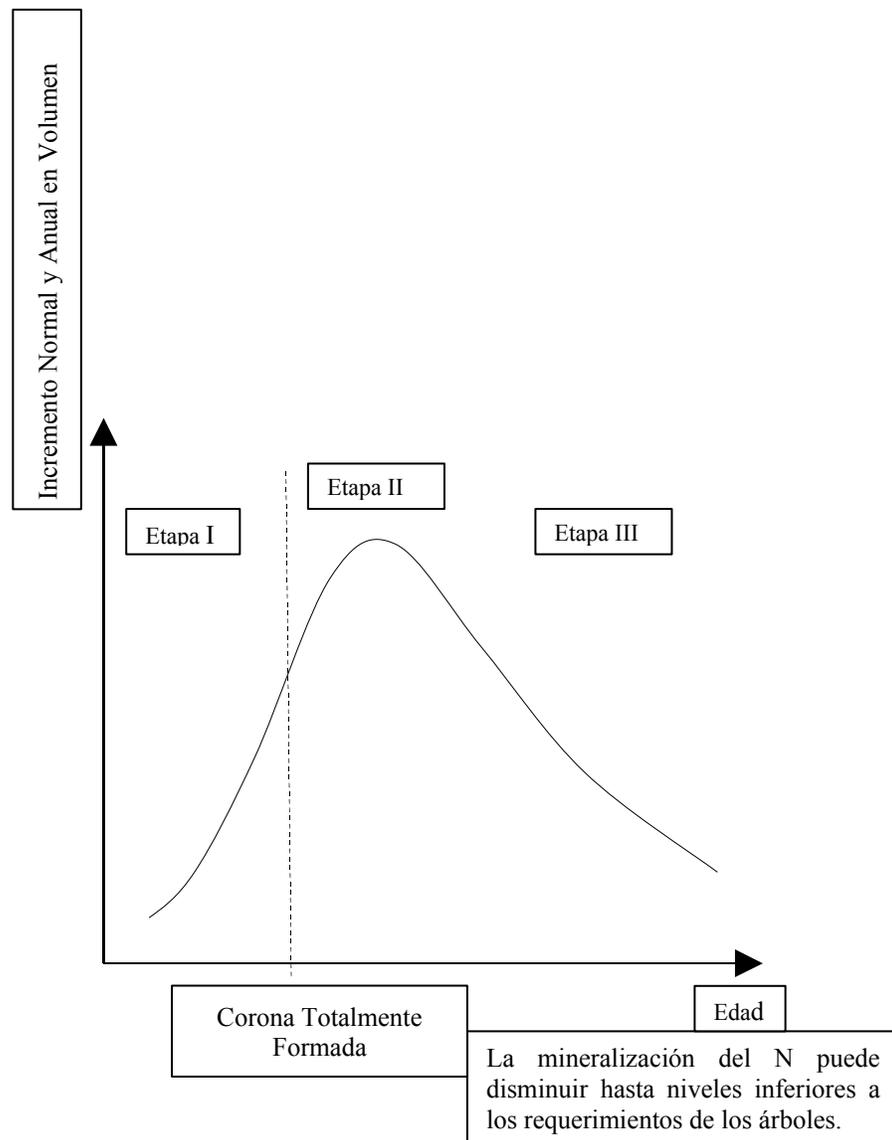
- (1) Fertilización durante la fase de establecimiento, destinada básicamente a apoyar el crecimiento inicial de las plantas y permitir que la fase de construcción del aparato fotosintético se desarrolle en forma normal, lo que se logra a través de fertilizaciones correctivas y de apoyo, en el caso de *Pinus radiata* y *Eucalyptus sp.*
  
- (2) Fertilización en conjunto con raleos al cierre de copas, con las cuales se han logrado importantes volúmenes adicionales, que varían entre 4 – 7 m<sup>3</sup>/há/año para *P. radiata* en ensayos instalados entre la VII y VIII Región, coincidiendo con las experiencias realizadas en Australia, Nueva Zelanda y Sudáfrica.
  
- (3) Fertilización precosecha. La aplicación de fertilizantes cinco o seis años antes de cosechar un bosque ha entregado incrementos en volumen de hasta 30 m<sup>3</sup>/há en plantaciones establecidas en la zona de Arauco (Toro, 1995), convirtiendo esta actividad en otra alternativa para obtener plantaciones de mayor productividad.

El rol de la fertilización forestal al establecimiento de las plantaciones es importante, pero debe estar asociado a otras técnicas para obtener un crecimiento óptimo de ellas. El control de las malezas es fundamental para mantener un volumen de suelo disponible para la exploración del sistema radicular de la planta de interés. Con este control se logra aumentar el volumen de agua disponible, como también, el capital nutritivo del suelo (Toro, 1995).

El empleo de fertilizantes requiere conocer los momentos oportunos en donde la planta, como individuo, o como un conjunto (rodal), utilizará los recursos adicionales que se aportan al sitio. Fertilizar en la etapa que se ubica entre el establecimiento de las plantaciones y el cierre de copas, permite obtener muy buenas respuestas en crecimiento (Toro, 1995).

La respuesta de un rodal a la fertilización a lo largo de su etapa de desarrollo, se caracteriza por cambios que ocurren en la tasa de suministro de nutrientes del suelo y la capacidad de los árboles para responder al aumento de dicha tasa (Binkley, 1993).

Se pueden distinguir entonces tres etapas de desarrollo, la primera se caracteriza por una alta tasa de suministro de nutrientes del suelo con una baja demanda de nutrientes por parte de los árboles. En la etapa II el crecimiento y la absorción de nutrientes alcanza el máximo y la disponibilidad de nutrientes del suelo puede ser similar a la etapa I, pero la capacidad de respuesta por parte del rodal puede ser mayor. Durante la etapa III, una gran parte de los nutrientes se ha acumulado en el rodal como tejido vivo. Por tanto, es posible una menor tasa de suministro de nutrientes. Sin embargo, la capacidad de respuesta a una mayor disponibilidad de nutrientes ha disminuido por factores fisiológicos (Binkley, 1993).



**Figura N° 2:** Las tres etapas del desarrollo del rodal podrían relacionarse con respuestas a la fertilización. (Binkley, 1993).

La respuesta de los árboles a los fertilizantes depende de la edad y del estado de desarrollo de la población. En el período de cierre de copas, la demanda nutritiva aumenta y la aplicación de fertilizantes es más eficiente. Las aplicaciones realizadas solo al momento de la plantación pueden resultar en una gradual reducción en la disponibilidad de nutrientes durante la rotación (Oliva *et al.*, 1995).

Otro momento oportuno para obtener beneficios adicionales de la fertilización es emplearla poco después de finalizado un raleo. En este momento el rodal vuelve a una situación de alta demanda nutricional, que debe ser satisfecha por el suelo. El aumento de la mineralización de la materia orgánica, y la fertilización en conjunto, contribuyen a satisfacer esa demanda nutricional (Toro, 1995). La respuesta a la fertilización es más notoria si se hace conjuntamente con el raleo, sobre todo cuando se tiene una limitada disponibilidad de agua y el raleo más la fertilización darían una mejor respuesta que cualquiera de estas actividades por separado (Binkley, 1993).

#### 2.4.4.- Posibles causas de respuesta insuficiente.

- **Buen nivel de fertilidad del suelo:** Aguirre (1997) señala la escasa respuesta a la fertilización de *Eucalyptus globulus* en la zona de Valdivia, los cuales fueron sometidos a análisis de nutrientes, encontrándose una buena fertilidad del suelo. Esto contrasta con las respuestas obtenidas más al norte, en suelos de menor fertilidad.
- **Ataque de *Botritis*:** El considerable ataque de *Botritis*, sobre todo en *Eucalyptus globulus*, provoca una gran pérdida de hojas, lo que trae como consecuencia que cada temporada de crecimiento se renueve gran parte de la masa foliar, con un gasto nutricional que no alcanza a ser recuperado por la descomposición de las hojas, a causa de la baja tasa de mineralización que se presenta en la zona de Valdivia (Mora, 1995). El recambio foliar implicaría que lo absorbido por la fertilización se encuentre inmovilizado en la hojarasca y esté siendo liberado lentamente.

Diversos autores muestran una escasa, lenta o nula respuesta a la fertilización en árboles que se encuentran en la mitad de la rotación. Los factores que condicionan este efecto se han presentado anteriormente y se produce un efecto sinérgico entre ellos conjuntamente con la lenta respuesta fisiológica que se tiene en estos árboles.

A medida que mayor es la edad de las masas forestales de *Eucalyptus*, menor es la exigencia nutricional (Ruiz, *et al.*, 2001).

Ares y Fownes (2000) determinaron que la fertilización con nitrógeno aumentó la producción de materia seca en *Fraxinus uhdei* establecidos en suelos con deficiencia del nutriente. Sin embargo, en suelos donde había vegetación nativa de *Acacia koa*, planta fijadora de nitrógeno, el suelo no presentó deficiencia o limitación del nutriente y no se encontraron respuestas satisfactorias a la fertilización con nitrógeno.

Núñez (1987), no encontró respuestas a la fertilización nitrogenada en variables dasométricas, en un período de estudio de 4 años, en ensayos de *Pinus radiata* establecidos en la comuna de Constitución de 11 años de edad y en la comuna de Arauco, de 9 años de edad. Esto concuerda con otros trabajos realizados en rodales de 14 años, donde las respuestas están medidas a los 5 años de edad (Núñez, 1987).

La literatura señala respuestas a la fertilización, en términos dasométricos entre los 2 a 3 años y en otros casos entre los 4 a 6 años. Los mayores incrementos en DAP y volumen se han encontrado con fuertes aplicaciones de nitrógeno y raleos intensivos (Núñez, 1987). En un estudio de raleo y fertilización con 7 años de edad en *E. regnans*, se encontró que una combinación entre fertilización y raleo (fertilización con nitrógeno en 500 kg/ha y raleo de 1200 a 350 árboles/ha) produjo la mayor respuesta en crecimiento diamétrico al momento de la cosecha (Hay *et al.*, 1999). Se han reportado estudios similares (Reserva Kaingaroa) donde la cosecha produjo ganancias en productividad por la respuesta en la combinación de raleo y aplicación de fertilizantes (nitrógeno 250 o 500 kg/ha y raleo desde 1667 a 600 árboles/ha) (Hay *et al.*, 1999).

Otros autores indican que existen respuestas positivas en DAP, altura y volumen, en *Pseudotsuga menziesii* en un período de 9 años, en cambio, en factor de forma existen diferencias significativas por el raleo, pero no por la fertilización (Núñez, 1987).

Diversos autores indican que la carencia de respuestas a la fertilización en rodales adultos de *Eucalyptus* puede estar relacionada con el ciclo de nutrientes, saturación del área foliar o inadecuada posición del fertilizante en relación al sistema radicular. La correcta posición es muy importante para nutrientes de baja movilidad en el suelo, como el P y Zn (Barros y Novais, 1996).

Molina (1982), en ensayos de fertilización en un monte bajo de *E. globulus* con retoños de dos años de edad, aplicó tres niveles de dosis de urea y superfosfato triple (N y P), no encontrando diferencias significativas entre los incrementos diamétricos y de altura. Los factores que influyeron para la carencia de respuesta, de acuerdo con lo que señala el autor son: el corto período de estudio (11 meses, para este estudio); la falta de humedad; la insuficiencia absorción de fósforo; la buena fertilidad del suelo y la edad de la plantación (para plantaciones adultas, las respuestas son mucho más tardías). En relación a esto, Binkley *et al.*, (2002) indica que las plantaciones maduras de *Eucalyptus* mantienen una alta adquisición de los recursos agua, luz y nutrientes, pero su productividad declina. La explicación clásica de este hecho es que aumentan los costos de respiración para mantener una gran biomasa en plantaciones mayores, pero este fundamento está siendo refutado por mediciones de respiración hechas en estudios recientes. El mismo autor sugiere entonces que la productividad por unidad de recurso usado debería disminuir. Un análisis de esta disminución a escala de árbol individual (en relación con la posición la estructura del dosel arbóreo) sirvió para confirmar que los árboles dominantes sostienen altas tasas de crecimiento mediante el incremento en la adquisición de los recursos y su uso en forma eficiente, en contraste con los árboles no dominantes, que crecen más lentamente, producto de una menor adquisición de los recursos y una reducida tasa de crecimiento por unidad de recurso adquirido. Ambas situaciones en conjunto, redundan en una declinación del crecimiento global del rodal. Sin embargo, esta situación adversa se atenúa en plantaciones donde los individuos son clones.

## **2.5.- Variables dasométricas**

Las variables dasométricas son indicadoras directas de cambios en la productividad de las plantaciones forestales. Los incrementos volumétricos dependen directamente de los incrementos de DAP, altura y área basal.

En cuanto a los patrones de crecimiento anual, Hay *et al.*, (1999), en Nueva Zelanda, estudiaron el comportamiento de tres especies del género *Eucalyptus*, a saber, *E. fastigata*, *E. regnans* y *E. saligna*. Estos indicaron que para el crecimiento en diámetro, existen dos puntos máximos, el primero en octubre y el segundo, más pequeño en marzo. Los puntos mínimos se registraron en junio, seguido de enero. El patrón estacional de crecimiento en altura fue mucho más pronunciado, con puntos máximos en diciembre /enero y mínimos en junio/ julio. Las tres especies tuvieron un comportamiento similar (Hay *et al.*, 1999).

Resulta interesante comprender el patrón de crecimiento de una plantación de *Eucalyptus* a lo largo de la rotación. En este sentido, se han llevado a cabo importantes estudios en Portugal. Se han registrado estudios que utilizando 144 parcelas permanentes de *E. globulus* concluyen que el mayor incremento anual de crecimiento para la altura dominante y área basal se situó entre los 5 a 8 años de edad (Pereira *et al.*, 1996). La tasa de acumulación de volumen en madera fue mayor a los 10 años de edad. En el término de la rotación, cerca del 85 al 90 % de la biomasa aérea se concentra en el fuste y corteza (Pereira *et al.*, 1996).

Un monitoreo continuo que refleje las variables de crecimiento sería muy útil para comprender el modelo de crecimiento que está adoptando una plantación específica, pudiendo incluso, acomodar las variables a funciones que puedan aventurar, una situación futura. En este sentido, se han estudiado algunas ecuaciones para predecir el volumen de algunas especies del género *Eucalyptus*. Mientras que para algunas especies fueron sumamente satisfactorias, para otras solo representó una aproximación sesgada pero útil para algunas comparaciones. Sin embargo, se han desarrollado algunos modelos predictores de volumen para muchas especies de *Eucalyptus*, teniendo buenos resultados para todas las especies a las cuales fueron aplicados (Gordon *et al.*, 1999; Bi, 1999). Este último autor señala que dentro de las 25 especies de *Eucalyptus* estudiadas (en edad comercial), todas presentaron una altura relativa de centroide (e.d., la altura que corresponde al centro del volumen del fuste, y que lo divide en dos partes iguales) varía entre 0,206 y 0,258. Entre los sólidos de revolución de interés para las ciencias forestales el centroide del conoide es de 0,2063 y el de un paraboloides de segundo grado es de 0,2929, lo que sugiere que la forma de los fustes de *Eucalyptus* varía entre un conoide y un paraboloides de segundo grado, lo que contrasta con la altura relativa de centroide para *P. radiata*, de aproximadamente 0,3; semejante a un paraboloides de segundo grado (Bi, 1999). En relación a ello, la bibliografía muestra una gran cantidad de trabajos donde se utiliza el cálculo del volumen en *Eucalyptus sp.* considerando la fórmula de un cono, tal como lo indica Harper *et al.*, (1999), que la utilizó como una herramienta para estudiar el comportamiento en plantaciones de *E. globulus*.

Otros trabajos han desarrollado ecuaciones de volumen mediante estudios de biomasa, utilizando DAP y altura total como variables de entrada, siendo ésta última, muy dependiente del DAP. En los casos en que no se puede medir altura total, fue más aplicable utilizar un polinomio de segundo orden usando el DAP como variable (Inions, 2003).

Recientemente, en Brasil se ha desarrollado un modelo de simulación de crecimiento para *Eucalyptus*, que responde a cambios de fertilidad y clima, es sensible a estimaciones de IAF (Índice de Área Foliar), realizando estimaciones satisfactorias de producción de volumen de madera (Stape *et al.*, 2002a).

En Chile, INFOR ha desarrollado un modelo de crecimiento que permite extrapolar el volumen en función del área basal estimada mediante fórmulas que dependen de la edad. El trabajo desarrollado por el Instituto Forestal en relación con el crecimiento de *Eucalyptus*, consideró que el objetivo final debía ser un modelo de rendimiento, de uso simple. Los datos utilizados provienen de 1.038 parcelas permanentes y de 3853 mediciones. El 50,1 % de las mediciones correspondió a *E. globulus* con edades entre 2 y 12 años y el resto a *E. nitens*, con edades de 2 a 7 años (Pinilla *et al.*, 2001). Además, se han ajustado modelos para estimar el volumen de árbol individual para *E. globulus* y *E. nitens* (Pinilla, 2001). Gerding *et al.* (2001), evaluaron el volumen medio individual, como parámetro más ilustrativo de las dimensiones de los árboles y menos afectado por la variación en la densidad del rodal.

Otra metodología útil, que permite apreciar la estrategia de rendimiento de los árboles según su clase diamétrica es la relación Altura/DAP (Gerding *et al.*, 2001).

## **2.6.- Evaluación del estado nutricional**

### **2.6.1.- Análisis foliar**

Las mayores concentraciones de todos los nutrientes se encuentran en el follaje, a excepción del calcio, que es mayor en la corteza (Judd *et al.*, 1996). Esta secuencia de concentración hojas>corteza>ramas>madera ha sido reportada por diversos autores en *E. grandis*, *E. globulus*, *E. tereticornis* y *E. nitens*, donde se señala que la secuencia de macronutrientes en la biomasa aérea se mantendría constante a través de las diferentes condiciones de suelo, clima y edad de la plantación (Aparicio *et al.*, 2001).

La gran proporción de análisis del tejido se hace en follaje, como uso común, se emplea el término "análisis foliar". Se ha declarado que la hoja es el punto focal del funcionamiento de muchas plantas y es un indicador relativamente sensible para esos elementos minerales que directamente afectan la fotosíntesis, además de ser una porción conveniente de la planta para probar. Normalmente, los síntomas del estado de salud son claramente visibles y el propósito del análisis foliar es determinar qué nutriente se requiere para abreviar los síntomas causados (Van den Driessche, 1974).

El análisis de tejido (foliar) y el de suelo, son dos técnicas usuales para un diagnóstico rápido de deficiencias y para predecir respuestas a la fertilización. (Cornejo, 1982). El mismo autor indica que el análisis foliar es adecuado, porque el árbol es el que mejor integra los factores que afectan su estado nutricional y los resultados correlacionan mejor con el desarrollo y crecimiento y con respuestas a fertilización que el análisis de suelo. Esto es reafirmado por Judd *et al.* (1996), en cuanto a que la concentración foliar de nutrientes es sensible a cambios en la fertilidad del sitio, siendo además importante, en la identificación de deficiencias nutricionales y desbalances. De hecho, el nitrógeno y el

fósforo en el follaje responden, en forma muy especial, al estado nutricional del suelo y a la adición de fertilizantes (Judd *et al.*, 1996).

Los métodos de muestreo deben ser rígidamente establecidos ya que la concentración de nutrientes varía con la edad del tejido, posición dentro de la corona (copa), época de recolección de la muestra y la procedencia (Cornejo, 1982).

Español *et al.*, (2000) encontraron que la época del año para el muestreo es altamente influyente en la variación del contenido nutricional del follaje y que la procedencia de las especies incide de menor manera. De hecho, la retrasmlocación de los macronutrientes está significativamente correlacionada con los incrementos de área basal que se gatillan en la época de crecimiento. En la temporada de receso, se produce senescencia y una disminución de la masa foliar, lo que también induce movilidad de nutrientes desde las hojas de distintas edades y posiciones en la copa (Saur *et al.*, 2000).

Las investigaciones sugieren que los resultados de ensayos de fertilización con especies de árboles determinados, bajo los suelos y climas específicos, deben ser la base para validar recomendaciones basadas en análisis foliar (Van den Driessche, 1974). Se ha sugerido que el uso apropiado del análisis foliar es determinar el fertilizante correcto para la aplicación, cuando cualquier deficiencia existe, además de prevenir del fertilizante que se usa pródigamente (Van den Driessche, 1974; Español, 2000). Algunos investigadores destacan el análisis foliar como una herramienta fácil y útil que permite evaluar el estado nutritivo en plantaciones de *Eucalyptus* (Macedo *et al.*, 1996). Esta información, en conjunto con ensayos de fertilización, constituye un poderoso medio para la maximización de la productividad a través de la ayuda nutricional (Judd *et al.*, 1996).

#### **2.6.1.1.- Niveles foliares de nutrientes en especies del género *Eucalyptus***

Existen muchos antecedentes referidos a niveles foliares de los elementos nutritivos para diferentes especies del género *Eucalyptus*, existiendo evidentes variaciones para algunas especies del género, debido a una estrecha relación especie y sitio específico. Es así como las diferencias nutricionales no se restringen a un subgénero, puede haber diferencias significativas en especies del mismo subgénero, incluso si estas especies están presentes en sitios cercanos. En el caso de las especies en estudio, *E. nitens* y *E. globulus* pertenecen al subgénero *Symphyomyrtus* Judd, *et al.* (1996) encontraron que las concentraciones de calcio en las hojas eran significativamente mayor en *E. globulus*. Las diferencias en nitrógeno, fósforo, potasio y magnesio entre las dos especies fueron menores y no significativas dependiendo del sitio (a excepción del magnesio). Además, las cantidades de nitrógeno en las hojas de *E. nitens* superaron a las de *E. globulus* (Cuadro 1).

**Cuadro 1.** Comparación de concentraciones de macronutrientes en el follaje para plantaciones adyacentes, con idénticas preparaciones de sitio y fertilización, de *E. globulus* y *E. nitens* en tres localidades al norte de Tasmania. \* p < 0,05; \*\* p < 0,01 y \*\*\* p < 0,001.

Comparación	Nutrientes (%)				
	N	P	K	Ca	Mg
Sitio I					
<i>E. globulus</i>	1,22	0,09*	0,80*	0,98*	0,13
<i>E. nitens</i>	1,33	0,07	0,39	0,49	0,16
Sitio II					
<i>E. globulus</i>	1,49	0,09	0,59	0,89*	0,25**
<i>E. nitens</i>	1,52	0,10	0,59	0,35	0,15
Sitio III					
<i>E. globulus</i>	1,80	0,16	1,19	0,80*	0,19*
<i>E. nitens</i>	2,16	0,15	0,78	0,34	0,17
Total					
<i>E. globulus</i>	1,87	0,14	0,79	0,72***	0,20***
<i>E. nitens</i>	1,99	0,14	0,75	0,40	0,15

Fuente: Judd *et. al.* (1996)

Según González (1994) para la interpretación de los resultados de los análisis foliar, es conveniente contar con niveles de referencia establecidos a partir de determinaciones en árboles de diferente situación nutricional.

Hasta ahora, se han utilizado datos de niveles óptimos de concentraciones foliares o niveles comúnmente observados para plantaciones de *Eucalyptus*, en otras partes del mundo (ver cuadros 2 al 7).

**Cuadro 2.** Niveles foliares de nutrientes en *Eucalyptus globulus*.

Edad (años)	N (%)	P (%)	K (%)	Ca (%)	Mg (%)
5 meses	1,65 – 1,90	-	-	-	-
5	1,60	0,100	0,473	0,494	0,235
7	1,63	0,0892	0,552	0,624	0,251
8	1,72	0,0901	0,498	0,422	0,247
11	1,54	0,0733	0,422	0,350	0,173
12	1,46	0,0833	0,667	0,395	0,290

Fuente: Bara Temes (1970); adaptada por Cornejo (1982).

**Cuadro 3.** Niveles óptimos para *E. globulus* en España y *E. grandis* en Sudáfrica.

Especie	Nivel	Niveles óptimos de concentración				
		Nutrientes (%)				
		N	P	K	Ca	Mg
<i>E. globulus</i>	Crítico	1,80	0,12	0,40		
	Suficiente	2,00	0,14	0,60		
	Óptimo	>2,00	0,16	0,70	>1,00	0,30
<i>E. grandis</i>	Mínimo	0,85	0,11	0,36	0,66	0,21
	Máximo	3,12	0,35	1,02	1,42	0,48

Fuente: Adaptado por González (1994).

**Cuadro 4.** Niveles foliares de nutrientes en *E. globulus* y *E. nitens* de 4 años de edad en el noroeste de España.

NUTRIENTE	ESPECIE	
	<i>E. globulus</i>	<i>E. nitens</i>
	%	
Nitrógeno	1,5 (+- 0,02)	1,4 (+- 0,02)
Fósforo	0,08 (+-0,002)	0,08 (+-0,001)
Potasio	0,49 (+- 0,02)	0,39 (+- 0,01)
Calcio	1,1 (+- 0,04)	0,8 (+- 0,02)
Magnesio	0,18 (+- 0,007)	0,2 (+- 0,007)
	Ppm	
Fierro	33,2 (+- 0,9)	35,8 (+- 0,7)
Zinc	7,1 (+- 0,3)	8,6 (+- 0,3)
Manganeso	577 (+- 27)	1073 (+- 35)
Cobre	6,2 (+- 0,4)	6,0 (+- 0,3)

Fuente: Español *et al.*, 2000.

**Cuadro 5.** Rango de concentración de nutrientes observados en hojas jóvenes completamente extendidas en plantaciones de *Eucalyptus* de 1 a 2 años de edad, provenientes de plantaciones del oeste de Australia y R.P. China (1); rangos adecuado y deficiente de nutrientes foliares en árboles adultos en plantaciones forestales de Brasil (2).

NUTRIENTE	<i>Eucalyptus globulus</i> (1)		<i>Eucalyptus spp.</i> (2)	
	Adecuado	Deficiente	Adecuado	Deficiente
	%			
Nitrógeno	2,5 – 2,8	1 – 1,7	1,35 – 1,8	0,8 – 0,13
Fósforo	0,13 – 0,27	0,07 – 0,09	0,09 – 0,13	0,04 – 0,08

Potasio	0,9 – 1,1	0,4 – 0,7	0,9 – 1,3	0,6 – 0,8
Calcio	0,3 – 1,3		0,6 – 1	0,2 – 0,4
Magnesio	0,08 – 0,2		0,35 – 0,5	0,15 – 0,2
Azufre	0,13 – 0,2	0,12	0,15 – 0,2	0,08 – 0,12
Ppm				
Hierro	33 – 709	8 – 15	150 - 200	75 – 100
Zinc	15 – 50	10 – 11	35 – 50	20 – 30
Manganeso	100 – 1995	2 – 19	400 - 600	< 100
Cobre	5 – 24	0,6 – 2,6	7 – 10	4 – 6
Boro	12 – 23	4 – 10	30 – 50	15 – 20

Fuente: (1) Dell,B; Malajczuk,N; Grove,T., 1994. Nutrient Disorders in Plantation Eucalypts; (2) Adaptado por Arruda y Malavolta (2001). Encarte Técnico 91:1-10.

**Cuadro 6.** Niveles foliares encontrados en plantaciones de *E. globulus* de siete años de edad en Portugal.

	%				
	N	P	K	Ca	Mg
<i>E. globulus</i>	1,18	0,07	0,55	1,26	0,17

Fuente: Brañas (2000). Invest. Agr.: Recur. For. Vol. 9 (2), 2000.

**Cuadro 7.** Rango observado en muestras de follaje de *E. nitens* por distintos laboratorios del mundo.

NUTRIENTE	Rango
Nitrógeno (%)	1,59 – 2,24
Fósforo (%)	0,12 – 0,17
Potasio (%)	0,63 – 1,05
Calcio (%)	0,42 – 0,7
Magnesio (%)	0,08 – 0,14
Hierro (ppm)	27 – 99
Manganeso (ppm)	229 – 1270
Cobre (ppm)	0,7 – 12
Zinc (ppm)	12 – 30
Boro ( ppm)	5,4 – 29
Aluminio ( ppm)	1,3 – 235
Sodio (ppm)	78 – 400

Fuente: Judd T. S., Attiwill, P. M., Adams, M. A. 1996. Nutrient concentrations in Eucalyptus. CSIRO Publishing, Collingwood, Australia.

En diversas partes del mundo, las concentraciones foliares propuestas como óptimas para distintas especies, se han utilizado como guía. Sin embargo, Prado y Toro (1996) señalan la necesidad de determinar estándares nutricionales apropiados para las especies más comunes plantadas en Chile, *E. globulus*, *E. nitens*, *E. camaldulensis*, *E. delegatensis* y *E. regnans*, ya que al comparar la concentración foliar de nutrientes de diversas especies creciendo aparentemente bien en algunos sitios, muestran serias diferencias y desbalances nutricionales (Cuadro 8).

**Cuadro 8.** Concentración de nutrientes en plantaciones de *E. globulus* y *E. nitens* de 3 años de edad, creciendo sobre suelo metamórfico en Chile central.

Especie	N	P	K	Ca	Mg	Zn	Cu	B	Relación	
									N:P	N:K
<i>E. globulus</i>	1,75	0,13	0,45	0,65	0,2	15	6	18	13	3,9
<i>E. nitens</i>	1,34	0,08	0,25	0,65	0,27	13	10	22	17	5,3
<i>E. delegatensis</i>	1,50	0,08	0,26	0,75	0,35	14	5	22	19	5,8
<i>E. fastigata</i>	1,79	0,12	0,43	0,65	0,18	13	10	34	15	4,2
<i>E. regnans</i>	1,36	0,05	0,22	0,85	0,33	10	5	16	27	6,2

Fuente: Toro, 1987. Chile Forestal N° 143. Sept – 1987.

### 2.6.1.2.- Relaciones entre nutrientes

Las relaciones entre los elementos permiten realizar un diagnóstico nutritivo de las masas forestales, al igual que la concentración de nutrientes a nivel foliar (Prado y Toro, 1996; Brañas *et al.*, 2000).

Particularmente relevante resulta el balance N/P, el que según Prado y Barros (1989) debe ser considerado para obtener una respuesta apropiada a la aplicación de fertilizantes. La relación N/P está muy vinculada con la productividad y puede ser obtenida a través de la concentración foliar de estos elementos. De acuerdo a diversos autores debe variar, para el caso de *Eucalyptus sp.*, entre 12 y 15. Fuera de este rango, puede no haber respuesta a la fertilización (Prado y Toro, 1996; Brañas, 2000). Algunos investigadores aseguran que la relación N/P en el follaje, es particularmente sensible a las adiciones de nutrientes. Se sugiere un valor óptimo para la relación N:P de 15 para un rango de especies de *Eucalyptus*. Otros autores consideran un valor de 15 para esta relación en *E. globulus* y *E. sieberi* (Judd *et al.*, 1996). El mismo autor también sugiere un óptimo de 15 para *E. nitens*.

Otras relaciones comúnmente empleadas son N/K, K/P y Ca/Mg. Los rangos de referencia ofrecidos Herbert (1996), para estas relaciones son N/K: 3,5 ;K/P: 5 y Ca/Mg: >3,3.

La bibliografía menciona también la razón P/N (%), donde el óptimo sugerido es de 6,7 (Pereira *et al.*, 1996). Bajo ese valor, se podría afectar negativamente el crecimiento de *E. globulus* a partir del tercer año (Pereira *et al.*, 1996).

### 2.6.1.3.- Porcentaje de desviación respecto al óptimo

Además de la comparación con niveles de referencia, la evaluación del estado nutricional de las plantaciones se puede efectuar en base a los "Porcentajes de desviación respecto al óptimo" (Brañas *et al.*, 2000). Estos porcentajes, basados en comparaciones de nutrientes con respecto al óptimo, pueden ilustrar fácilmente el estado de los elementos, vislumbrándose aquellos que se encuentran deficientes.

#### 2.6.1.4.- Análisis vectorial

El análisis vectorial, es una técnica utilizada tanto para estudiar el estado nutricional de los árboles como para experimentos de competencia.

El análisis foliar se ha considerado como una herramienta razonable para evaluar el estado nutricional y los requerimientos nutritivos en árboles (Van den Driessche 1974, Mead y Mansur, 1993). El análisis vectorial es un método comparativamente nuevo (Mead y Mansur, 1993) el cual puede examinar cambios en combinaciones de datos del follaje con análisis foliar de nutrientes y peso seco de la hoja. Se ha utilizado para identificar posiciones del bosque que responderán positivamente a la fertilización y también para predecir respuesta en crecimiento de árboles jóvenes de *Picea mariana* (Mill.) en distintas condiciones nutricionales de suelo (Mead & Mansur, 1993). El método está basado en cambios significativos en el peso seco de la hoja individual, concentración de nutriente y contenido de nutriente en sectores fertilizados contra sectores no fertilizados.

Se puede establecer un seguimiento de la aplicación de fertilizantes mediante el análisis vectorial. La magnitud y dirección de estos cambios son el diagnóstico del nivel nutritivo y la potencial sensibilidad del estado actual a la mayor disponibilidad de nutrientes. Esta técnica puede utilizarse para calibrar el régimen nutritivo del bosque, monitorear en el largo plazo cambios en la fertilidad del bosque y predecir respuestas a la fertilización.

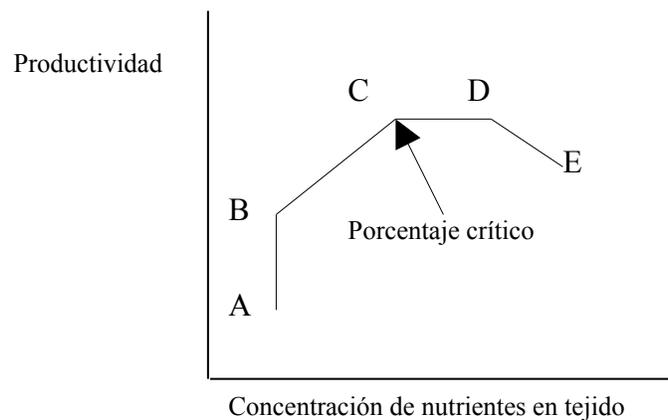
Mead & Munson (1993), han realizado estudios en Nueva Zelanda, con una plantación de *Pinus radiata* establecida como ensayo de competencia nutritiva y de agua, entre diversos genotipos, plantados en parcelas libre de malezas y con diversos grados de maleza, utilizando análisis vectorial. Los resultados indicaron que el peso foliar fue mayor en las parcelas sin maleza y la próxima estación de crecimiento siguió una misma tendencia para el incremento de altura y diámetro con diferencias relativas más pronunciadas. Similar respuesta se deriva de las concentraciones de nutrientes foliares. También se determinó que el peso de las hojas es un indicador confiable del vigor del árbol.

Para estudios de fertilización realizadas en E.E.U.U. y Canadá, los cambios de dirección en la concentración y contenido foliar de nutrientes, en árboles probados, en relación al tratamiento testigo, al final de la primera temporada de crecimiento son una prueba de diagnóstico del estado actual del nivel nutritivo y un predictor de la respuesta siguiente (Weetman, 1989).

El trazado gráfico de concentración foliar versus peso unitario de la hoja versus contenido de la unidad foliar ha mostrado ser una herramienta de diagnóstico poderosa para evaluar la respuesta de la primera temporada de crecimiento frente a las variadas prescripciones silviculturales (preparación del sitio, fertilización, raleo, poda); determinar el estado nutritivo de los árboles; indicar la respuesta de crecimiento al tratamiento para los próximos 3 a 5 años y probar la jerarquía nutritiva de un sitio en un esquema de clasificación de sitio (Weetman, 1989).

Se ha mostrado que el follaje del año actual es un buen predictor de la respuesta al siguiente crecimiento del árbol (Weetman, 1989).

La base para la interpretación del análisis foliar está en la relación existente entre la concentración foliar de nutrientes y el crecimiento (Weetman, 1989).



Sección	Cambio en		Estado
	Productividad	Concentración de nutrientes	
A B	+	0	Mínimo porcentaje
B C	+	+	Deficiencia
C D	0	+	Consumo de lujo
D E	-	+	Toxicidad

**Figura N° 3:** Curva de Macy (1936), representación general de la productividad como una función de la concentración de nutrientes en tejido foliar de las plantas (Weetman, 1989).

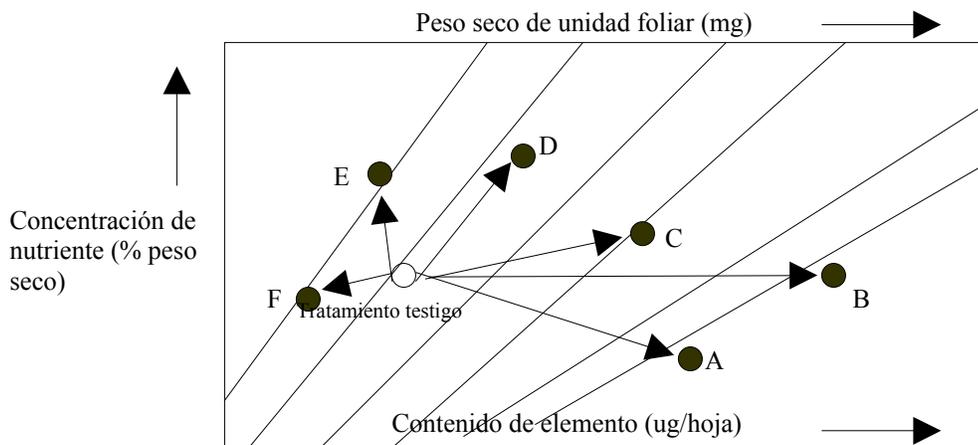
En el gráfico de la figura 3, se distinguen claramente cuatro fases:

1. Cuando el transporte de nutrientes en la planta es suficiente para mantener un incremento en la productividad, con niveles de nutrientes en un mínimo porcentaje (de A a B).
2. La deficiencia en el nutriente se identifica cuando se produce un incremento en la productividad y la concentración del elemento, (de B a C) debido a la respuesta positiva en productividad a la adición del nutriente. El porcentaje crítico del nutriente (punto C en la figura 2) corresponde a la concentración óptima del nutriente, ya que se alcanza el máximo rendimiento con una mínima cantidad de nutriente aportado.

3. El aumento en la concentración de nutrientes en los tejidos, (después del punto crítico C hasta el punto D) es considerado como consumo de lujo, ya que no se registra un aumento en la productividad.
4. Altas concentraciones de nutrientes (de D a E) pueden ser perjudiciales o tóxicas para el crecimiento, la productividad se reduce con un incremento en los niveles de concentración.

Existe un fenómeno no descrito en la curva, que es cuando la concentración de nutrientes es diluida (disminuye), por un fuerte incremento en la producción de biomasa, debido a que la concentración es una medida del porcentaje de peso seco. Sin embargo, bajo ciertas condiciones, la adición de un nutriente deficiente podría resultar en un incremento en materia seca, por un período relativamente largo, produciendo una reducción en la concentración foliar del nutriente adicionado. Este fenómeno se denomina "Efecto Steenbjerg" (Weetman, 1989).

Según algunos autores, las comparaciones menos confiables de porcentajes de concentración de nutrientes, se presentan cuando los valores son extrapolados desde una localidad a otra o desde árboles dentro de una etapa de desarrollo a otra distinta. Sin embargo, mediante los valores relativos se vence esta dificultad. De esta manera, el análisis vectorial permite comparaciones entre tratamientos silviculturales dentro de un rodal o entre rodales (Weetman, 1989).



Dirección del cambio	Respuesta en			Interpretación	Posible Diagnóstico
	Peso foliar	Nutriente			
		Concentración	Contenido		
A	+	-	+	Dilución	No limitante
B	+	0	+	Suficiencia	No limitante
C	+	+	+	Deficiencia	Limitante
D	0	+	+	Consumo de lujo	No tóxico

E	-	++	±	Exceso	Tóxico
F	-	-	-	Exceso	Antagónico

**Figura N° 4:** Interpretación de las relaciones direccionales entre concentración de nutrientes, contenido absoluto de nutriente y peso seco de las hojas después de la aplicación de los tratamientos (Timmer and Stone, 1978; Timmer and Morrow, 1984; Weetman, 1989).

## 2.7.- Parámetros indicadores de Productividad

Algunos registros indican que la mayor cantidad de macroelementos acumulada en el tercio superior de los árboles, producto de la fertilización, marca la diferencia entre los rodales en la zona de mayor actividad fotosintética (Aparicio, 2001). Los diagramas de distribución del N y P en el dosel arbóreo son similares, siendo mayor la concentración de nutrientes en el tercio superior. El N ha probado ser el nutriente clave en la determinación de la red de producción primaria (Kriedemann y Cromer, 1996). La fotosíntesis responde a la variación de nitrógeno en la hoja, porque puede afectar positivamente la eficiencia en el uso de la radiación (Kriedemann y Cromer, 1996).

La mayor disponibilidad de nutrientes originan una expansión del dosel, y por consiguiente un aumento en la asimilación de CO<sub>2</sub> y crecimiento del fuste. La eficiencia en el uso del nutriente para producir madera es consecuencia de la interacción de los procesos de asimilación y distribución, los cuales son sensibles a los nutrientes (Kriedemann y Cromer, 1996).

La eficiencia en el uso de los nutrientes, ha sido un tema estudiado por muchos autores. Algunos autores señalan que en especies de *Eucalyptus* con patrones de crecimiento equivalentes, podrían establecerse que cuando mayor concentración foliar de nutriente, mayor es también la eficiencia en absorción o agotamiento de reservas nutritivas del suelo, con el objeto de vencer la competencia interespecífica, pero menor será la eficiencia en la utilización de los nutrientes. El razonamiento contrario es válido para menores concentraciones de nutrientes (Macedo *et al.*, 1996).

El área de la hoja es un parámetro dominante para estudiar muchos procesos fisiológicos asociados a los árboles. El Índice de Área Foliar (IAF, área del follaje por unidad de área de sombra proyectada en el suelo) se correlaciona altamente con fotosíntesis, la transpiración, la evapotranspiración, la productividad y rendimiento proporcional (McPherson y Peper, 1998). Pinkard, (1992) estudiando diversas intensidades de poda en *E. nitens*, afirma que la reducción de copa afectó negativamente los incrementos diamétricos y de altura, pero aumentó la eficiencia en la utilización de C. La reducción en productividad está directamente relacionada con una reducción en IAF. Esto pone en evidencia que un aumento en IAF conlleva a un incremento en la producción de biomasa dada por un aumento en DAP y altura total.

Se han encontrado claras relaciones entre el peso específico de la hoja, el índice de área foliar y variables de altura y diámetro para plantas jóvenes y árboles adultos establecidos en el dosel. El peso específico está definido como el peso seco por el área de la unidad foliar. Además se ha verificado que el aumento del tamaño de las hojas, acompañado de un aumento en Peso Foliar Específico (y un eventual aumento en el

índice de área foliar IAF), está asociado con el modelo de crecimiento que maximiza la interceptación de luz y por factores favorables como el aumento en la oferta de nutrientes del suelo (King, 1999). Goya y Dalla Tea (1997) sugieren que el incremento de área foliar y aumento en biomasa foliar (y del IAF) en *E. grandis* de 14 años, está directamente relacionado con el incremento en diámetro, altura, área basal y volumen de madera, los cuales a su vez se relacionan fuertemente con el tipo de suelo, donde la disponibilidad de agua está probablemente influenciando la capacidad de crecimiento. Además sostienen que distintos suelos determinan distintos turnos de máxima producción.

Existe una relación directa entre el IAF y la concentración de nutrientes, especialmente de nitrógeno, que participa directamente en el proceso de fotosíntesis (King, 1999). La fotosíntesis en los árboles del dosel cerrado en una plantación forestal se hace cada vez más eficiente por unidad de área foliar y se relaciona directamente con el aumento en la concentración de nitrógeno y Peso Foliar Específico (King, 1999).

El Área Foliar Específica ha sido muy utilizada con los mismos fines por muchos autores y corresponde al área de la hoja por unidad de peso. Clair (1997) concluye que en árboles de *E. globulus* y *E. grandis*, la baja concentración foliar de N y P, está en directa relación con la reducción del área foliar específica, tamaño de la hoja y crecimiento. En concordancia con esto, Kriedemann y Cromer, (1996) indican que se produce un aumento en el área foliar específica como respuesta a una mayor disponibilidad de nutrientes.

Según Bussotti *et al.*, (2000) dentro de los parámetros morfológicos del follaje (área foliar, peso seco, masa foliar por área, espesor foliar y densidad foliar), la masa de la hoja por unidad de área podría explicar mejor las diferencias de sitio.

Hunt *et al.*, (1999) encontraron una mayor Área Foliar Específica en el tercio inferior de la copa, comparada con el tercio superior, lo que concuerda con lo que describe Niinemets (1996), sobre un gran número de especies arbóreas distintas, donde el Peso Foliar por unidad de Área (parámetro inverso al Área Foliar Específica) fue mayor en el tercio superior, siendo las hojas más grandes comparadas con el tercio inferior, lo que sugiere que esta diferencia se debe básicamente al aumento del peso de la hoja y esto a su vez se explica por un aumento en la cantidad de nutrientes en conjunto con la actividad fotosintética.

Se presentan evidencias de que *E. globulus* responde mejor a la proximidad del óptimo nutricional, produciendo una mayor área foliar que una mejora en la capacidad fotosintética o por una acumulación de nitrógeno en las hojas (en formas insolubles o como nitrato). Sin embargo, la acumulación de nitrógeno en las hojas es una respuesta clara que permite un incremento en la tasa de fotosíntesis en cortos períodos. La acumulación de nutrientes en los tejidos y la redistribución de nutrientes en las plantas son los procesos claves en el entendimiento de las respuestas de los *Eucalyptus* a los fertilizantes (Pereira *et al.*, 1996).

En cuanto a la medición de área foliar, McPherson y Peper (1998) compararon la exactitud de cinco métodos para estimar el índice de área foliar, en árboles urbanos de *Morus alba* L. y *Prunus serotina* var. *rufula* Ehrh. Los métodos incluyeron el uso de cuatro instrumentos (Cepotómetro AccuPAR, CI-100 Analizador de Dosel Arbóreo, Procesador de Imagen con el sistema AgVision, LICOR LAI-2000 Analizador de Dosel Arbóreo) y la

aplicación de una ecuación de regresión logarítmica. Los resultados indicaron el potencial del Procesador de Imagen para estimar LAI, resultando el método con una mayor probabilidad de exactitud en la estimación. Además de la facilidad de utilizar en terreno este instrumento, junto con CI-100 y las ecuaciones de regresión. Sin embargo, todos los métodos mostraron sesgo al proveer estimaciones de LAI, las cuáles no aumentaron mientras que LAI real aumentó al examinar por separado los datos de ambas especies, siendo necesario más estudios que incorporen tamaño de muestra más grande, mayor variedad de especies, de edades y arquitectura de corona distintas.

### 2.7.1.- Relaciones Alométricas

Algunos investigadores concuerdan en que la medición del área foliar, es un buen indicador de respuesta a la fertilización, que precede al aumento de las variables dasométricas debido a que los árboles privilegian la fotosíntesis (Aguirre, 1997). En este sentido, la incorporación del área foliar a las decisiones de manejo como herramienta integradora del tamaño de los árboles, densidad del rodal y suministro de recursos (agua y elementos nutritivos) es recomendable (Aparicio, 2001).

Se han desarrollado muchos trabajos que involucran la estimación del área foliar mediante relaciones alométricas y que relacionan el área foliar con algunas variables dasométricas, tales como el área de albura y el área de la sección transversal a la altura de la base de la corona, el área de la albura a la altura del pecho y el área basal. Se ha encontrado que todas estas variables predicen satisfactoriamente el área foliar (Hunt *et al.*, 1999). El área de la albura es útil en estudios donde el modelo de productividad es importante. El volumen de albura puede ser usado como correlación de respiración con el área foliar relacionado estrechamente con la productividad, y así la relación entre los dos puede proporcionar una estimación de eficacia en el estado de crecimiento (Hunt *et al.*, 1999). Sin embargo, si el objetivo es una estimación del área foliar (o su distribución), la ventaja ganada es pequeña si se usa el área de la albura en lugar del área basal (Hunt *et al.*, 1999). Además el área de la albura es difícil de determinar con exactitud, ya que los fustes presentan a menudo irregularidad. El área basal es una medida de la dimensión del árbol fácil de obtener y tiene una función práctica en el seguimiento del desarrollo de los árboles (Hunt *et al.*, 1999), mostrando ser conveniente para la estimación del área foliar en *E. nitens*, siendo también satisfactoria su utilización para *Acacia dealbata* (Hunt *et al.*, 1999).

Para estimar el área foliar en un estudio de productividad con *Fraxinus uhdei* en Hawaii, se utilizaron relaciones alométricas para estimar el área de la albura en base al área basal. Con el área de la albura se pudo estimar satisfactoriamente el área foliar (Ares y Fownes, 2000).

### **3.- OBJETIVOS**

#### **3.1.- Objetivo general**

Evaluar el efecto de la fertilización en plantaciones de *E. globulus* y *E. nitens* de siete años, establecidas en la Comuna de Máfil, Provincia de Valdivia.

#### **3.2.- Objetivos específicos**

Evaluar diferencias en los incrementos de DAP, altura, área basal y volumen entre los tratamientos aplicados.

Evaluar el efecto de la fertilización sobre la concentración de nutrientes a nivel foliar.

## **4.- MATERIAL Y MÉTODO**

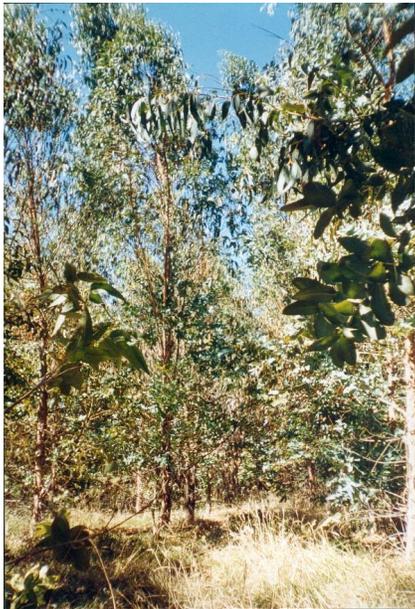
### **4.1.- Material**

#### **4.1.1.- Ubicación del ensayo**

El ensayo fue instalado en marzo de 1999, en el predio Pampa Gorda, de propiedad de la empresa Forestal Valdivia S.A., el cual posee una superficie de 606,6 hectáreas y se encuentra ubicado en la Comuna de Máfil, Provincia de Valdivia, Décima Región. En dicho lugar se encuentran plantaciones de *Eucalyptus globulus* y *Eucalyptus nitens*, establecidas en la temporada 1993 (Figuras 5 y 6).

#### **4.1.2.- Características de la plantación**

Para realizar la plantación, se utilizaron plantas a raíz desnuda. Previo a ello, se realizó una preparación al suelo con tractor, que consistió en un subsolado tres puntas, las que intervinieron el suelo hasta 40 cm de profundidad. Luego se repasó con disco de arado rastra formando camellones. Se plantó a una densidad de 1.666 árboles por hectárea, con un espaciamiento de 2 x 3 m. En el momento de la fertilización (marzo de 1999), los árboles de siete años de edad, no presentaban competencia por malezas ni habían tenido intervención previa.



**Figura N° 5:** Plantación 1993, *E. globulus*, predio Pampa Gorda. Foto: marzo 1999.



**Figura N° 6:** Plantación 1993, *E. nitens*, predio Pampa Gorda. Foto: marzo 1999.

#### 4.1.3.- Características edáficas y climáticas

El predio se encuentra sobre una formación de ceniza volcánica. Las principales propiedades físicas y químicas del suelo, en sus primeros 30 cm. de profundidad, se resumen en el cuadro 9.

**Cuadro 9.** Propiedades físicas y químicas del suelo, predio Pampa Gorda.

<b>Propiedad</b>	<b>Valores medios</b>
Densidad aparente (g/cm <sup>3</sup> )	0,83
pH (1:2,5)	5,5
Materia orgánica (%)	19,9
N disponible (kg/ha)	49,8
P disponible (kg/ha)	4,7
K disponible (kg/ha)	278,2
Ca disponible (kg/ha)	5,0
Textura	Franca a Franco-limosa.

El clima presente en el predio es Marino Fresco, caracterizado por una temperatura media anual de 12,5°C, con una máxima media en enero de 27,1°C y una mínima media en junio de 3,3°C. El período libre de heladas es de tres meses, de diciembre a febrero. El régimen hídrico se caracteriza por una precipitación media anual de 2.138,6 mm, siendo agosto al mes más lluvioso, con 328 mm (Novoa y Villaseca, 1989).

#### 4.1.4.- Fertilizantes

En el estudio se emplearon fertilizantes minerales que aportan nitrógeno, fósforo y calcio. Los productos se describen en el cuadro 10.

**Cuadro 10.** Contenido de nutriente en cada producto utilizado para la fertilización.

PRODUCTO	ELEMENTO	CANTIDAD (%)
Urea	Nitrógeno	46 % de N <sub>2</sub>
Fosfato mono amónico	Fósforo	50 % de P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> y 10 % de N <sub>2</sub>
Soprocal	Calcio	80 % de CaO

## 4.2- Método

### 4.2.1- Diseño experimental

Para el presente estudio se consideró un diseño experimental de bloques completamente aleatorizado, con arreglo factorial de dos factores 3x2 y tres repeticiones, donde los factores fueron dosis de fertilizantes en tres niveles y especie arbórea en dos niveles.

### 4.2.2.- Tratamientos

Corresponden a las seis combinaciones de tres niveles de fertilización y dos especies arbóreas. Los tres niveles de fertilización, incluyen un tratamiento testigo (sin fertilización), en cada especie; una primera dosis de 300 kg/ha de fósforo, 200 kg/ha de nitrógeno y 200 kg/ha de calcio (180, 120 y 120 g por planta respectivamente); y

finalmente una segunda dosis de 400 kg/ha de fósforo, 300 kg/ha de nitrógeno y 300 kg/ha de calcio (240, 180 y 180 g por planta respectivamente).

Cada tratamiento se aplicó en tres bloques o repeticiones. En el cuadro 11 se describen los tratamientos aplicados.

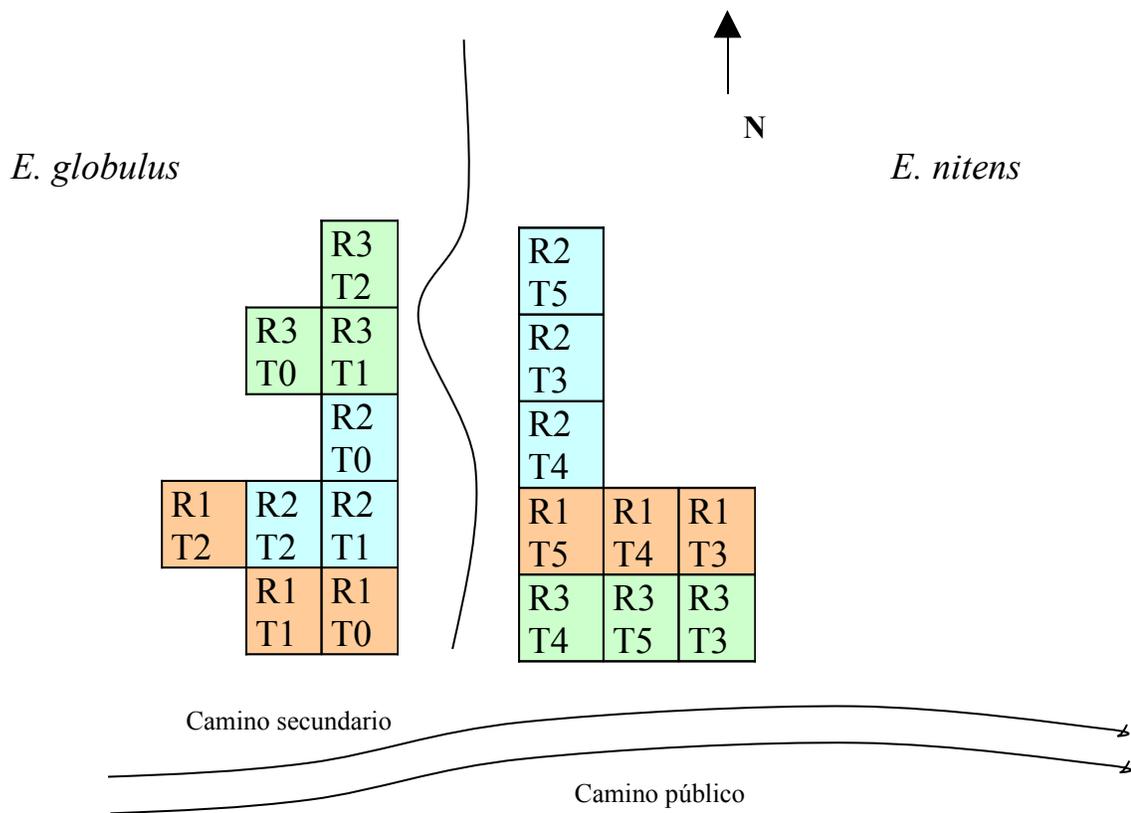
**Cuadro 11.** Descripción de los tratamientos establecidos en el ensayo.

TRATAMIENTO	DOSIS DE FERTILIZANTE	ESPECIE
Tratamiento 0 : (T0: TESTIGO)	No recibió fertilización.	<i>E. globulus</i>
Tratamiento 1 : (T1: DOSIS 1)	180 gramos por planta de fósforo + 120 gramos por planta de nitrógeno + 120 gramos por planta de calcio .	<i>E. globulus</i>
Tratamiento 2 : (T2: DOSIS 2)	240 gramos por planta de fósforo + 180 gramos por planta de nitrógeno + 180 gramos por planta de calcio.	<i>E. globulus</i>
Tratamiento 3 : (T3: TESTIGO)	No recibió fertilización	<i>E. nitens</i>
Tratamiento 4 : (T4: DOSIS 1)	180 gramos por planta de fósforo + 120 gramos por planta de nitrógeno + 120 gramos por planta de calcio .	<i>E. nitens</i>
Tratamiento 5 : (T5: DOSIS 2)	240 gramos por planta de fósforo + 180 gramos por planta de nitrógeno + 180 gramos por planta de calcio.	<i>E. nitens</i>

Para determinar las dosis de fertilización, se consideraron numerosas experiencias similares provenientes de Australia, Brasil y Sudáfrica. Coincidiendo con éstas, en Chile desde 1989 se fertilizan anualmente alrededor de 40 mil hectáreas de *Eucalyptus*, principalmente entre la VI y X Región, con una mezcla de elementos esenciales que incluye nitrógeno y fósforo entre otros. Las dosis fluctúan entre 70 y 350 g por planta (100 y 550 kg/ha aproximadamente) y se aplican como fertilización de apoyo. Las empresas del Grupo Arauco, han incorporado la aplicación de fertilizantes con los elementos mencionados en las dosis indicadas, durante el establecimiento, a pocos años de la cosecha y después de raleos (Toro, 1995). Las altas tasas de crecimiento en respuesta a las dosis de fósforo, demandan un eficiente transporte de calcio hasta los tejidos en crecimiento para la síntesis y formación de pared celular (Oliva *et al.*, 1995). Por ello se hizo necesaria la aplicación de calcio, cuya dosis está incluida dentro del rango anteriormente mencionado.

#### 4.2.3.- Instalación del ensayo

Se eligieron dieciocho unidades muestrales como parcelas de ensayo, nueve para cada especie. La unidad muestral quedó definida en treinta y seis árboles, con veintidós árboles que componen la parcela de medición, dejando una hilera en los costados para eliminar posibles efectos de borde entre tratamientos. El ensayo se ilustra en la figura 7.



**Figura N° 7:** Ensayo predio Pampa Gorda, plantación *Eucalyptus* 1993.

**4.2.4.- Aplicación de fertilizantes**

En marzo de 1999 se realizó la aplicación de los productos fertilizantes fosfato mono amónico, urea y soprocal. La fertilización se realizó al voleo.



**Figura N° 8:** Aplicación de fertilizantes en plantación *E. globulus*.



**Figura N° 9:** Aplicación de fertilizantes en plantación de *E. nitens*.

#### 4.2.5.-Mediciones y análisis foliares

El estudio contempló cuatro mediciones de altura y DAP y tres análisis foliares en total.

Se realizaron cuatro mediciones dasométricas; en marzo y noviembre de 1999, otra en marzo del 2000 y por último en marzo del 2001. También se concretaron tres análisis foliares, en marzo de 1999, antes de la fertilización, marzo del 2000 y septiembre del 2001.

**Cuadro 12.** Periodicidad de las mediciones y muestreo foliar realizadas en el estudio.

Medición N°	Fecha	Meses Acumulados <sup>1</sup>	Variabes Medidas	Muestreo Foliar N°	Fecha
1	Marzo 1999	0	DAP y altura	1	Marzo 1999
2	Noviembre 1999	8	DAP y altura	2	Marzo 2000
3	Marzo 2000	12	DAP y altura	3	Septiembre 2001
4	Marzo 2001	24	DAP y altura		

Las mediciones de DAP y altura se realizaron con huincha diamétrica y con Vértex respectivamente.

<sup>1</sup> Meses acumulados desde la aplicación de los tratamientos



**Figura N° 10:** Vértex, instrumento utilizado en la medición de alturas.

Para llevar a cabo el análisis foliar se extrajeron muestras de hojas correspondientes al tercio superior del árbol, para así capturar las que pertenecían al último período de crecimiento, el instrumento utilizado para la extracción fue un tijerón que va en la parte superior de una vara. En cada especie, se tomó una muestra compuesta de por lo menos seis árboles por tratamiento, enviándose lo antes posible a laboratorio para su análisis. El mismo procedimiento es llevado a cabo en cooperativas estadounidenses para extracciones de muestras foliares (Moorhead, 1997). En caso de no poder mandar las muestras el mismo día de la extracción, se mantuvieron refrigeradas para evitar la deshidratación. El laboratorio que realizó los análisis fue Agrolab Ltda. Cada análisis incluyó información del peso seco foliar. Se ha constatado que el tercio superior presenta hojas más grandes y con mayor peso (Niinemets, 1996), lo cual sugiere que ésta es la posición de copa adecuada para evaluar efectos de fertilización.

También se contempló una estimación de área foliar, el cual es un buen indicador de respuesta a la fertilización, que precede al aumento de las variables dasométricas debido a los árboles privilegian la fotosíntesis (Van den Driessche, 1974). Para esto se tomaron al menos 60 hojas por tratamiento en cada especie, aprovechando la extracción del análisis foliar marzo 2000. La estimación del área foliar se realizó en microsoft Autocad 14. Aún cuando esta estimación no está exenta de sesgo, aporta información útil en el entendimiento de los cambios a nivel foliar (McPherson y Peper, 1998).

#### 4.2.6.- Análisis estadístico

Para evaluar las respuestas obtenidas y determinar si existían diferencias entre los tratamientos, se realizaron análisis de varianza para un nivel de significancia de un 5 % y 1 %, según el modelo:

$$Y_{ijk} = \mu + \beta_i + A_j + B_k + (AB)_{jk} + \xi_{ijk}$$

con,  $i = 1,2,3.$

$j = 1,2,3.$

$k = 1,2.$

donde,

$Y_{ijk}$ : es la observación de la variable respuesta tomada del i-ésimo bloque sometido al j-ésima dosis de fertilización en el k-ésimo nivel del factor especie.

$\mu$  : es la media general.

$\beta_i$ : es el efecto del i-ésimo bloque, o repetición del experimento.

$A_j$ : es el efecto del j-ésimo nivel del factor dosis de fertilizante.

$B_k$  : es el efecto del k-ésimo nivel del factor especie.

$(AB)_{jk}$  : es el efecto de la interacción del j-ésimo nivel del factor dosis de fertilizante con el k-ésimo nivel del factor especie.

$\xi_{ijk}$ : es el error aleatorio.

Las variables analizadas fueron el incremento en altura, DAP, área basal y volumen.

Para verificar la normalidad de los datos, se realizaron las pruebas de normalidad Chi-cuadrado y Kolmogorov-Smirnov para los DAP, las cuales confirmaron la normalidad de los datos (ver apéndice 6). Estas pruebas se realizaron utilizando el Software Statistica 5.0.

También se desarrollaron cuatro procedimientos de evaluación del estado nutritivo de los árboles, tomando como base el análisis foliar. En primer lugar se utilizó la comparación de niveles de concentración de nutrientes ofrecidos como óptimos, típicos o de referencia por distintos autores. Luego se obtuvieron las relaciones más importantes entre los elementos y se comparó con los óptimos encontrados en la bibliografía. En tercer lugar se utilizó la fórmula del porcentaje de desviación con respecto al óptimo (DOPx) (Brañas, 2000).

$$DOPx = [Cx / Cref - 1] * 100$$

Sin embargo, es posible utilizar la siguiente fórmula simplificada, que calcula el porcentaje de nutriente x respecto al óptimo, para ilustrar los elementos nutritivos que se alejan más del óptimo:

$$OPx = [Cx / Cref] * 100$$

Donde:

Cx : Concentración del elemento x obtenida.

Cref: Concentraciones consideradas como óptimas.

Los niveles de nutrientes foliares de referencia para ambas especies se presentan en el cuadro 13 y están basados en los niveles óptimos mínimos, observados tanto en Portugal, España, Brasil y Australia.

Finalmente se llevó a cabo un poderoso método de evaluación nutricional llamado análisis vectorial.

Tomando como base los cambios en el peso de las hojas, concentración foliar de nutrientes y contenido de nutrientes, se construyeron gráficos que ayudaron a detectar posibles efectos de la fertilización. A continuación se presentan los siguientes datos presentes en la construcción de gráficos. La concentración de elementos y peso de las hojas están expresados en valores relativos al control = 1, que para el caso del presente estudio, está representado por el tratamiento sin aplicación para cada especie. El contenido relativo del elemento es el producto entre la concentración relativa multiplicado por el peso relativo de las hojas.

Es posible que las concentraciones de nutrientes foliares se diluyan, debido a incrementos en el crecimiento, ya que la concentración es una medida del porcentaje de peso seco. En el caso del presente estudio, se asume similares condiciones de humedad para todos los tratamientos.

## **5.-RESULTADOS Y DISCUSIÓN**

Se analizaron las diferencias entre los tratamientos en cuanto a las variables dasométricas, concentración de nutrientes en el follaje y mediante la técnica de análisis vectorial de follaje.

### **5.1.- Variables Dasométricas**

Se realizaron diversos análisis estadísticos para probar diferencias en los incrementos de las variables DAP, altura, área basal y volumen para las distintas dosis empleadas y se analizaron también las eventuales diferencias en el incremento de estas variables entre ambas especies.

Los resultados fueron los siguientes:

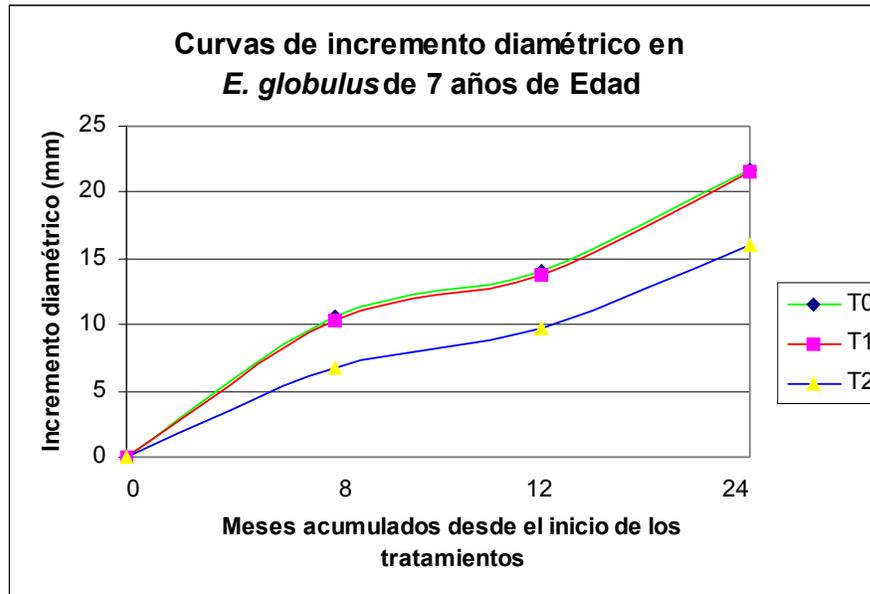
#### **5.1.1.- Variable DAP**

Para esta variable fue necesario realizar un análisis de covarianza con un nivel de confianza de 95%, el cual arrojó que no existieron diferencias significativas entre las dosis utilizadas. Tampoco hubo diferencias entre las especies estudiadas en cuanto a los incrementos diamétricos.

Un 99% de confianza, no admitió análisis de covarianza, debiendo realizarse un análisis de varianza. Dicho análisis arrojó que no existieron diferencias en los incrementos diamétricos producto de las dosis aplicadas, pero sí por la especie estudiada, siendo *E. nitens* muy superior en cuanto a los incrementos diamétricos comparado con *E. globulus*.

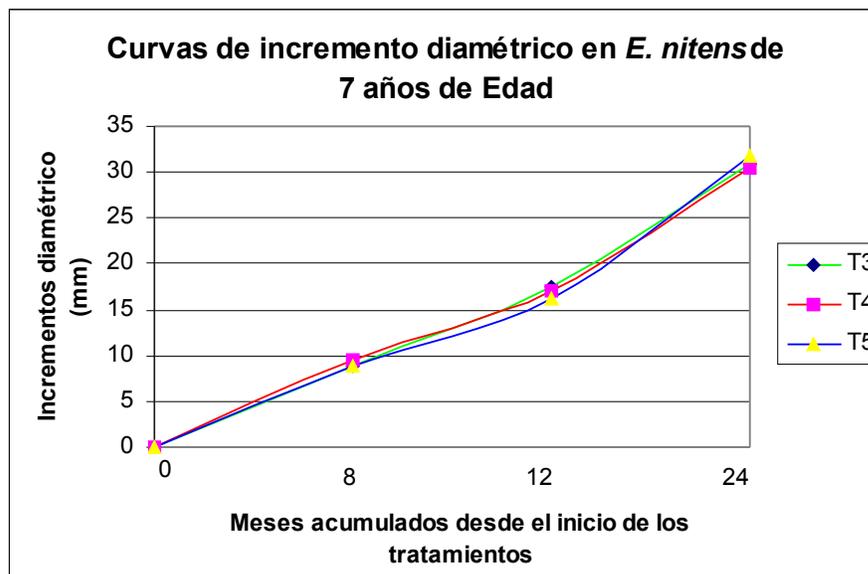
Se realizaron comparaciones múltiples entre las variables mediante el método de Sheffe, las cuales confirmaron la diferencia en incrementos diamétricos causada por la ventaja genética en cuanto a crecimiento, que presenta en la zona *E. nitens*.

La figura 11 muestra las curvas de incremento diamétrico en *E. globulus* para los cuatro períodos de medición. A pesar de no haber diferencias estadísticas en cuanto a los incrementos diamétricos por dosis de tratamiento, se puede observar que los tratamientos T0 y T1 se presentan prácticamente iguales, lo que indica la nula respuesta en incrementos diamétricos para *E. globulus*. El tratamiento T2 muestra los menores incrementos en todos los períodos de medición.



**Figura N° 11.** Curvas de incremento diamétrico en *E. globulus* para los cuatro períodos de medición.

La figura 12 muestra las curvas de incremento diamétrico en *E. nitens* para los cuatro períodos de medición. La inexistencia de diferencias estadísticas se refleja en las curvas de incrementos diamétricos. Se puede observar que todos los tratamientos son muy similares en cuanto a los incrementos diamétricos. Sin embargo, se hace notorio que T5 sobrepasa levemente a T4 y T3, siendo los últimos dos tratamientos mencionados prácticamente iguales. Esto estaría indicando una cierta tendencia de T5 a responder favorablemente a la fertilización.



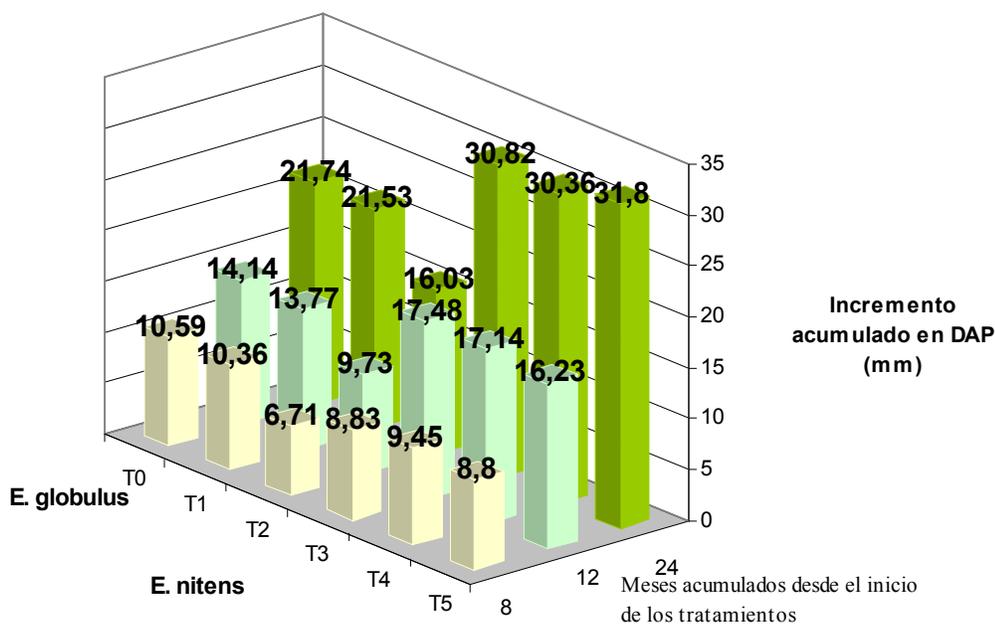
**Figura N° 12.** Curvas de incremento diamétrico en *E. nitens* para los cuatro períodos de medición presentes.

Las ilustraciones anteriores plantean la existencia de cierta tendencia de respuesta en cuanto a los incrementos diamétricos para ambas especies por separado.

Al observar la evolución presentada en los incrementos diamétricos (figura 13), se puede hacer notar la similitud de los incrementos en ambas especies para el primer período de medición. A partir del segundo período ya se observa una diferencia entre ambas especies.

Un comportamiento que se debe hacer notar es el aumento paulatino en los diámetros para T5, que al comienzo fue más bajo en *E. nitens* y terminó siendo más alto, lo que indicaría un aumento mayor de la biomasa foliar.

### Incrementos acumulados en DAP por período de medición



**Figura N° 13.** Incrementos diamétricos acumulados en ambas especies para cada período de medición.

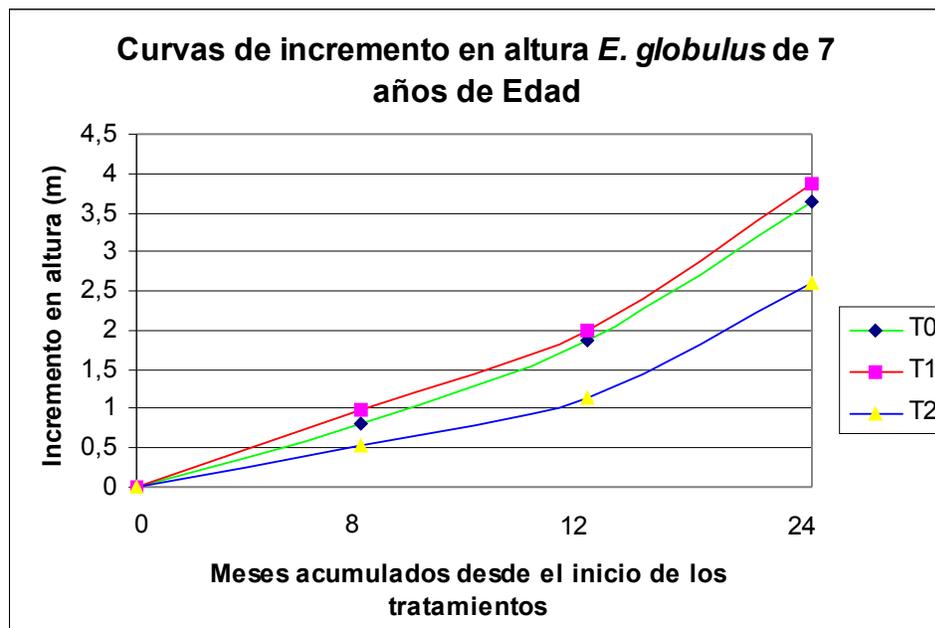
La extensa bibliografía sugiere que el primer efecto de la fertilización se reflejaría en un incremento de la biomasa foliar, lo cual estimularía aumentos en los diámetros (Pinkard, 1992; Goya y Dalla Tea, 1997; Hunt *et al.*, 1999; Ares y Fownes, 2000). De ahí, la importancia de los incrementos diamétricos, en cuanto a una posible respuesta.

Entre marzo 1999 – marzo 2001 el análisis estadístico indicó que no existieron diferencias significativas en la fertilización por efecto de las dosis de fertilizantes, confirmando sólo diferencias por especie (Ver apéndice 1.3).

#### 5.1.2.- Variable altura

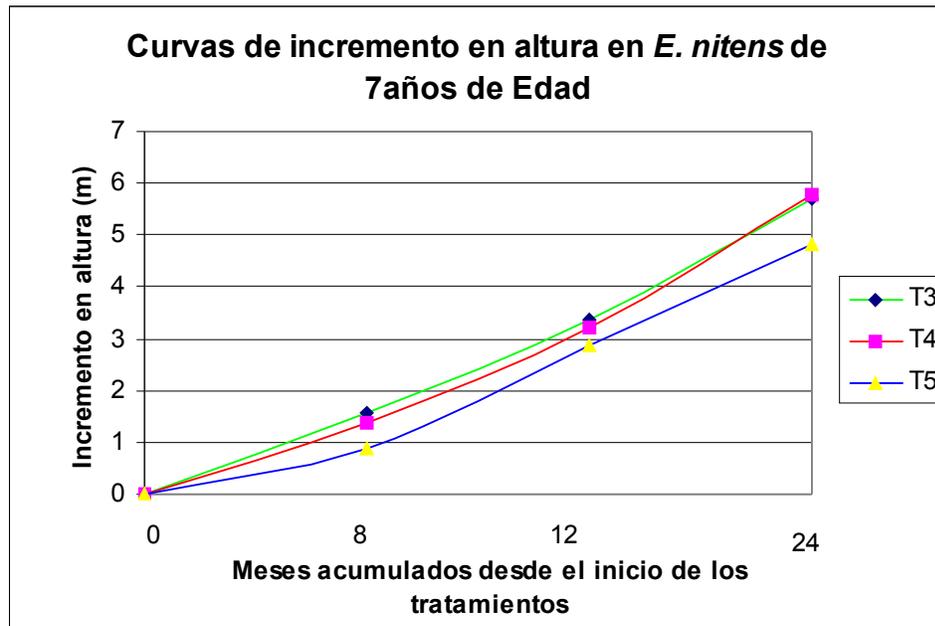
Al analizar esta variable, tanto para los niveles de confianza del 95%, como para un 99%, fue necesario realizar un análisis de covarianza. Estos análisis arrojaron que no existieron diferencias estadísticas entre los incrementos de altura por causa de las dosis utilizadas, ni por las especies estudiadas.

La figura 14 muestra las curvas de incremento de altura en *E. globulus* para los cuatro períodos de medición. El comportamiento de los incrementos en altura fue muy similar al de incrementos diamétricos para esta especie. Como se puede observar, el tratamiento que presenta los mayores incrementos en altura es T1, que es muy parecido a T0, siendo T2, el tratamiento con una mayor aplicación de fertilizantes, el que presenta los menores incrementos en todos los períodos de medición. Esto estaría indicando una leve tendencia de T1 a responder positivamente a la aplicación.



**Figura N° 14.** Curvas de incremento en altura, *E. globulus*, para los cuatro períodos de medición.

La figura 15 muestra las curvas de incremento en altura para *E. nitens* durante los cuatro períodos de medición. A diferencia de lo ocurrido con los incrementos en DAP, T5 contiene los incrementos más bajos en todos los períodos. Los tratamientos T4 y T3, se presentan muy similares, siendo T4 levemente superior.

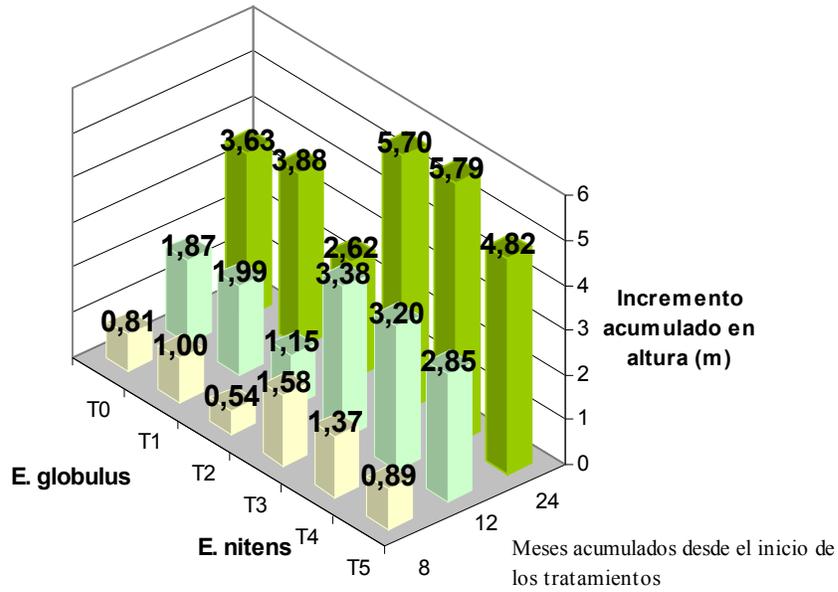


**Figura N° 15.** Curvas de incremento en altura, *E. nitens* durante los cuatro períodos de medición.

Una tendencia muy distinta se reflejó para los incrementos diamétricos en esta especie (ver fig. 13), donde el tratamiento con los mayores incrementos fue T5.

La evolución presentada en cuanto a los incrementos de altura (figura 16), se caracteriza por la marcada diferencia entre ambas especies, desde el primer período de medición.

**Incrementos acumulados en altura por período de medición**



**Figura N° 16.** Incrementos en altura acumulados en ambas especies para cada período de medición.

Para la variable altura durante el período marzo 1999 – marzo 2001 no hubo diferencias estadísticamente significativas por efecto de dosis, pero si por especie (ver apéndice 2.3).

### 5.1.3.- Área basal

Al comparar el comportamiento de ambas especies en cuanto a los incrementos en área basal, se puede observar que se acentúa la diferencia entre ambas especies.

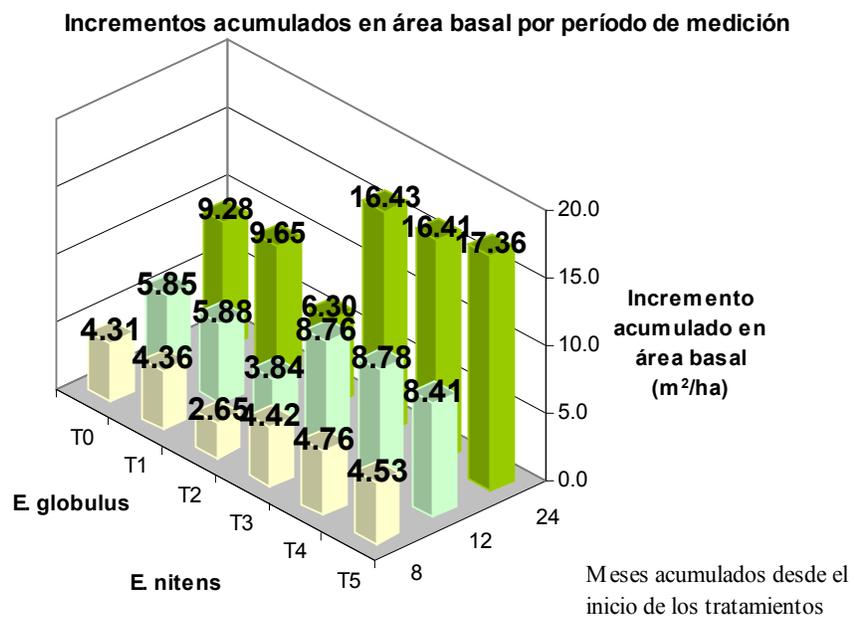


Figura N° 17. Incrementos en área basal acumulados en ambas especies para cada período de medición.

La figura 17 muestra la escasa diferencia inicial presentada en incrementos de área basal entre dosis de aplicación y especie. Sin embargo, se hace notoria la diferencia entre especies a medida que pasa el tiempo, presentándose significativamente distintas para un 99% de probabilidad entre especies. Posiblemente en un mediano plazo, la diferencia entre las dosis de fertilizante dentro de una misma especie también se vislumbra, al menos para *E. nitens*, que presentó una tendencia a responder positivamente a la fertilización.

#### 5.1.4.- Volumen del fuste

Para estimar el incremento en volumen fustal en ambas especies se utilizó la siguiente fórmula, que representa el volumen de un cono:

$$V = (AB) \cdot \frac{H}{3}$$

Donde V es el volumen por hectárea en m<sup>3</sup>;

AB es el área basal por hectárea en m<sup>2</sup>;

H la altura media en metros.

Si bien es cierto, esta fórmula entrega resultados sesgados, la aproximación es lo suficientemente útil para efectos de comparación (Harper *et al.*, 1999).

Las curvas de incremento de volumen y las curvas de tendencia de la respuesta son muy parecidas a las de incremento en altura. Esto refleja la fuerte influencia de esta variable en la estimación del volumen del fuste.

Para *E. globulus* se presentaron incrementos similares de diámetro en T1 y T0, pero con incrementos superiores en altura para T1. Esto explica el mayor incremento volumétrico para este tratamiento, lo que indicaría cierta respuesta positiva de este tratamiento a la fertilización. Para T2 los incrementos fueron los más bajos, tanto en diámetro como en altura, lo que repercute en un incremento menor en volumen.



### 5.2.1.- Concentración de nutrientes a nivel foliar

El nivel inicial de nutrientes foliares fue comparado con los de referencia obtenidos de la bibliografía (cuadro 13).

Se pudo observar que previo a la fertilización (cuadro 14) la concentración de nutrientes a nivel foliar se presentó, en términos generales, dentro de los rangos óptimos, para ambas especies, teniendo en consecuencia un buen nivel de fertilidad del suelo previo a la aplicación de fertilizantes, lo cual se basa en la alta correlación entre nivel foliar de nutrientes y fertilidad del suelo (Judd *et al.*, 1996).

**Cuadro 13.** Niveles foliares de nutrientes tomados como referencia.

Especie	NIVELES FOLIARES DE NUTRIENTES									
	N	P	K	Ca	Mg	Zn	Mn	Fe	Cu	B
	%					Ppm				
<i>E. globulus</i>	1,18	0,07	0,49	>0,3	>0,08	>7,1	>100	33	5	>12
<i>E. nitens</i>	1,4	0,08	0,39	>0,42	>0,08	>8,6	>229	27	6	>12

**Cuadro 14.** Concentración foliar de nutrientes en *E. globulus* y *E. nitens*. Predio Pampa Gorda, previo a la fertilización, marzo 1999.

TRATAMIENTO	CANTIDAD DE NUTRIENTES A NIVEL FOLIAR									
	N	P	K	Ca	Mg	Zn	Mn	Fe	Cu	B
	%					ppm				
T0 <i>E. globulus</i>	1,85	0,16	0,94	0,78	0,15	14	133	40	16	17
T1 <i>E. globulus</i>	1,62	0,11	0,67	1,16	0,15	11	142	38	15	23
T2 <i>E. globulus</i>	2,2	0,17	0,71	0,73	0,18	17	131	35	17	22
T3 <i>E. nitens</i>	1,85	0,14	0,61	0,71	0,14	15	151	34	13	19
T4 <i>E. nitens</i>	2	0,14	0,62	0,64	0,11	13	138	34	12	15
T5 <i>E. nitens</i>	2,11	0,14	0,61	0,68	0,12	15	149	38	13	27

Fuente: Agrolab.

**Cuadro 15.** Concentración foliar de nutrientes en *E. globulus* y *E. nitens*. Predio Pampa Gorda, marzo 2000.

TRATAMIENTO	CANTIDAD DE NUTRIENTES A NIVEL FOLIAR									
	N	P	K	Ca	Mg	Zn	Mn	Fe	Cu	B
	%					ppm				
T0 <i>E. globulus</i>	1,83	0,11	0,55	0,6	0,13	20	199	25	6	27
T1 <i>E. globulus</i>	1,7	0,1	0,63	0,61	0,11	21	210	30	5	30
T2 <i>E. globulus</i>	1,39	0,09	0,53	0,81	0,12	20	226	27	8	31
T3 <i>E. nitens</i>	1,81	0,13	0,89	0,85	0,17	18	215	23	10	13
T4 <i>E. nitens</i>	2,21	0,16	1,05	0,69	0,16	26	211	39	11	21
T5 <i>E. nitens</i>	2,63	0,21	1,44	0,72	0,19	31	190	37	14	28

Fuente: Agrolab.

**Cuadro 16.** Concentración foliar de nutrientes en *E. globulus* y *E. nitens*. Predio Pampa Gorda, septiembre 2001.

TRATAMIENTO	CANTIDAD DE NUTRIENTES A NIVEL FOLIAR									
	N	P	K	Ca	Mg	Zn	Mn	Fe	Cu	B
	%					Ppm				
T0 <i>E. globulus</i>	1,65	0,11	0,76	1,17	0,17	21	232	40	10	23
T1 <i>E. globulus</i>	1,48	0,12	0,61	1,41	0,17	17	248	33	10	25
T2 <i>E. globulus</i>	1,64	0,11	0,69	1,50	0,18	19	222	33	9	25
T3 <i>E. nitens</i>	1,41	0,10	0,55	0,74	0,14	11	245	27	7	23
T4 <i>E. nitens</i>	1,09	0,09	0,48	0,58	0,12	12	169	25	6	21
T5 <i>E. nitens</i>	1,57	0,12	0,73	0,69	0,13	10	195	37	8	34

Fuente: Agrolab.

Al comparar el período de análisis foliar marzo 2000 (cuadro 15) con los datos de referencia (cuadro 13), se puede observar que para *E. globulus* los niveles de nutrientes estuvieron sobre los mínimos establecidos como óptimos para todos los tratamientos, excepto Fe, que está levemente bajo el mínimo, en los tres tratamientos. Para *E. nitens* el estado nutritivo fue similar a *E. globulus*, es decir, en general todos los nutrientes se encontraron sobre el mínimo establecido como aceptable. Sólo Mn estuvo levemente bajo el mínimo para los tres tratamientos y Fe para el tratamiento testigo (sin aplicación, T3).

Durante el período marzo 2000, la variación porcentual en la concentración de nutrientes con respecto al período marzo 99, muestra a T5 como el tratamiento con mejor respuesta en la absorción de N, P, K, Mg, Zn y Cu, ocupando además el segundo lugar en la absorción de Fe. En cuanto al Ca y B, un efecto de dilución es posible debido que los tratamientos con mayor variación porcentual son los que no recibieron fertilización, T3 y T0 respectivamente. El Mn aumentó más en T2 y Fe, en T4 (cuadro 17).

El segundo tratamiento más beneficiado fue T4, teniendo la mayor absorción en Fe y el segundo mayor incremento en N, P, K, Mg, Zn, Mn y Cu.

El tratamiento que sigue en cuanto a incremento porcentual es poco claro, ya que T1 y T3 se encuentran en una situación muy parecida, mientras T1 absorbió más N, Zn y Fe, T3 fue mayor en K, Mg y Cu. El P se absorbió de una manera muy similar en ambos tratamientos.

El tratamiento T2 obtuvo los valores más bajos en N, P, Mg, Zn; el más alto en Mn y segundo lugar en Ca y B, siendo el tratamiento de menor respuesta a la aplicación (excepto para Ca), con incrementos en concentración de nutriente similares a T0.

Un efecto de dilución es posible, debido a la baja sufrida para T2 en los valores iniciales de nitrógeno, fósforo, potasio y magnesio. También disminuyeron notoriamente los niveles de calcio y magnesio para T1.

Lo anterior permite deducir que *E. nitens* responde mejor en cuanto a la absorción de nutrientes debido a la aplicación de fertilizantes, evidenciando una relación directa entre incremento en concentración de nutriente foliar y adición de nutrientes al suelo, contrariamente con lo que ocurre en *E. globulus*, donde las respuestas son difusas o inexistentes, salvo una leve respuesta general en T1, debido a su mayor aumento porcentual en N, P, K, Zn y Fe con respecto a T0 y T2.

Por último, para el período marzo 2000 se encontró que, para la totalidad del rodal, la mayor absorción de nutrientes y en orden decreciente, la obtuvo Zn>Mn>K>B>Mg>N>Ca>P>Fe>Cu. Esto indicaría que Zn, Mn y K pudieron haber sido los elementos más limitantes en el crecimiento, debido a su baja concentración durante marzo 99.

Además, se realizó un análisis de covarianza sobre la variación porcentual en la concentración de nutrientes en los períodos marzo 99 - marzo 2000, teniendo como covariable dependiente la concentración inicial en marzo 99, el cual indicó que hay diferencias estadísticas entre los tratamientos, debido a que existió una clara tendencia al aumento en la variación porcentual media de nutrientes a nivel foliar, con una mayor aplicación de fertilizantes (ver apéndice 5.1 – 5.2).

La mayor absorción de otros nutrientes, de los cuales no se tiene una mayor oferta, pone en evidencia un efecto a la aplicación de fertilizantes, ya que el aumento en la disponibilidad de nitrógeno y fósforo incide en un desarrollo radicular más eficiente en la captación de otros nutrientes (Smethurst and Wang, 1998).

Si bien, es cierto que hay evidencia de respuesta a la fertilización a nivel foliar, para *E. nitens*, aún no es contundente para provocar un incremento significativo en el crecimiento.

**Cuadro 17.** Variación porcentual en concentración foliar de nutrientes entre los períodos marzo 99 y marzo 2000.

TRATAMIENTO	VARIACIÓN PORCENTUAL EN LA CONCENTRACIÓN DE NUTRIENTES A NIVEL FOLIAR MARZO 99 - MARZO 2000									
	N	P	K	Ca	Mg	Zn	Mn	Fe	Cu	B
	%					ppm				
T0 <i>E. globulus</i>	-1.08	-31.25	-41.49	-23.08	-13.33	42.86	49.62	-37.50	-62.50	58.82
T1 <i>E. globulus</i>	4.94	-9.09	-5.97	-47.41	-26.67	90.91	47.89	-21.05	-66.67	30.43
T2 <i>E. globulus</i>	-36.82	-47.06	-25.35	10.96	-33.33	17.65	72.52	-22.86	-52.94	40.91
T3 <i>E. nitens</i>	-2.16	-7.14	45.90	19.72	21.43	20.00	42.38	-32.35	-23.08	-31.58
T4 <i>E. nitens</i>	10.50	14.29	69.35	7.81	45.45	100.00	52.90	14.71	-8.33	40.00
T5 <i>E. nitens</i>	24.64	50.00	136.07	5.88	58.33	106.67	27.52	-2.63	7.69	3.70

Al comparar los niveles de nutrientes del período de análisis foliar septiembre 2001 (cuadro 16), con los óptimos establecidos como referencia (cuadro 13), se puede observar que las concentraciones se presentaron para *E. globulus* por sobre los mínimos establecidos como óptimos para todos los nutrientes y tratamientos, evidenciando una corrección en cuanto al desbalance en Fe, que se presentó durante el período anterior. En cuanto a *E. nitens* presentó todos los nutrientes por sobre el mínimo establecido como aceptable (excepto N en T4). Sólo Mn estuvo levemente bajo el mínimo para T2, estableciéndose una importante corrección en los desbalances de Mn y Fe, presentes en el período anterior.

Desde marzo 1999 (período en que se realizó la fertilización) hasta septiembre 2001, casi todos los elementos bajaron sus concentraciones foliares en la mayoría de los tratamientos. En particular, *E. nitens*, presentó los valores más bajos comparado con los datos iniciales, lo que podría indicar una posible dilución por el aumento de la biomasa foliar, a diferencia de *E. globulus*, que presenta valores más altos en la concentración de los elementos.

El tratamiento T1 presentó en promedio, mayores valores para casi todos los elementos, a excepción K y B en T5 y Ca en T2. Sin embargo, estos valores fueron en su mayoría menores a los de marzo 99 (excepto P, Mg, Mn y Zn en T1).

En general para los macroelementos, todos los valores fueron menores al primer período salvo por el Ca en *E. globulus*, que aumentó su concentración en relación directa a la mayor oferta de elementos. En cuanto a los microelementos, sólo Mg, Mn y B aumentaron en ambas especies para todos los tratamientos. Zn aumentó sólo en *E. globulus*, Fe y Cu disminuyeron en ambas especies (cuadro 18).

Por otro lado, el segundo tratamiento de mayores valores en concentración de nutrientes se confunde entre ambos tratamientos testigos para ambas especies, lo que indica una clara baja en la concentración de los nutrientes en términos generales para *E. nitens*. Para *E. globulus*, la mayor concentración de nutrientes podría indicar una respuesta más lenta con respecto a *E. nitens*. Además, *E. globulus* evidenció durante este período un lento crecimiento en DAP y altura y mal estado fitosanitario, debido a la poca resistencia a las heladas y a un ataque confirmado de *Botritis* durante este período.

Por último, durante este período (septiembre 2001) se encontró que para la totalidad del rodal, la mayor absorción de nutrientes y en orden decreciente fue: Mn>Ca>B>Zn>Mg>K>Fe>P>N>Cu. De aquí se puede concluir que Mn aún mantuvo altos niveles de captación. Lo más relevante es la mayor estabilidad de K, elemento que ya no estaría siendo considerado como posible limitante del crecimiento, como en el período anterior.

Para el período marzo 99 – septiembre 2001, el análisis estadístico no admitió un análisis de covarianza, teniéndose que aplicar un análisis de varianza para la variación porcentual en la concentración de nutrientes a nivel foliar en dicho período, el cual indicó que no existieron diferencias estadísticas significativas entre los tratamientos (ver apéndices 5.4 – 5.5).

**Cuadro 18.** Variación porcentual en concentración foliar de nutrientes entre los períodos marzo 99 y septiembre 2001.

TRATAMIENTO	VARIACIÓN PORCENTUAL EN LA CONCENTRACIÓN DE NUTRIENTES A NIVEL FOLIAR MARZO 99 - SEPTIEMBRE 2001									
	N	P	K	Ca	Mg	Zn	Mn	Fe	Cu	B
	%					ppm				
T0 <i>E. globulus</i>	-10.81	-31.25	-19.15	50.00	13.33	50.00	74.44	0.00	-37.50	35.29

T1 <i>E. globulus</i>	-8.64	9.09	-8.96	21.55	13.33	54.55	74.65	-13.16	-33.33	8.70
T2 <i>E. globulus</i>	-25.45	-35.29	-2.82	105.48	0.00	11.76	69.47	-5.71	-47.06	13.64
T3 <i>E. nitens</i>	-23.78	-28.57	-9.84	4.23	0.00	-26.67	62.25	-20.59	-46.15	21.05
T4 <i>E. nitens</i>	-45.50	-35.71	-22.58	-9.38	9.09	-7.69	22.46	-26.47	-50.00	40.00
T5 <i>E. nitens</i>	-25.59	-14.29	19.67	1.47	8.33	-33.33	30.87	-2.63	-38.46	25.93

### 5.2.2.- Relaciones entre nutrientes

Para la interpretación de resultados es necesario contar con rangos de referencia que permitan evaluar el estado nutritivo del ensayo, mediante las relaciones entre nutrientes.

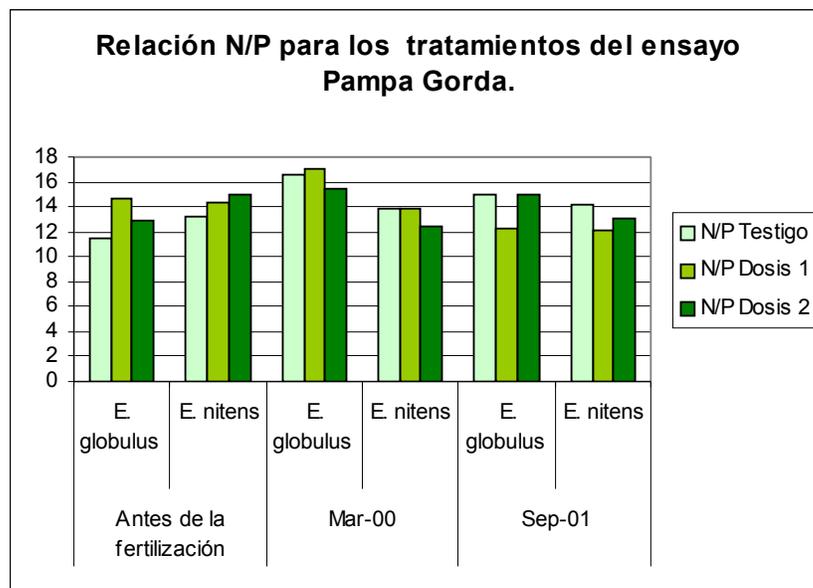
Considerando los datos del cuadro 14 se pudo obtener los valores de estas relaciones y compararlas con las óptimas y así evaluar el estado inicial del ensayo Pampa Gorda en cuanto al balance nutricional de los elementos involucrados. A partir de los resultados entregados en el cuadro 15 y 16, se pudo obtener las relaciones entre los nutrientes que corresponden y evaluar el posible efecto de la fertilización. Además, como herramienta de apoyo y para complementar este método, las relaciones entre nutrientes se contrastaron con la variación porcentual en la concentración foliar de nutrientes dada entre el período marzo 99 - marzo 2000 y marzo 99 – septiembre 2001.

**Cuadro 19.** Relaciones de importancia, a nivel foliar, presentes en el ensayo Pampa Gorda, durante el período de estudio.

Fecha de análisis		Antes de la fertilización		Marzo 2000		Septiembre 2001	
Especie		E. globulus	E. nitens	E. globulus	E. nitens	E. globulus	E. nitens
Relación	Tratamiento						
<b>N/P</b>	Testigo	11,5	13,2	16,6	13,9	15	14,1
	Dosis 1	14,7	14,3	17	13,8	12,3	12,1
	Dosis 2	12,9	15	15,4	12,5	14,9	13,1
<b>N/K</b>	Testigo	2,0	3,0	3,3	2,0	2,2	2,6
	Dosis 1	2,4	3,2	2,7	2,1	2,4	2,3
	Dosis 2	3,1	3,5	2,6	1,8	2,4	2,2
<b>K/P</b>	Testigo	5,9	4,4	5	6,8	6,9	5,5
	Dosis 1	6,1	4,4	6,3	6,3	5,1	5,3
	Dosis 2	4,2	4,4	5,9	6,9	6,3	6,1
<b>Ca/Mg</b>	Testigo	5,2	5,1	4,6	5	6,9	5,3
	Dosis 1	7,7	5,8	5,5	4,3	8,3	4,8
	Dosis 2	4,1	5,7	6,8	3,8	8,3	5,3

### 5.2.2.1.- Relación N/P

La bibliografía señala un rango óptimo de 12 – 15 para esta relación (Prado y Toro, 1996; Brañas, 2000). Según los resultados de la relación N/P, inicialmente (marzo 99) se tuvo un balance nutricional para ambas especies, estando sólo T0 (testigo) de *E. globulus* fuera del rango óptimo, ya que presentó una absorción de nitrógeno deficiente comparada con la captación de fósforo, pero en una situación muy cercana al balance nutricional. Esto confirmaría nuevamente el buen nivel de nutrientes presentes en el suelo.



**Figura N° 19.** Relación N/P para ambas especies, por tratamiento y período de análisis.

La figura 19 indica que para marzo 2000, todos los tratamientos superaron el valor mínimo indicado por Prado y Toro (1996). Incluso, para el caso de *E. globulus* todos los tratamientos superan el valor de 15. Esto indicaría que la cantidad de nitrógeno absorbida fue mayor que la captación de fósforo. Sólo T2 (dosis 2), el tratamiento con mayor aplicación se presentó con una relación N/P más cercana al óptimo, pero en la

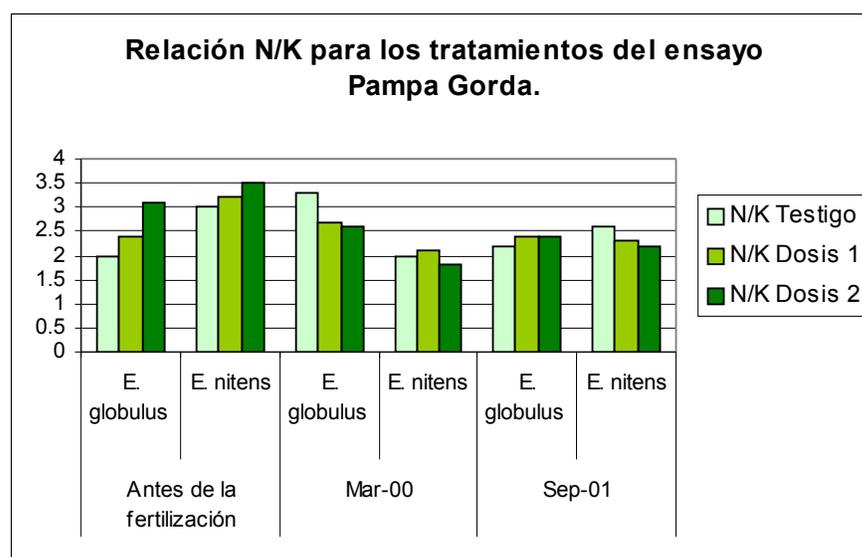
misma condición de desbalance. Al considerar que la aplicación de fósforo fue mayor que la de nitrógeno, *E. globulus* debió captar mejor el fósforo, lo que no ocurrió.

Para el caso de *E. nitens* se puede observar que todos los tratamientos se mantuvieron dentro del rango óptimo. Esto indica una absorción de nitrógeno similar a la de fósforo. Se debe considerar que la captación de fósforo está acorde con la oferta del elemento en el suelo, al ver como la relación disminuye, en las parcelas con mayor aplicación.

Durante septiembre 2001, la relación N/P se encontró dentro de los rangos óptimos para todos los tratamientos en ambas especies, lo que indicaría cierta corrección con respecto la deficiente absorción de P para *E. globulus*, durante marzo 2000. Sin embargo, esta corrección fue notoria sólo para T1 (dosis 1).

### 5.2.2.2.- Relación N/K

Para esta relación, la bibliografía señala un óptimo de alrededor de 3,5 (Herbert, 1996). Durante el período inicial (marzo 99), las relaciones N/K fueron inferiores al valor de referencia, tanto para *E. globulus* como para *E. nitens* fueron inferiores al óptimo. Además los cuocientes fueron menores en *E. globulus*. Esto indicaría una mayor captación de potasio versus captación de nitrógeno. Sólo el tratamiento con mayor aplicación para *E. nitens* (T5, dosis 2) se encontró justo en el valor observado por los autores, lo cual se traduce en un balance nutricional óptimo.



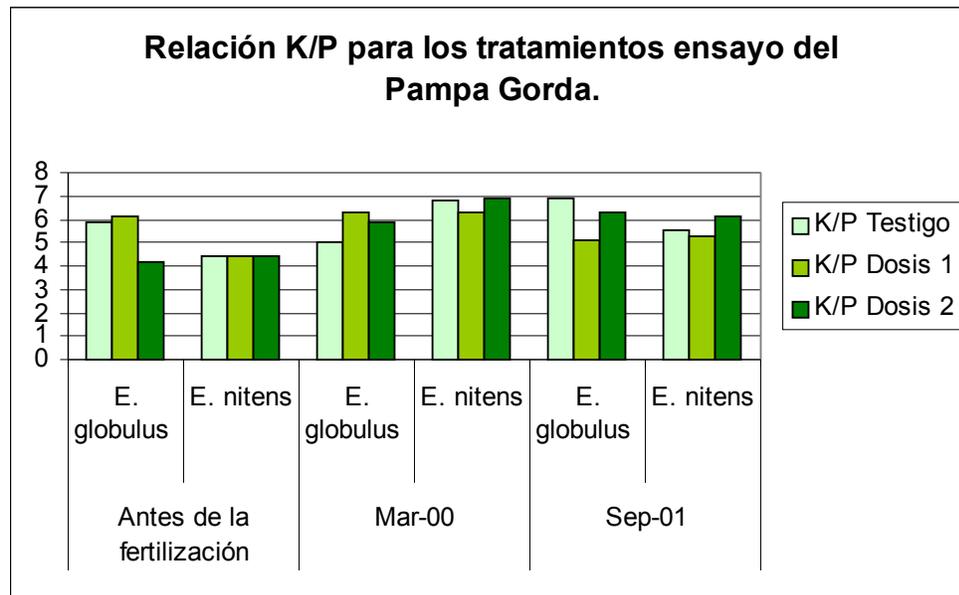
**Figura N° 20.** Relación N/K para ambas especies, por tratamiento y período de análisis.

La figura 20, indica que para marzo 2000, las relaciones N/K nuevamente se presentaron inferiores al valor de referencia, siendo esta vez superiores los valores de *E. globulus*, contrariamente a la situación inicial. En esta especie, sólo T1 (dosis 1) muestra una eficiente absorción de N. Para *E. nitens*, el cuociente bajó en todos los tratamientos. La fuerte captación de K hizo bajar el cuociente de la relación N/K, debido al menor incremento en la concentración de N. Pero en este período, para esta especie la captación de N y P fue evidente.

Una situación semejante se repitió para septiembre 2001, donde todos los valores en ambas especies fueron menores al de referencia, lo cual indica una mayor absorción de K comparada con el N. Para *E. globulus* los efectos positivos se perdieron durante este período. Para el caso de *E. nitens*, se mantuvo buenos niveles de K y una moderada dilución de N en T5 (dosis 2). Sin embargo, este período pone en evidencia una disminución general en los niveles de N y P para todos los tratamientos en ambas especies.

#### **5.2.2.3.- Relación K/P**

Para esta relación la bibliografía señala un óptimo de alrededor de 5 (Herbert, 1996). Inicialmente (período marzo 99) las relaciones K/P para *E. globulus* superaron levemente al óptimo, lo que se explicaría por una leve deficiencia en absorción de fósforo en comparación con la captación de potasio. Sin embargo, para T2 (dosis 2) en *E. globulus* y todos los tratamientos para *E. nitens* se presentaron levemente más bajos que el óptimo, lo que se debería a una leve deficiencia en la absorción de potasio comparada con la captación de fósforo. Llama la atención la gran homogeneidad presente en *E. nitens*.



**Figura N° 21.** Relación K/P para ambas especies, por tratamiento y período de análisis.

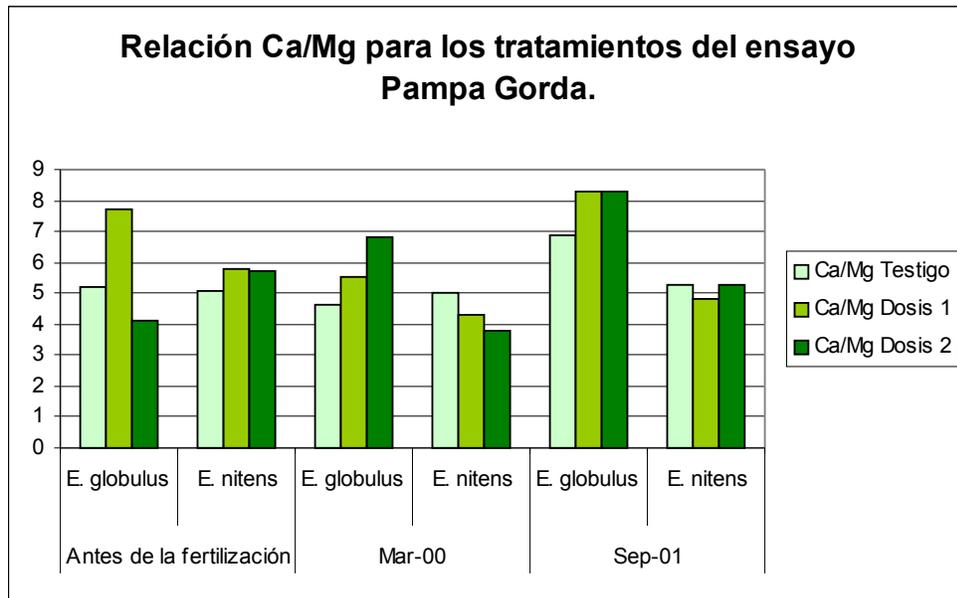
La figura 21 indica que para marzo 2000, las relaciones K/P reflejaron una mayor eficiencia en la absorción de potasio comparado con la del fósforo. Para *E. globulus* los valores superan levemente al óptimo, pero se produjo una notoria baja en la concentración de P y una más leve de K, siendo T1 (dosis 1) el tratamiento que mantuvo una captación semejante a la inicial. Pese a la baja en la concentración de P y K, T0 (testigo) se encontró justo en el óptimo. En *E. nitens*, el cociente de relación K/P se incrementó debido a la fuerte captación de K comparada con la de P o bien, por dilución de P.

La aplicación de nitrógeno fósforo y calcio provocó un aumento en la captación de muchos nutrientes. Notoriamente la captación de potasio se vio favorecida.

En septiembre 2001, siguieron siendo levemente superiores al óptimo, para todos los tratamientos en ambas especies, pero en general, se produjo una disminución en la concentración foliar de N y K. Para *E. globulus* el tratamiento más beneficiado fue T1 (dosis 1), el cual presentó una mayor captación de P versus una leve disminución de K situándose muy cercano al óptimo. Para *E. nitens* la menor disminución de los nutrientes se produjo en T5 (dosis 2), tratamiento que mantuvo un buen nivel de captación de K y una baja dilución de P. Sin embargo, T4 (dosis 1) se encontró más cercano al óptimo.

#### 5.2.2.4.- Relación Ca/Mg

La bibliografía señala que la relación Ca/Mg debe estar sobre 3,3 (Herbert, 1996). Se pudo constatar que inicialmente (marzo 99) todos los valores superaron al de referencia para la relación Ca/Mg, lo que estaría indicando una mayor captación de calcio en comparación con el magnesio absorbido. Esto sugiere que el suelo inicialmente estuvo provisto de buenas reservas de calcio.



**Figura N° 22.** Relación Ca/Mg para ambas especies, por tratamiento y período de análisis.

La figura 22 indica que para marzo 2000, la relación Ca/Mg nuevamente presentó valores superiores al de referencia, lo que indicaría que se mantuvo un buen nivel de calcio en el suelo. Nótese el comportamiento de *E. globulus*, donde T2 (dosis 2) > T1 (dosis 1) > T0 (testigo) en cuanto a esta relación, lo cual indica una relación directa entre concentración de calcio en las hojas y aplicación de nutrientes al suelo. Sin embargo, hubo una disminución en la concentración foliar de Ca y Mg, excepto por el aumento de Ca en T2. Exactamente inverso fue el proceso presentado en *E. nitens*, donde T5 (dosis 2) < T4 (dosis 1) < T3 (testigo), lo que se produjo por un fuerte y progresivo aumento en absorción de Mg, en relación a Ca, lo cual hizo bajar los cuocientes de la relación Ca/Mg.

La mayor oferta de Ca a través de la fertilización, pudo inducir un fuerte incremento en la captación de K y moderado de Mg (Arruda y Malavolta, 2001).

Durante septiembre 2001, los valores se mantuvieron sobre el óptimo. Para *E. globulus*, el incremento en la concentración de Ca fue mayor al que presenta Mg, siendo T2 (dosis 2) el tratamiento con una mayor concentración foliar de Ca. En *E. nitens*, sólo se produjo una disminución de Ca en T4 (dosis 1), con un aumento en Mg en todos los tratamientos.

Este último período presentó una disminución generalizada en los incrementos de concentración de nutrientes en *E. nitens*, comparada con los incrementos durante marzo 2000. Sin embargo, en *E. globulus*, se observó un aumento en la variación porcentual de concentración de nutrientes, lo que podría indicar una tardía captación de estos nutrientes o una baja o nula expansión del dosel, ya que estos elementos permanecen fuertemente retenidos en la hojas (Aparicio *et al.*, 2001).

Las relaciones N/P, N/K, K/P; permitieron comparar la absorción de N, P, K y clasificarlos de mayor a menor, mediante relaciones de transitividad.

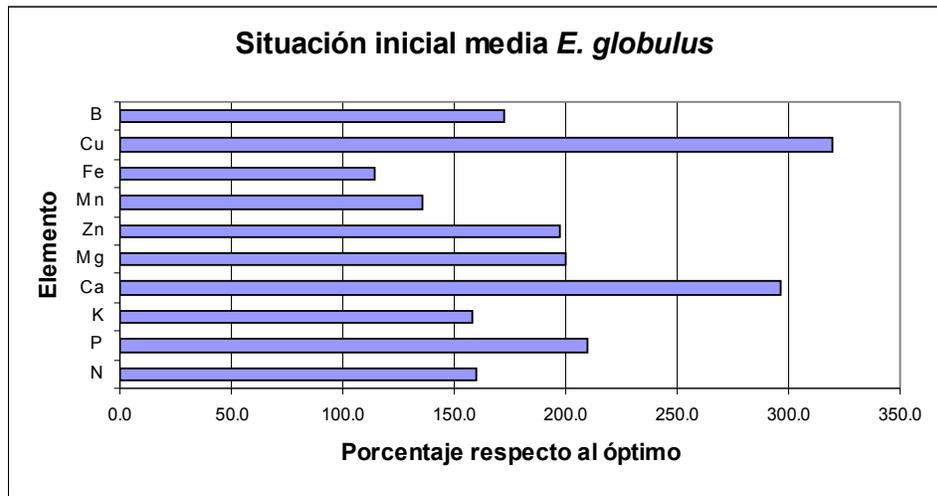
**Cuadro 20.** Situación aproximada en relación al contenido óptimo de nutrientes absorbido por los elementos N, P y K, de acuerdo con los resultados de las relaciones N/P, N/K, K/P.

Fecha de análisis Especie	Antes de la fertilización		Marzo 2000		Septiembre 2001	
	<i>E. globulus</i>	<i>E. nitens</i>	<i>E. globulus</i>	<i>E. nitens</i>	<i>E. globulus</i>	<i>E. nitens</i>
Tratamiento						
T0 (testigo)	K > P > N		N = P = K		K > N = P	
T1 (dosis 1)	K > P = N		K > N > P		K = P > N	
T2 (dosis 2)	P > K > N		K > N = P		K > N = P	
T3 (testigo)		P > K > N		K > P = N		K > N = P
T4 (dosis 1)		P = K = N		K > P = N		K > N = P
T5 (dosis 2)		P = K = N		K > P = N		K > N = P

En general antes de la fertilización se observa una menor captación de N, en comparación a la de P y K, siendo N el elemento más requerido. En las parcelas donde se presentó una condición cercana al equilibrio (T4 y T5; antes de la fertilización), la fertilización indujo a una mayor captación de K en relación a la de P y N, conservando una captación adecuada de estos últimos elementos mencionados. Por otro lado, la fertilización produjo un aumento en la captación de N comparada con la de P en *E. globulus* durante el período marzo 2000. Para el próximo período (septiembre 2001), este efecto se mantuvo sólo en T2, ya que T1 presentó una disminución de N en relación a P.

### 5.2.3.- Porcentaje de desviación respecto al óptimo

Para ilustrar el estado nutricional del ensayo Pampa Gorda, se realizó una serie de gráficos que dan cuenta del nivel nutritivo de los árboles, tomando como niveles óptimos de referencia, la concentración foliar de nutrientes entregada en la bibliografía (cuadro 13), que fue comparada con las distintas concentraciones foliares, obtenidas de los tres muestreos foliares realizados en Pampa Gorda.



**Figura N° 23.** Porcentajes de desviación con respecto al óptimo, situación media de todos los tratamientos previa a la fertilización en *E. globulus*. Pampa Gorda, marzo 1999.

El gráfico anterior confirma la buena fertilidad del suelo. Ningún nutriente se presentó con deficiencia con respecto al óptimo de referencia (cuadro 13).

En marzo 2000 *E. globulus* mostró niveles aceptables a nivel foliar para todos los nutrientes, con excepción del hierro, que se presentó levemente bajo el óptimo (figuras 24 – 26).

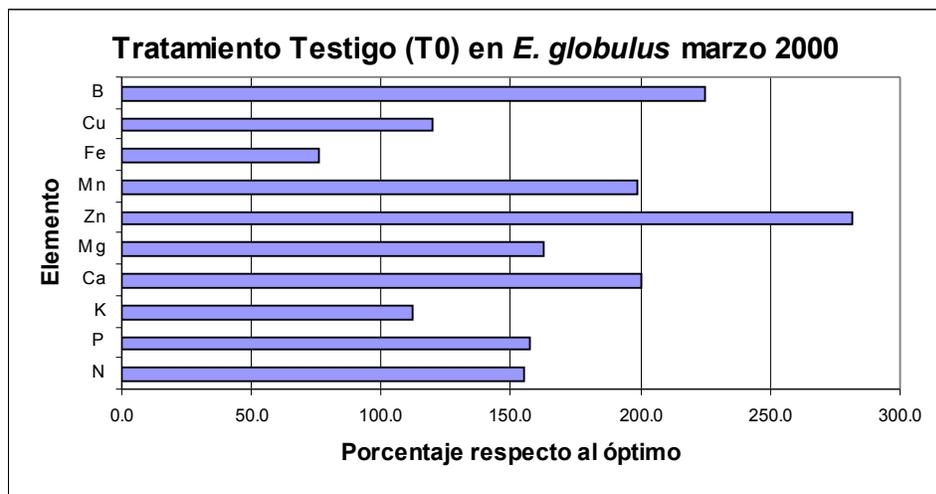
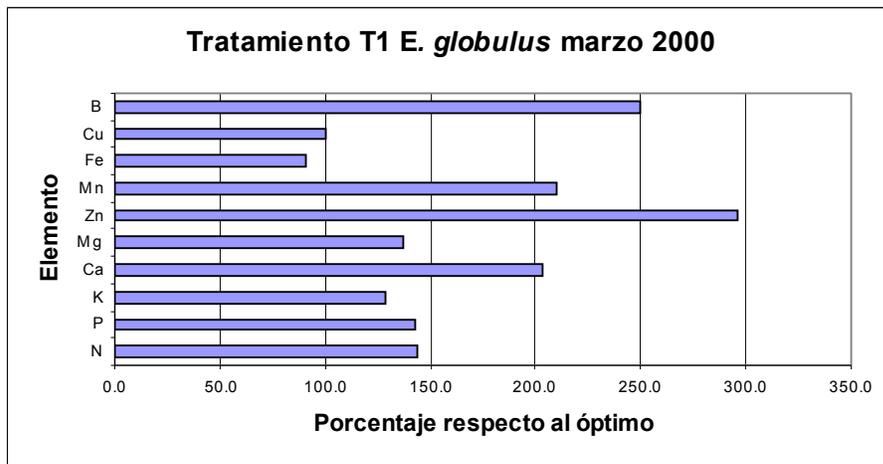
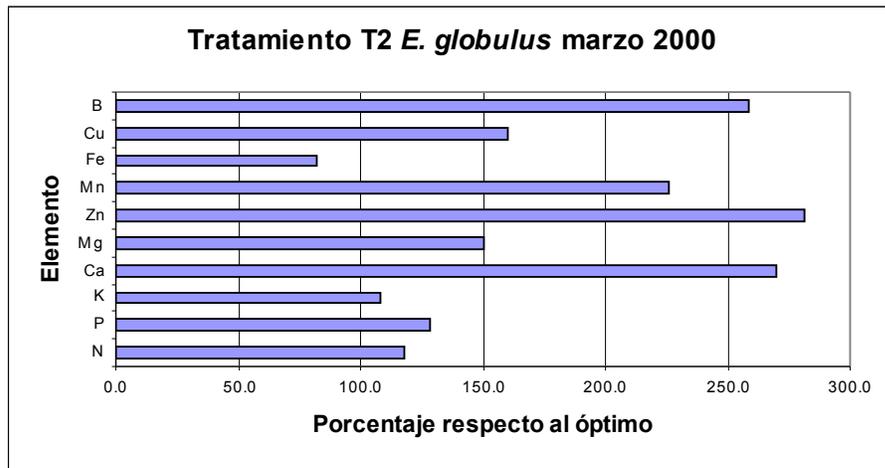


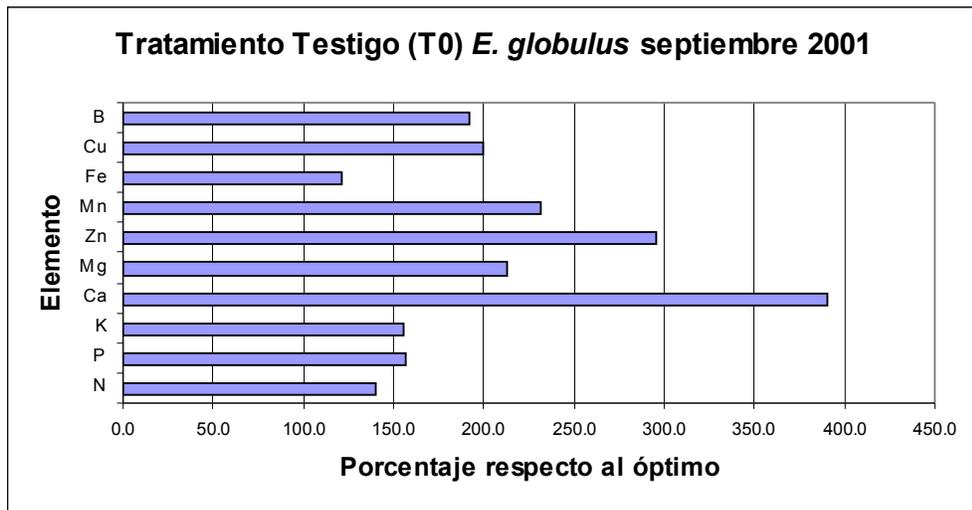
Figura N° 24. Porcentajes de desviación con respecto al óptimo, tratamiento testigo (T0) en *E. globulus*. Pampa Gorda, marzo 2000.



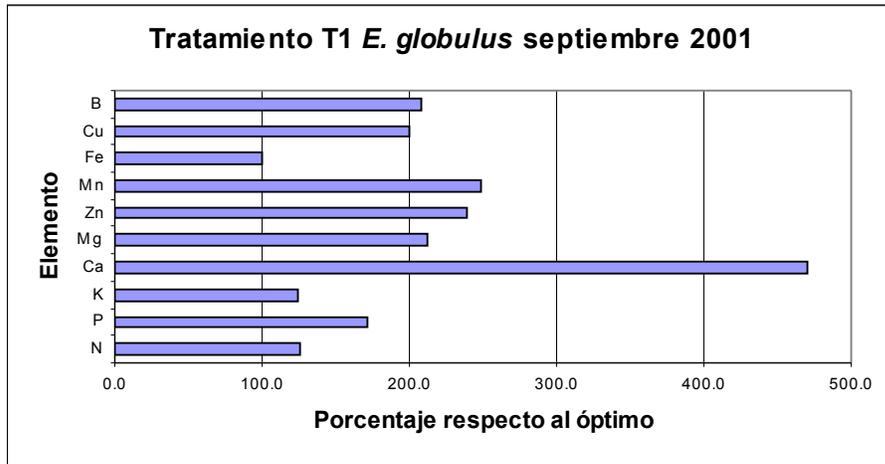
**Figura N° 25.** Porcentajes de desviación con respecto al óptimo, tratamiento T1 en *E. globulus*. Pampa Gorda, marzo 2000.



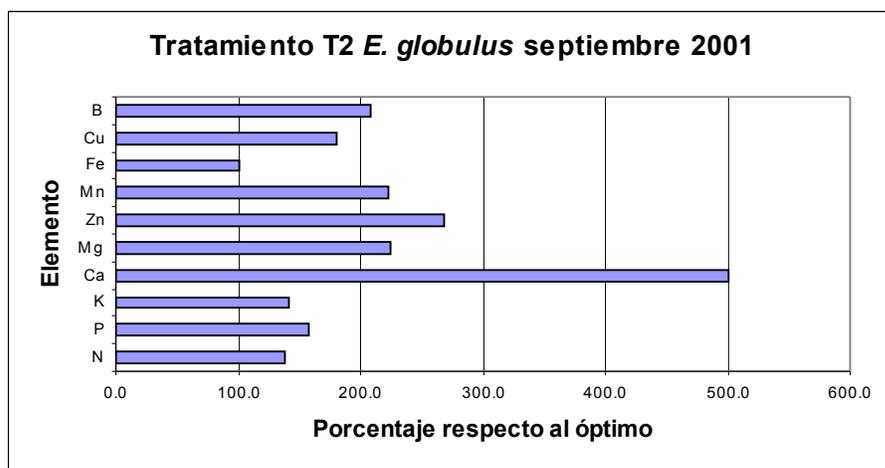
**Figura N° 26.** Porcentajes de desviación con respecto al óptimo, tratamiento T2 en *E. globulus*. Pampa Gorda, marzo 2000.



**Figura N° 27.** Porcentajes de desviación con respecto al óptimo, tratamiento Testigo (T0) en *E. globulus*. Pampa Gorda, septiembre 2001.



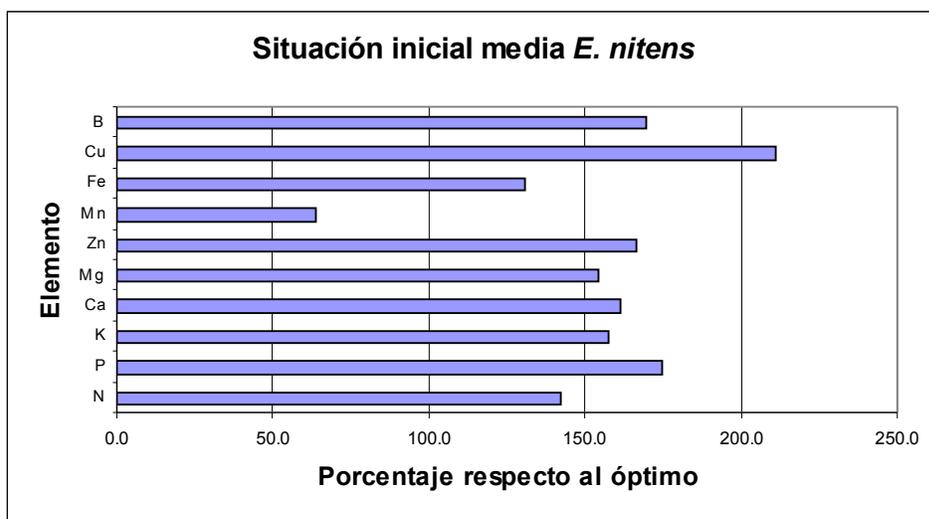
**Figura N° 28.** Porcentajes de desviación con respecto al óptimo, tratamiento T1 en *E. globulus*. Pampa Gorda, septiembre 2001.



**Figura N° 29.** Porcentajes de desviación con respecto al óptimo, tratamiento T2 en *E. globulus*. Pampa Gorda, septiembre 2001.

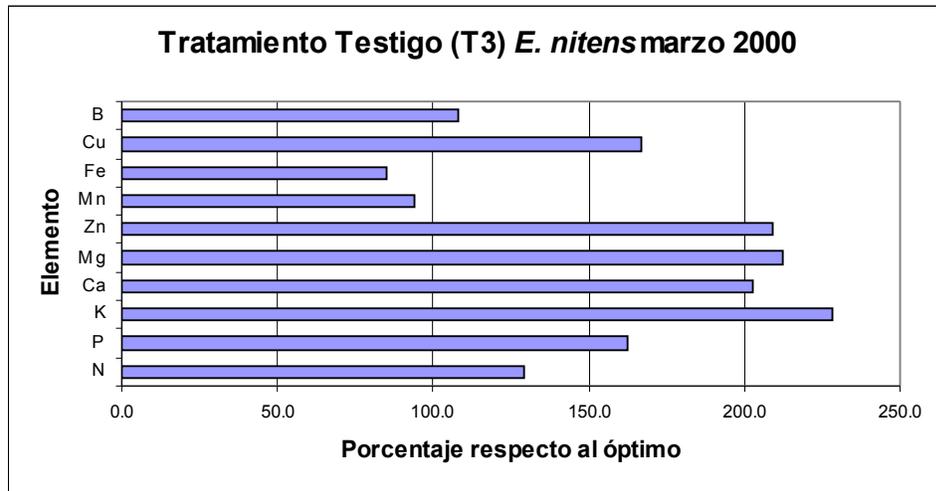
Al comparar la concentración foliar inicial de nutrientes (figura 23) con las obtenidas después de la fertilización (figuras 24 a 29), se puede decir que la fertilización en *E. globulus*, produjo un aumento progresivo en la concentración foliar de calcio acorde a la cantidad aplicada al suelo. Además, los niveles de boro aumentaron en todos los tratamientos, igualmente mejoraron los niveles del resto de los micronutrientes en general. Los bajos niveles de hierro, sugieren que el suelo es bajo en este elemento. Los gráficos muestran la tendencia de T1 a mantener mejores niveles de nutrientes tanto en marzo 2000 como en septiembre 2001.

Una característica importante a considerar es el vigor de los árboles, de acuerdo al aspecto físico que presentaron en el follaje. En general, en esta especie, los árboles se encontraron notoriamente afectados, presentando ataque de hongos a nivel foliar (*Botritis*).

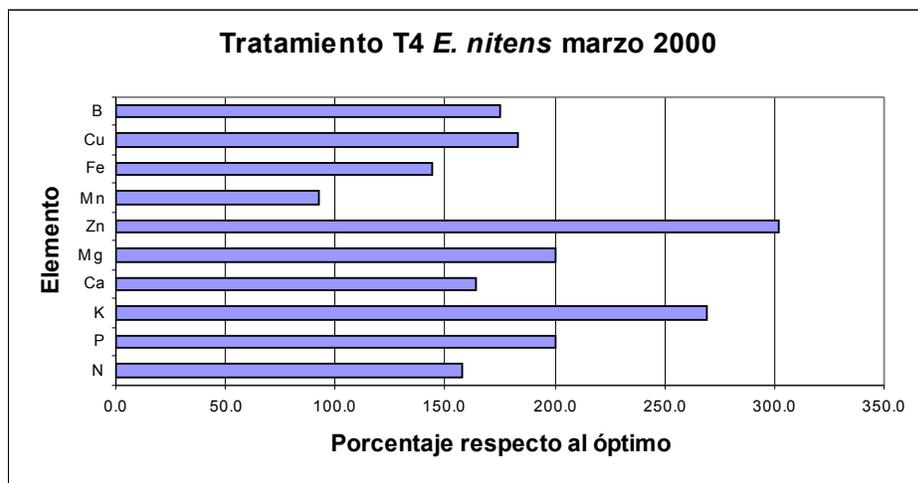


**Figura N° 30:** Porcentajes de desviación con respecto al óptimo, situación media de todos los tratamientos previa a la fertilización en *E. nitens*. Pampa Gorda, marzo 1999.

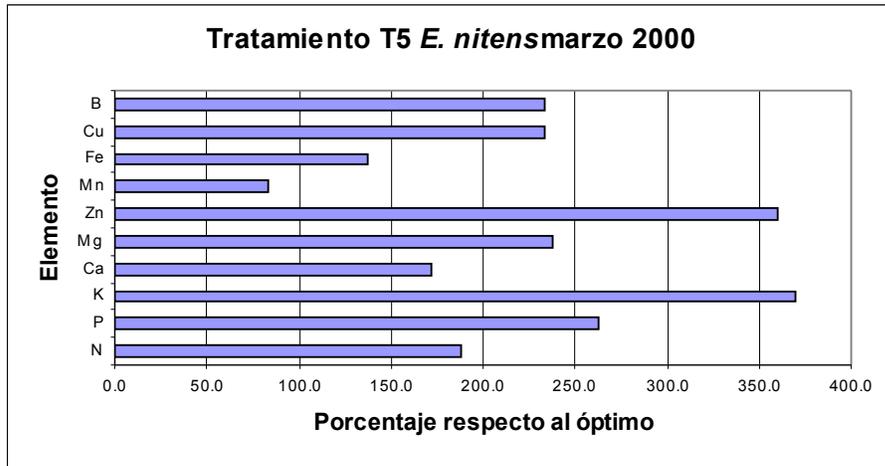
La situación inicial en *E. nitens* muestra un buen nivel general de nutrientes, encontrándose por sobre los niveles óptimos para todos los tratamientos. Sólo la concentración manganeso se encontró bajo el óptimo para todos los tratamientos.



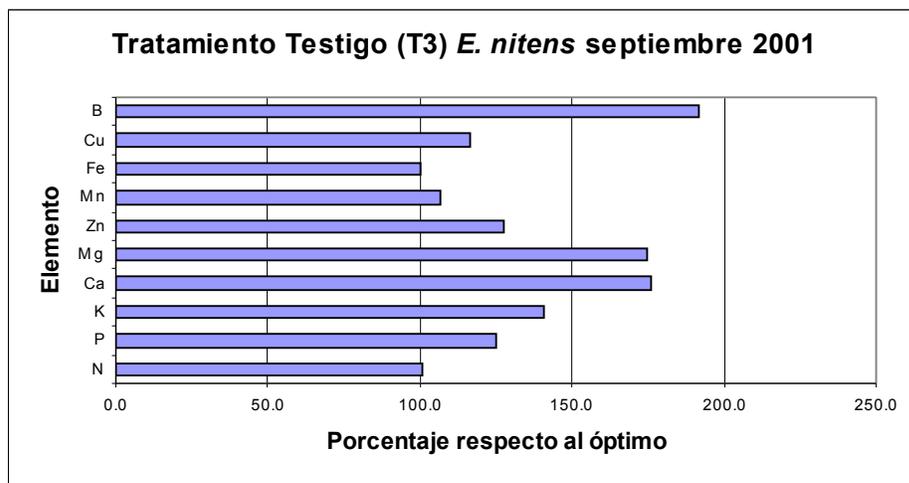
**Figura N° 31.** Porcentajes de desviación con respecto al óptimo, tratamiento Testigo (T3) en *E. nitens*. Pampa Gorda, marzo 2000.



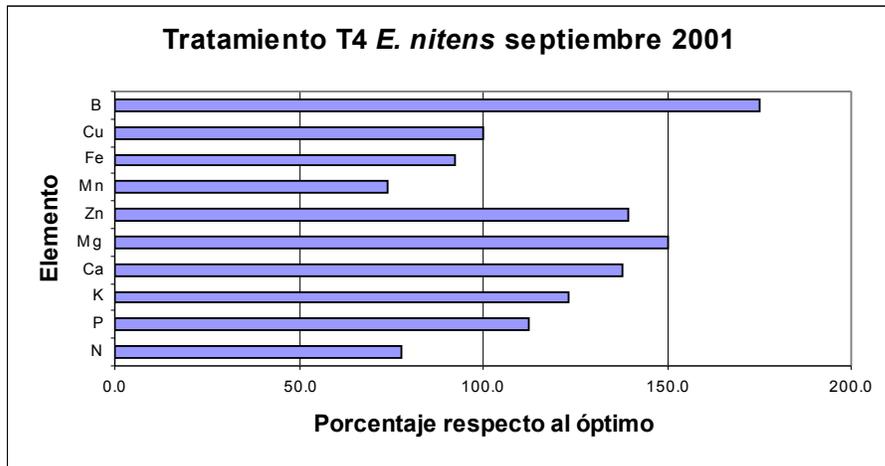
**Figura N° 32.** Porcentajes de desviación con respecto al óptimo, tratamiento T4 en *E. nitens*. Pampa Gorda, marzo 2000.



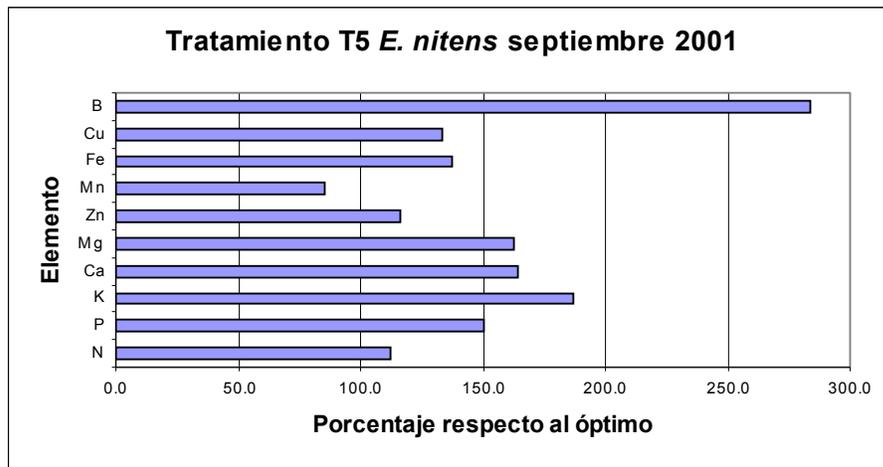
**Figura N° 33.** Porcentajes de desviación con respecto al óptimo, tratamiento T5 en *E. nitens*. Pampa Gorda, marzo 2000.



**Figura N° 34.** Porcentajes de desviación con respecto al óptimo, tratamiento Testigo (T3) en *E. nitens*. Pampa Gorda, septiembre 2001.



**Figura N° 35.** Porcentajes de desviación con respecto al óptimo, tratamiento T4 en *E. nitens*. Pampa Gorda, septiembre 2001.



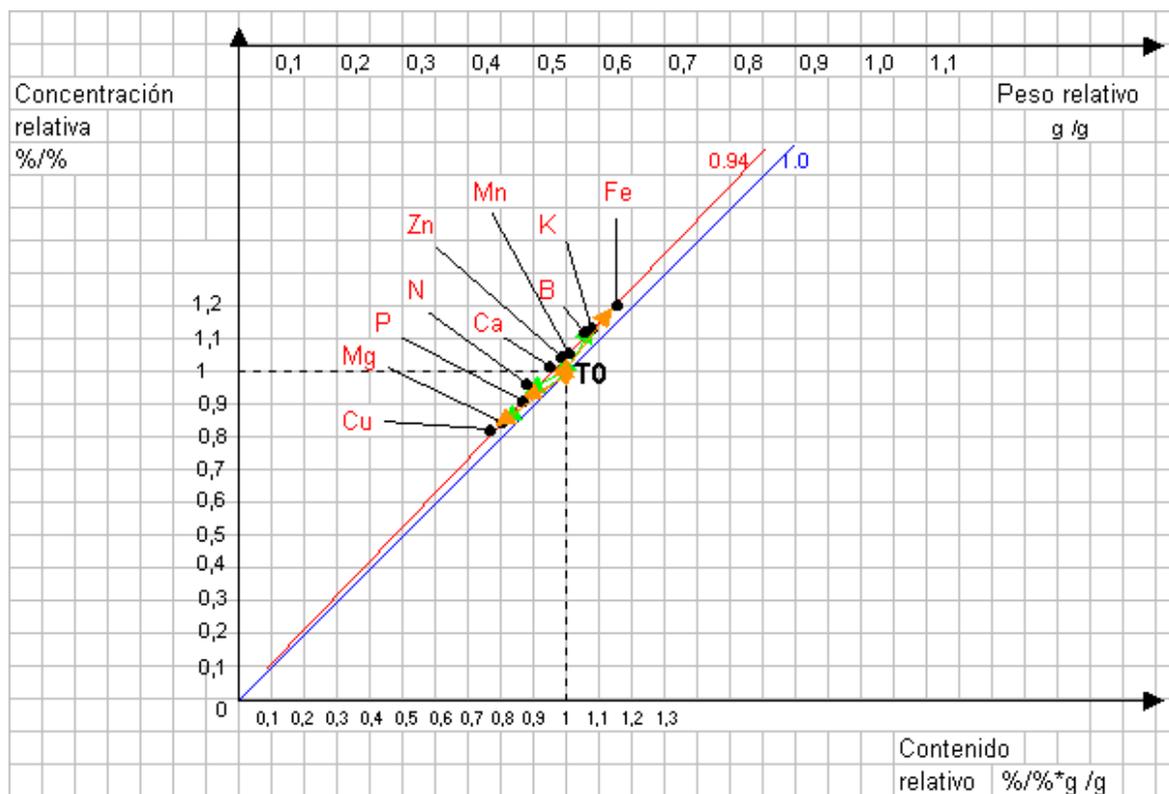
**Figura N° 36.** Porcentajes de desviación con respecto al óptimo, tratamiento T5 en *E. nitens*. Pampa Gorda, septiembre 2001.

Al observar el cambio en la concentración de nutrientes a nivel foliar, existió una clara diferencia en los niveles iniciales de nutrientes (figura 30) comparada con los períodos siguientes (figuras 31 a 36). El potasio aumentó notoriamente en relación directa con las dosis de fertilizantes aplicados al suelo. También se produjo un incremento en los niveles de nitrógeno, fósforo, boro y magnesio consecuentemente con la cantidad disponible en el suelo. Esto revela una respuesta más clara a la fertilización, pues se mejora considerablemente la condición nutritiva a medida que se aumentó la oferta de nutrientes.

### 5.3.- Análisis vectorial del follaje

Marzo del 2000 representa el primer registro de análisis vectorial, debido a que se pueden evaluar cambios en valores de concentraciones nutritivas y peso seco de las hojas como resultado de la fertilización. Los tratamientos fertilizados se analizaron respecto al testigo en cada especie.

La figura 37 muestra que los elementos N, P, Mg, Cu para *E. globulus* en T1 disminuyeron en concentración relativa, contenido relativo y peso relativo respecto al tratamiento T0.



**Figura N° 37:** Comparaciones múltiples de nutrientes, en Pampa Gorda, *E. globulus* T1 (dosis 1) marzo 2000.

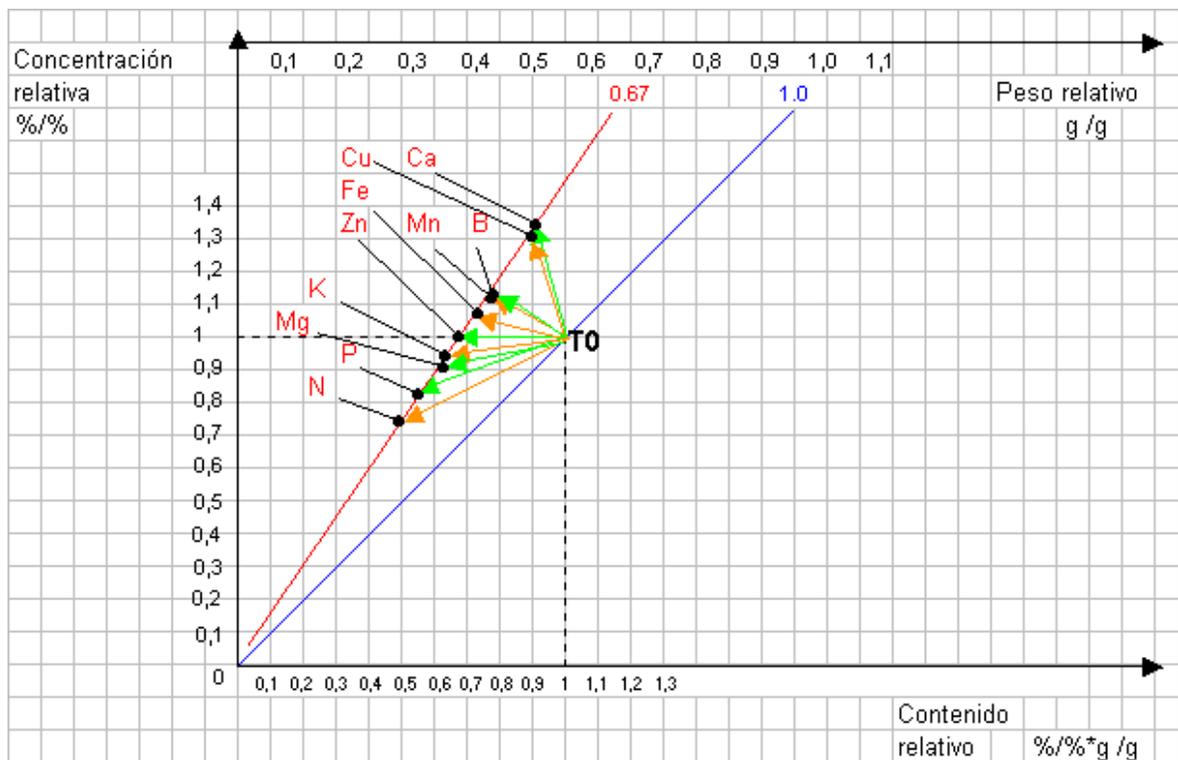
En este caso el diagnóstico es algo complejo. Lo más probable es que el ataque de hongos (*Botritis*) y fuertes heladas fueron factores preponderantes en la disminución de crecimiento. La disminución de estos elementos (N, P, Mg y Cu) podría deberse a un antagonismo verdadero, es decir, a una interferencia en la captación de estos nutrientes por la aplicación de otros. Para el caso del estudio, el nutriente causante de tal efecto fue el calcio. La bibliografía señala algunos casos de efectos antagónicos entre una disponibilidad alta de calcio y deficiente absorción en N. Además, se comprueba un aumento considerable en la captación de potasio, que incide en una menor adquisición de Mg y Ca, ya que estos elementos actúan en forma de inhibición competitiva, siendo Mg y Ca elementos más lentos en cuanto a la captación y transporte que K.

Otra explicación posible, pero que no deja de ser poco relevante en este caso, es producto de una deficiencia agravada por la adición de calcio, debido a una deficiencia previa en nitrógeno y alguno de los otros elementos que bajaron su concentración relativa. La última razón posible de este efecto de disminución es una disminución del crecimiento impuesto por una fuerte floración y fructificación activada por la fertilización (Weetman, 1989).

Los elementos Ca, Mn y Zn, disminuyeron en contenido relativo y peso relativo pero aumentaron su concentración relativa, es decir, se produjo un aumento en la concentración de estos nutrientes en la hoja con respecto al testigo (T0). El diagnóstico sería “enverdecimiento” del follaje debido a estos elementos (Weetman, 1989).

Los elementos K, B y Fe, aumentaron en contenido relativo, concentración relativa y una disminución en peso relativo. La desviación angular de estos elementos tienden a manifestar un enverdecimiento del follaje, con índices de respuesta a la fertilización debido a estos elementos (Weetman, 1989). Pero se recuerda que se está en una condición de disminución en el crecimiento causado por la presencia de *Botritis*. Además, se pone en evidencia que ningún nutriente ha manifestado un cambio vectorial positivo, lo cual se debe a la nula respuesta en crecimiento, gatillado por deficiencia previa de algún nutriente, no siendo este dicho caso.

La figura 38 muestra que los elementos K, Mg, P y N para *E. globulus* en T2 disminuyeron su concentración relativa, contenido relativo y peso relativo respecto al tratamiento T0. Como se ha expuesto anteriormente, este efecto se explicaría mayoritariamente por el ataque de hongos (*Botritis*). Nótese que los elementos N, P y Mg disminuyeron también en el tratamiento T1.

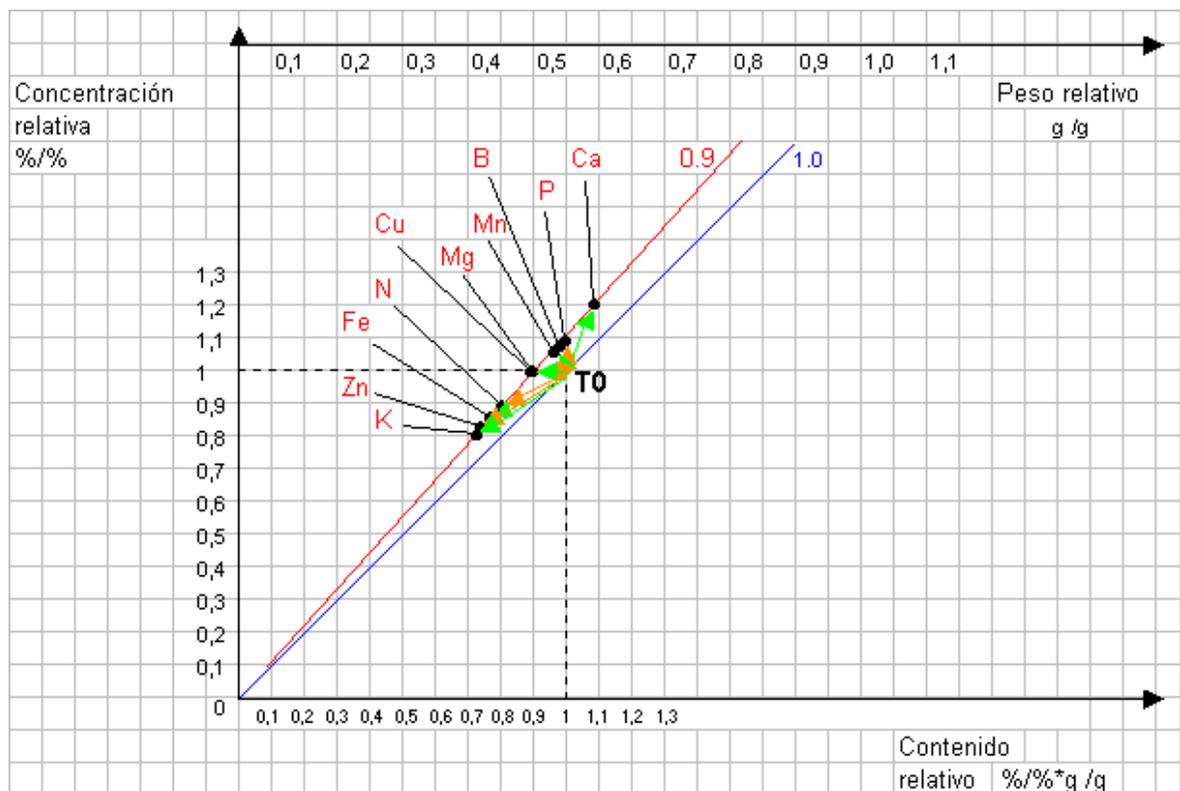


**Figura N° 38:** Comparaciones múltiples de nutrientes, en Pampa Gorda, *E. globulus* T2 (dosis 2) marzo 2000.

El zinc mostró una disminución en contenido relativo y en peso relativo, con una concentración relativa inalterada respecto a T0. Esto implica que no hubo efecto alguno por causa de este elemento, pero que se encontraría en una condición de máxima toxicidad tolerable del elemento. El resto de los elementos, Fe, Mn, B, Cu y Ca disminuyeron en contenido relativo y peso relativo aumentando en concentración relativa. Esto indica un enverdecimiento en el follaje, acompañados de una toxicidad en forma decreciente en el orden que se mencionan estos elementos, es decir, el calcio se encontró en la condición de menor toxicidad. Sin embargo, ningún elemento evidencia el menor atisbo de respuesta a la fertilización, a diferencia de lo ocurrido en T1.

Considerando que el análisis vectorial permite verificar el nutriente que se encuentra limitando el crecimiento, para marzo del 2000 tanto en T1 como en T2 ningún elemento se mostró como limitante, lo que confirmaría un elevado nivel de fertilidad del suelo.

La figura 39 refleja el estado de T1 para *E. globulus* durante septiembre 2001. Los nutrientes K, Zn Fe y N se presentan en una condición de disminución de contenido relativo. Nótese que N anteriormente (ver figura 37) estuvo considerado en esta condición. Este efecto es producido por un agente externo que disminuye el crecimiento como ataque de hongos (*Botritis*).

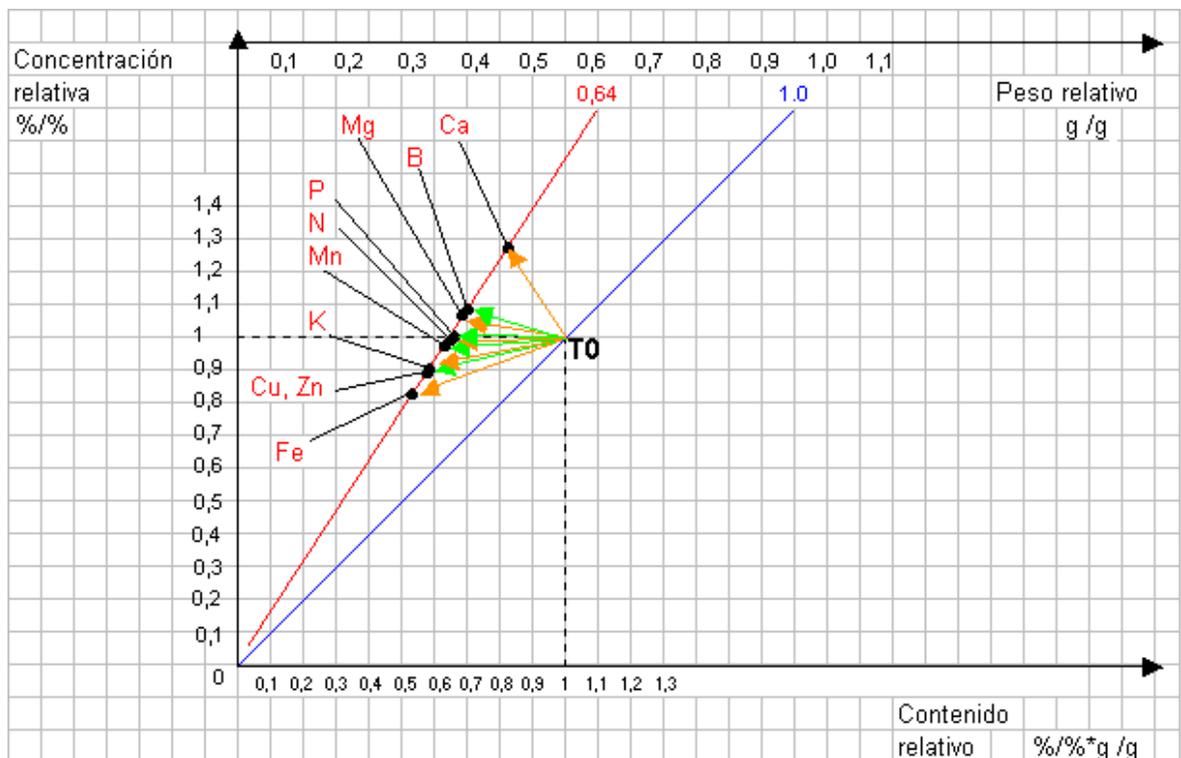


**Figura N° 39:** Comparaciones múltiples de nutrientes, en Pampa Gorda, *E. globulus* T1 (dosis 1) septiembre 2001.

El Cu y Mg se encontraron en una condición límite, de toxicidad máxima antes de pasar a la fase de antagonismo.

Los elementos Mn, B y P aumentaron su concentración relativa a T0, con una pequeña disminución del peso relativo, manteniéndose casi inalterado el contenido relativo, lo cual indica un efecto de enverdecimiento en el follaje producto de estos nutrientes. Solo el Ca aumenta en su concentración relativa, a tal punto que a pesar de sufrir una baja el peso foliar, el contenido relativo igualmente es mayor que en T0, lo cual indica un efecto no solo de enverdecimiento, sino que además existió evidencia de una respuesta incipiente a la fertilización, causada por la adición de Ca.

La figura 40 indica la condición nutricional para *E. globulus* durante septiembre 2001 en T2, que mantiene una estructura similar a las comparaciones realizadas en el mismo tratamiento en marzo 2000.



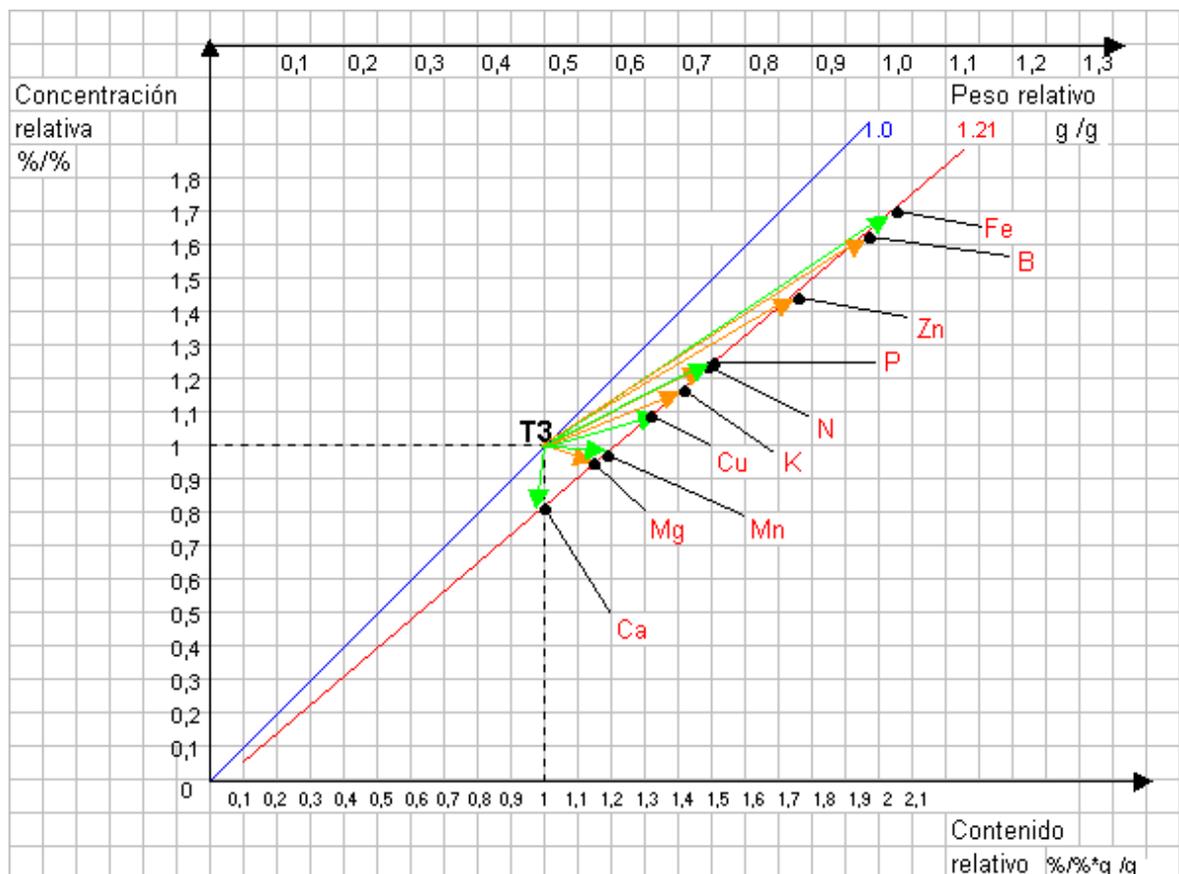
**Figura N° 40:** Comparaciones múltiples de nutrientes, en Pampa Gorda, *E. globulus* T2 (dosis 2) septiembre 2001.

El efecto antagónico es evidenciado por los vectores negativos en los elementos Fe, Cu, Zn, K y Mn. Nótese que en período marzo 2000 (ver figura 38), sólo K se encontró en la misma situación. Los elementos N y P, que en el período anterior estuvieron en niveles muy bajos, superaron levemente esa condición para pasar a una de máxima toxicidad tolerable, debido a la disminución en contenido relativo y peso foliar, manteniendo Ca una concentración relativa inalterada. Tan sólo Mg, B y en una mayor magnitud Ca, aumentaron su concentración relativa, lo que sugiere una situación de

menor toxicidad que el resto de los elementos, y produciéndose un “enverdecimiento” del follaje, pero no se evidencia índice de respuesta debido a la fertilización.

En ambos períodos, marzo 2000 y septiembre 2001, se observó una similitud para los tratamientos T1 y T2, siendo el tratamiento T1 el que evidencia un incipiente índice de respuesta a la fertilización, lo que coincide con las curvas de incremento en volumen y la tendencia en incremento de área basal en T1. Esto coincide con lo expuesto por Saur *et al.* (2000) en relación a que los incrementos en concentración de nutrientes están altamente relacionados con aumentos en área basal.

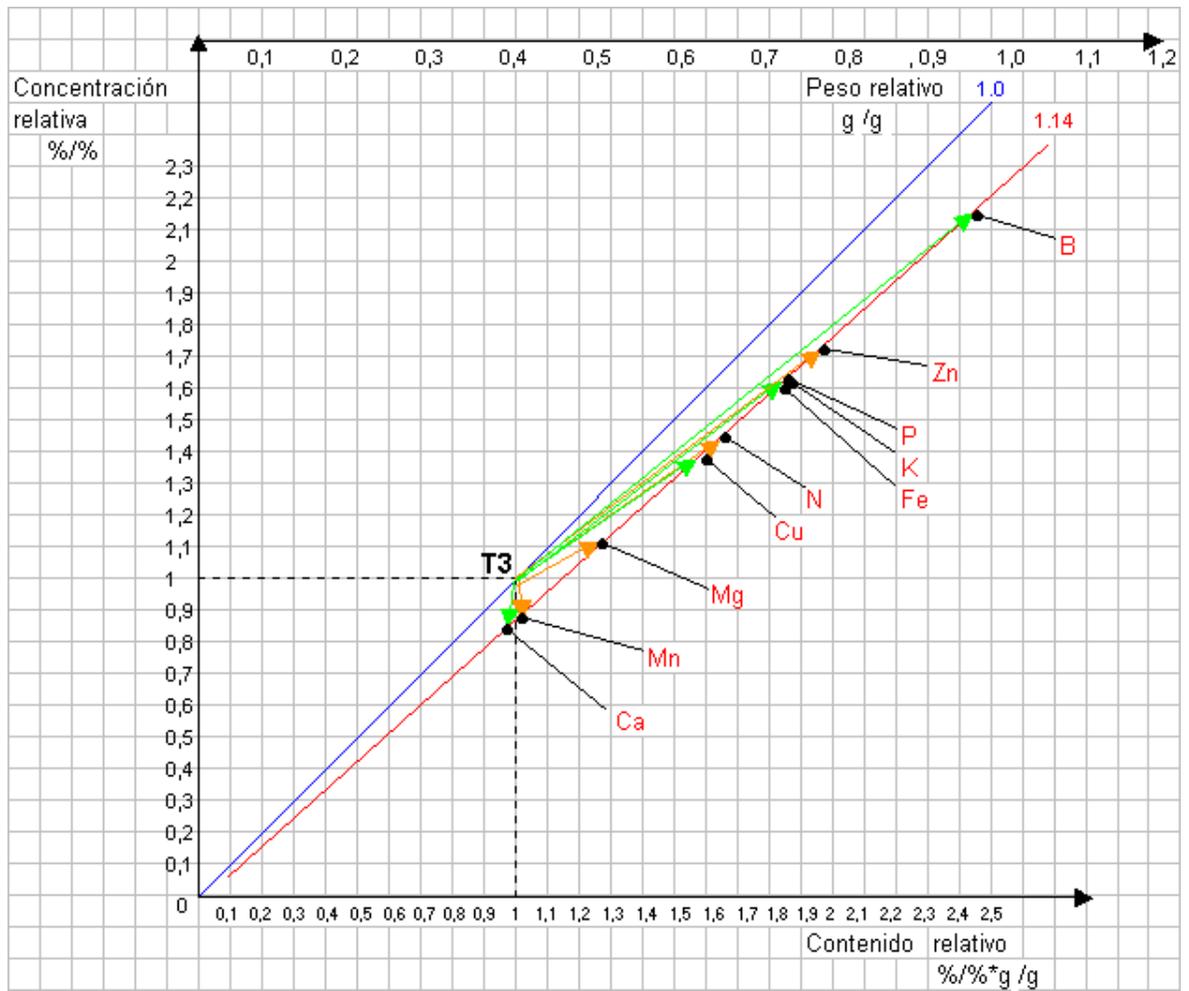
La figura 41 muestra que para T4 en *E. nitens* el elemento calcio presentó una disminución leve en contenido relativo y mayor en concentración relativa, con un aumento en el peso relativo al tratamiento T3 (sin fertilización). Esto indicaría una dilución del calcio producto de un crecimiento inducido. Lo mismo ocurre con los elementos Mg y Mn, los cuales presentaron un aumento en peso relativo y en contenido relativo, con una disminución en concentración relativa. Esto implica un índice de respuesta a la fertilización por el aumento en contenido relativo de estos elementos acompañado de una dilución de estos elementos causada por un crecimiento inducido.



**Figura N° 41:** Comparaciones múltiples de nutrientes, en Pampa Gorda, *E. nitens* T4 (dosis 1) marzo 2000.

Para el resto de los elementos, Cu, K, N, P, Zn, B, Fe se presentó un incremento en concentración relativa, contenido relativo y peso relativo respecto al tratamiento T3. Esto está indicando que dichos elementos, en el orden mencionado presentaron un efecto sinérgico sobre su nivel nutritivo. Los elementos N y P inicialmente se encontraban en una condición de deficiencia o limitaban un crecimiento más acelerado. Además de presentarse un enverdecimiento del follaje, se presenta un índice de respuesta a la fertilización causada por los elementos agregados. Teóricamente, este efecto debe ir acompañado de un importante aumento en crecimiento, ya que los nutrientes fueron eficazmente absorbidos, para satisfacer una mayor demanda por el incremento en la formación de biomasa (Saur *et al.*, 2000).

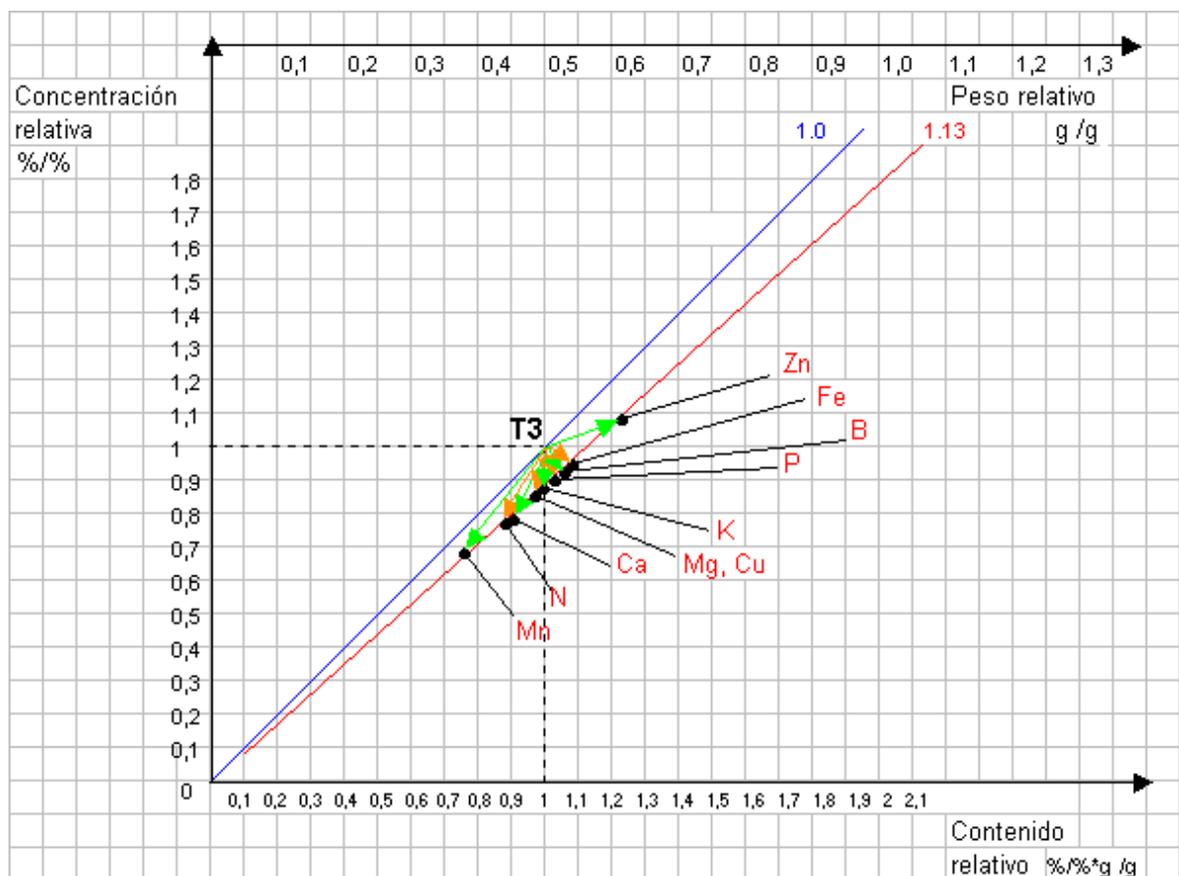
La figura 42 muestra que, al igual que lo ocurrido en el tratamiento T4, el elemento calcio sufrió una leve disminución en contenido relativo, una baja más fuerte en cuanto a su concentración relativa y un aumento en el peso relativo. Esta condición indica una dilución del elemento por un crecimiento inducido. El Mn también experimenta una dilución. Este elemento presentó una disminución en la concentración relativa con un aumento en contenido relativo y peso relativo, lo que implica un índice de respuesta a la fertilización.



**Figura N° 42:** Comparaciones múltiples de nutrientes, en Pampa Gorda, *E. nitens* T5 (dosis 2) marzo 2000.

La situación para el resto de los elementos, Mg, Cu, N, Fe, K, P, Zn y B fue de incremento en cuanto a concentración relativa, contenido relativo y peso relativo. Esto implica que dichos elementos en el orden mencionado presentaron un efecto sinérgico causada por la fertilización. Los elementos N y P inicialmente se encontraban en una condición de deficiencia o limitaban un crecimiento más acelerado. El follaje experimentó un enverdecimiento por estos elementos y se tiene un índice de respuesta a la fertilización debido al aumento en el contenido relativo de los elementos mencionados. Los cambios positivos fueron más fuertes en T5 que en T4, debido a que la magnitud de los vectores fue mayor (Weeetman, 1989), y se pone de manifiesto la baja disponibilidad inicial de boro, confirmando lo expuesto anteriormente por Toro (1995).

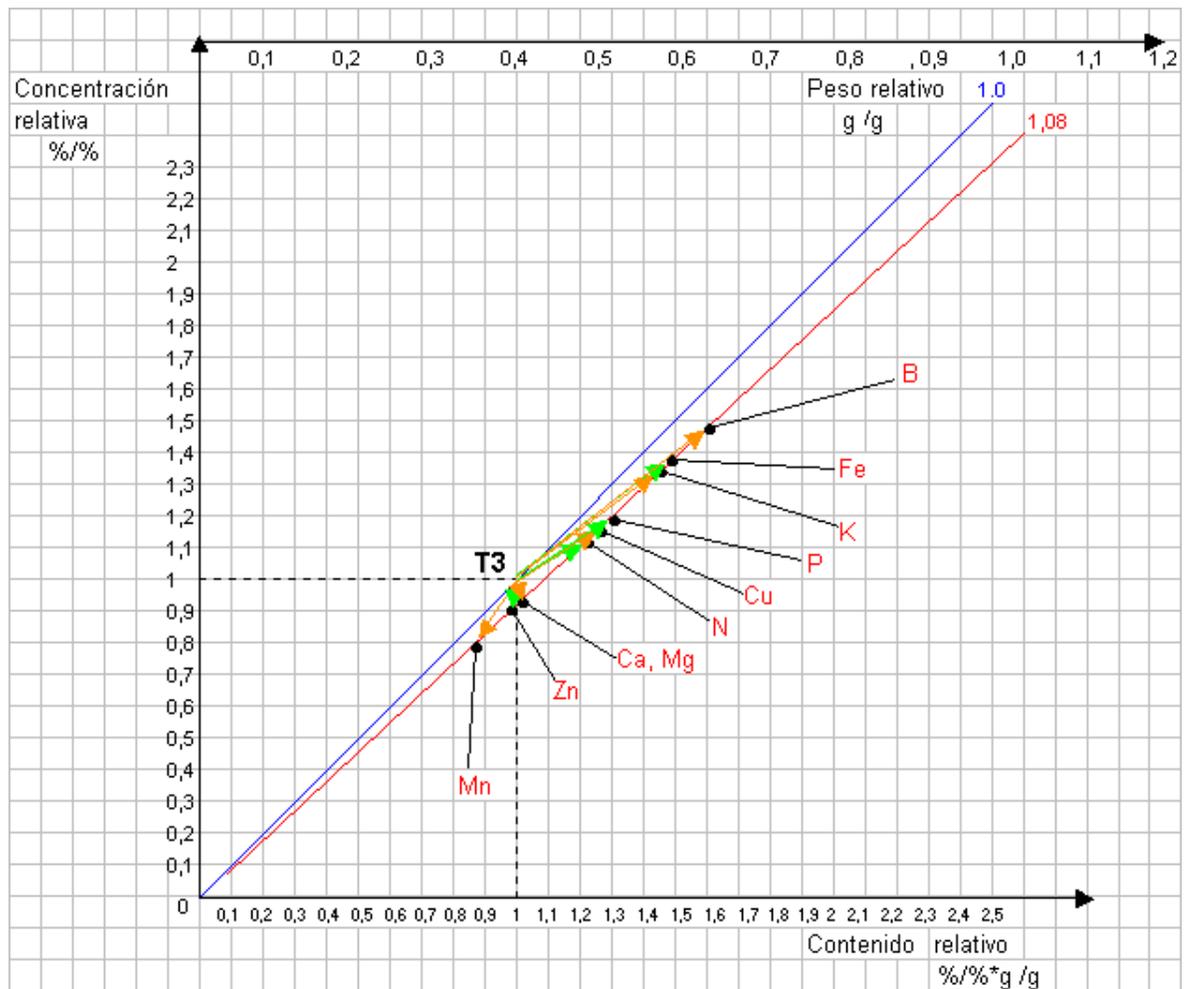
Para septiembre 2001, los cambios vectoriales en T4, *E. nitens* fueron muy distintos a los mostrados en marzo 2000 (figura 43). Los elementos Mn, N y Ca, disminuyeron su concentración relativa y el contenido relativo, aún cuando el peso foliar aumentó. Esto podría deberse a un aumento relativamente grande en materia seca, el cual repercute en una disminución en la concentración foliar de nutrientes, lo que se conoce como "efecto Steenbjerg" (Weetman, 1989).



**Figura N° 43:** Comparaciones múltiples de nutrientes, en Pampa Gorda, *E. nitens* T4 (dosis 1) septiembre 2001.

El resto de los elementos, Mg, Cu, K, P, B, Fe se encontraron en una situación similar a los primeros nutrientes mencionados, ya que estuvieron localizados en una zona de dilución, lo que podría deberse a un explosivo aumento en la biomasa foliar. Sólo el elemento Zn, está indicando que se ha absorbido en mayor magnitud, dando una respuesta clara a la fertilización.

El tratamiento T5 (*E. nitens*) durante septiembre 2001 muestra resultados similares a los encontrados en marzo 2000 (figura 44).



**Figura N° 44:** Comparaciones múltiples de nutrientes, en Pampa Gorda, *E. nitens* T5 (dosis 2) septiembre 2001.

Los elementos Mn, Zn, Ca y Mg presentaron una menor concentración relativa y también un menor contenido relativo. Estos elementos se encuentran claramente diluidos, lo que se debería a una alta producción en biomasa (“efecto Steenberg”; Weetman, 1989). El resto de los elementos: N, Cu, P, K, Fe, B aumentó su concentración relativa, peso relativo y contenido relativo al tratamiento testigo (T3). Esto indicaría que todos estos nutrientes están influyendo en una mayor producción de materia seca, lo cual implica una demanda mayor por estos elementos. Nótese la alta demanda de boro por los árboles. Como este elemento se encontró con mayores valores relativos al testigo, se puede decir que fue el más requerido por las plantas, y el mayor responsable de la positiva respuesta a la aplicación de fertilizantes.

A juzgar por los mayores valores que presenta el aumento de nutrientes en T5 en relación a T4, debido a que la magnitud vectorial es mayor en T5, el efecto de la fertilización es más evidente para T5, tanto para el período marzo 2000 como para septiembre 2001. Esto concuerda con las curvas de incremento diamétrico donde T5 supera al resto de los tratamientos. El aumento de los niveles de nutrientes y de incrementos diamétricos estarían indicando un mayor crecimiento para este tratamiento (Saur *et al.*, 2000).

#### 5.4.- Peso Foliar Específico

También se calculó el peso foliar específico (PFE) para el período marzo 2000, debido a la estrecha relación que tiene esta variable con el crecimiento del árbol (King, 1999).

$$\text{PFE} = \frac{\text{Peso seco foliar}}{\text{Área de unidad foliar}}$$

**Cuadro 20:** Peso Foliar Específico (g/cm<sup>2</sup>) de cada tratamiento en marzo 2000.

Tratamiento		Peso Foliar Específico (g/cm <sup>2</sup> )
<i>E. globulus</i>	T0 (testigo)	0,0184
	T1 (dosis 1)	0,0137
	T2 (dosis 2)	0,0120
<i>E. nitens</i>	T3 (testigo)	0,0146
	T4 (dosis 1)	0,0162
	T5 (dosis 2)	0,0163

Al comparar los pesos específicos por tratamiento (tomados de una muestra de al menos 60 hojas por tratamiento) se percibe cierta tendencia en *E. nitens* a mostrar una respuesta positiva a la fertilización, no así *E. globulus*, que en los períodos posteriores se observó bastante deteriorado a causa de ataque de *Botritis*. La diferencia mostrada en *E. nitens*, se debería a un aumento del peso de la hoja en relación a su área, lo cual se explicaría por el aumento en la cantidad de nutrientes en los tejidos foliares en conjunto con el incremento en la actividad fotosintética (Kriedemann and Cromer, 1996).

## 6.- CONCLUSIONES

Después de dos años y seis meses de efectuada la fertilización sobre plantaciones de *E. globulus* y *E. nitens*, cuya edad era de 7 años, empleando una mezcla de urea, fosfato mono amónico y soprocal como fuentes de nitrógeno, fósforo y calcio, se obtuvieron las siguientes conclusiones:

- En cuanto al incremento en DAP, altura, área basal y volumen, no se registraron diferencias estadísticamente significativas entre los tratamientos, durante un período de dos años (marzo 99 – marzo 2001), pero se confirmaron las diferencias entre especies a un 95% y 99% de confiabilidad, siendo *E. nitens* superior en incrementos dasométricos.
- En *E. nitens*, el tratamiento T5 (240, 180 y 180 g por planta de P, N y Ca respectivamente) presentó mayores incrementos diamétricos y de área basal.
- Se detectaron efectos positivos en *E. nitens* luego de un año de efectuada la fertilización, los cuales se traducen en una mayor captación de nutrientes a nivel foliar por el tratamiento que recibió una dosis más alta de fertilizantes (T5: 240, 180 y 180 g por planta de P, N y Ca respectivamente), lo que confirmó una tendencia clara de respuesta por parte de este tratamiento.
- Para *E. nitens* el análisis vectorial dedujo que los elementos agregados, N y P limitaban el crecimiento. En el tratamiento T4 (180, 120 y 120 g por planta de P, N y Ca respectivamente) se presentaron incrementos en los niveles de nutrientes, existiendo dilución de calcio, situación que se acentúa en T5. Esto indica que la respuesta sigue el siguiente orden para esta especie: T5 (240, 180 y 180 g por planta de P, N y Ca respectivamente) > T4 (180, 120 y 120 g por planta de P, N y Ca respectivamente) > T3 (testigo), que teóricamente debería reflejarse en términos dasométricos en un mediano plazo.
- En *E. globulus* los incrementos diamétricos fueron muy similares para el tratamiento testigo y el tratamiento T1 (180 g de P, 120 g de N y 120 g de Ca por planta) y superiores al tratamiento T2 (240, 180 y 180 g por planta). Sin embargo, T1 presentó las mejores condiciones en cuanto a niveles de nutrientes foliares, lo que podría indicar una leve tendencia de este tratamiento a responder positivamente a la fertilización.
- El análisis vectorial concluye que existió una variable antagónica en *E. globulus* que afectó marcadamente al tratamiento T2 (240, 180 y 180 g por planta). Las observaciones de terreno confirmaron la presencia de *Botritis* durante el período de estudio, lo cual afectó negativamente el desarrollo de las parcelas de *E.*

*globulus*, provocando defoliación y un aumento de los requerimientos de energía de mantención.

- El peso foliar específico, variable altamente relacionada con la productividad, indicó el siguiente orden para los tratamientos: en *E. globulus*  $T_0 > T_1 > T_2$  y en *E. nitens*  $T_5 > T_4 > T_3$ , lo que sugiere dicha tendencia en *E. nitens*.
- Las relaciones entre nutrientes reflejaron un aumento general en la captación de N en comparación a P durante el período de estudio, producto de la fertilización. Esto se vislumbra a pesar de una disminución progresiva en concentración de nutrientes. En *E. globulus* las condiciones iniciales indicaron menores niveles de N. Para el caso de *E. nitens*, los niveles iniciales de las parcelas fertilizadas se presentaron en equilibrio.
- La fertilización indujo una mayor captación de K en todos los tratamientos. La mayor concentración foliar de K en comparación con los elementos aplicados N y P, se explica por una dilución de estos elementos. Los elevados requerimientos de K lo sitúan como un elemento limitante dentro del ensayo.
- En cuanto al Ca, se presentó el siguiente orden en la captación: para *E. globulus*  $T_2 > T_1 > T_0$ , lo que concuerda con la mayor oferta del nutriente en el suelo. Para *E. nitens*  $T_5 < T_4 < T_3$ ; lo que sugiere dilución del elemento.
- El boro mantuvo los mayores incrementos relativos al tratamiento testigo en *E. nitens* y destaca entre los más altos en *E. globulus*, lo que sugiere que este elemento fue el más requerido por los árboles.
- Se marca una diferencia notoria entre ambas especies, mientras *E. globulus* presenta problemas notorios en cuanto al crecimiento bajo las condiciones ambientales presentes en el predio, *E. nitens* se desarrolla en buenas condiciones.
- Previo a la aplicación de fertilizantes, los niveles de nutrientes en las hojas de ambas especies se presentaron dentro del rango óptimo. Por lo tanto, el suelo contenía un buen nivel de nutrientes.
- La escasa respuesta a la fertilización, podría deberse a que las plantaciones en edad madura, responden más lentamente a la fertilización que plantaciones juveniles; lixiviación de los nutrientes; buena fertilidad del suelo y/o escasa captación de fósforo, especialmente por *E. globulus*.

## 7.- RECOMENDACIONES

- El actual estudio sugiere que para maximizar estos efectos, los fertilizantes podrían ser aplicados en primavera, coincidiendo con la estación de máximo crecimiento en diámetro.

- Un parámetro interesante a considerar sería la producción de hojarasca, ya que es una variable relacionada con la productividad.
- Una variable que pudo haber incluido este estudio es la medición de los cambios de ahuzamiento fustal, ya que se relaciona estrechamente con el desarrollo de la copa (biomasa foliar), que a su vez constituye una variable de respuesta a la fertilización.
- En suelos que presentan alto lavado de nutrientes, y pH ácido el fósforo disponible es menor. De esta manera, fertilizaciones correctoras NPK, con alta proporción en P, mejorarían el crecimiento de los árboles.
- Las condiciones de viento predominantes en la zona de estudio interfieren la correcta toma de datos de altura. Es recomendable realizar mediciones de altura cuando estas condiciones de viento sean las más favorables.
- Las mediciones de DAP son más confiables que las de altura. Las interpretaciones de los resultados deberían privilegiar las basadas en los incrementos diamétricos.
- El análisis vectorial es una herramienta recomendable para evaluar efectos en tratamientos silviculturales como espaciamiento, irrigación y/o fertilización, competencia vegetal y poda; debido a su bajo costo y rapidez en los resultados.

## 8.- BIBLIOGRAFÍA

- AGUIRRE, A.**1997. Efecto de la competencia de malezas y fertilización sobre plantaciones de *Pinus radiata* D. Don en dos, tres y cuatro años de edad en la zona de Valdivia, X Región. Memoria Ing. Forestal. Universidad de Chile. Facultad de Ciencias Agrarias y Forestales. Santiago. Chile. 136p.
- ANDRADE, G; DA SILVA, H; FERREIRA, C; BELLOTE, A Y MORO, L.** 1995. Contribución del agua de lluvia en la oferta de nutriente minerales para el *Eucalyptus grandis*. In: Simposio IUFRO. Manejo Nutritivo de Plantaciones Forestales. Valdivia, Chile. pp. 141 – 145.
- APARICIO, J; GERDING, V; SCHLATTER, J; GREZ, R.** 2001. Dinámica de elementos nutritivos en la biomasa de *Eucalyptus nitens* al cuarto año de crecimiento, en un suelo rojo arcilloso del sur de Chile. In: Simposio IUFRO. Desarrollando el eucalipto del futuro. Valdivia, Chile. 12p.
- ARES, A Y FOWNES, J.** 2001. Productivity, resource use, and competitive interactions of *Fraxinus uhdei* in Hawaii uplands [en línea]. In: Can. J. For. Res. 31: 132–142 (2001). NRC Research Press website.  
<<http://www.nrc.ca/cisti/journals/sample/x00-156.pdf> > [consulta: 3 marzo 2003]
- ARRUDA, S. R., Y MALAVOLTA, E.** 2001. Nutricao e adubacao potassica em *Eucalyptus*. In: Informaciones Agronómicas No. 43, POTAFOS. Encarte Técnico 91:1-10. São Paulo. Brasil.
- BARROS, N.F Y NOVAIS, R.F.** 1996. Eucalypt Nutrition and Fertilizar Regimes in Brazil. In: Nutrition of *Eucalyptus*, pp. 335 – 355. CSIRO Publishing, Collingwood, Australia.
- BELLOTE, A; FERREIRA, C; DA SILVA, H Y ANDRADE, G.** 1995. Efecto de la aplicación de ceniza de caldera y residuo de celulosa en el suelo y en el crecimiento de *Eucalyptus grandis*. In: Simposio IUFRO. Manejo Nutritivo de Plantaciones Forestales. Valdivia, Chile pp. 317-322.

- BI, H.** 1999. Predicting stem volume to any height limit for native tree species in southern New South Wales and Victoria. *In*: New Zealand Journal of Forestry Science 29(2), pp. 318-331. New Zealand.
- BINKLEY, D.** 1993. Nutrición Forestal. Prácticas de Manejo. Limusa. México. 340p.
- BINKLEY, D.; STAPE, J.L.; RYAN, M.; BARNARD, H. AND FOWNES, J.** 2002. Age-related Decline in Forest Ecosystem Growth: An Individual-Tree, Stand-Structure Hypothesis [en línea]. *In*: Ecosystems (2002) 5: 58–67  
<[http://www.cnr.colostate.edu/~dan/papers/Ecosystems\\_5\\_2002.pdf](http://www.cnr.colostate.edu/~dan/papers/Ecosystems_5_2002.pdf)> [consulta: 2 julio 2003]
- BONELLI, C Y SCHLATTER, J.** 1995. Caracterización de suelos rojo arcillosos de la zona centro sur de Chile. *In*: Simposio IUFRO. Manejo Nutritivo de Plantaciones Forestales. Valdivia, Chile pp. 39-60.
- BUSSOTTI, F; BORGHINI, F; CELESTI,C; LEONCIO, C. AND BRUSCHI, P.** 2000. Leaf morphology and macronutrients in broadleaved trees in central Italy. *In*: Springer – Velag 2000.
- BRAÑAS, J; GONZÁLEZ-RÍO, F. Y MERINO, A.** 2000. Contenido y distribución de nutrientes en plantaciones de *Eucalyptus globulus* del noroeste de la Península Ibérica [en línea]. *In*: Invest. Agr.: Sist. Recur. For. Vol. 9 (2) pp. 317-334.  
<<http://www.inia.es/iaspf/2000/vol9-2/branas.pdf>> [consulta: 15 marzo 2003]
- BONOMELLI, C; PEÑA, I. Y SUÁREZ, D.** 2002. Contribution of leaves in the recycling process of N and P in *Eucalyptus* spp. *In*: Bosque 23(1): 61-77
- CHENG W. AND HORNG F.** 1994. Effect of *Eucalyptus* Plantations on Soil Fertility. Bull. Taiwan For. Res. Inst. New Series, 9(3):241-256.
- CLAIR, P.** 1997. Responses of *Eucalyptus globulus* spp. *globulus* and *E. grandis* to salinity and waterlogging [en línea]. Australian National University, 1997.  
<<http://www.ifa.unimelb.edu.au>> [consulta: 20 agosto 2001]
- CORNEJO, B.** 1982. Respuesta de una plantación de *E. globulus* (Labill) a la fertilización con Urea y Superfosfato triple en la comuna de Litueche en la sexta Región. Memoria Ing. Forestal. Universidad de Chile. Facultad de Ciencias Agrarias y Forestales. Santiago. 92p.

- DALLA TEA, F.** 1997. Replantación de *Eucalyptus grandis*: efectos de la quema de residuos y fertilización en suelos arenosos del noreste de Entre Ríos. Rev. Fac. de Agronomía, La Plata 102 (1): 23-31.
- DELL, B; MALAJCZUK, N; GROVE, T.** 1994. Nutrient Disorders in Plantation Eucalypts. Australian Centre for International Agricultural Research. 110p. Canberra, Australia.
- ESPAÑOL, E; ZAS, R Y VEGA, G.** 2000. Contenidos foliares en Macro y Micronutrientes de *Eucalyptus* en el Noroeste Español. In: Invest. Agr.: Sist. Recur. For. Vol. 9 (2), 2000.
- FERREIRA, C; DA SILVA, H; BELLOTE, A. Y ANDRADE, G.** 1995. Efecto de la aplicación de ceniza y residuos de celulosa en la descomposición y liberación de nutrientes de la hojarasca en plantaciones de *E. grandis*. In: Simposio IUFRO. Manejo Nutritivo de Plantaciones Forestales. Valdivia, Chile p 335-338.
- GERDING, V; SCHLATTER, J; APARICIO, JL. Y GREZ, R.** 2001. Rendimiento de *Eucalyptus nitens* con distintos manejos nutritivos en un suelo rojo arcilloso del sur de Chile. In: Simposio IUFRO. Desarrollando el eucalipto del futuro. Valdivia, Chile. 16p.
- GONZÁLEZ, C.** 1994. Evaluación de un Ensayo de Fertilización en *Eucalyptus globulus* Labill en las dunas de Chanco, Séptima Región. Memoria Ing. Forestal. Universidad de Chile. Facultad de Ciencias Agrarias y Forestales. Santiago. 99p.
- GORDON, A; LUNDGREN, C. AND HAY, E.** 1999. Composite taper equations to predict over – and under – bark diameter and volume of *Eucalyptus pilularis*, *E. globoidea*, and *E. Muelleriana* in New Zealand. In: New Zealand Journal of Forestry Science 29(2), pp. 311-317.
- GOYA J.F., J.L. FRANGI & F. DALLA TEA.** 1997. Relación entre biomasa aérea, área foliar y tipos de suelos en plantaciones de *Eucalyptus grandis* del NE de Entre Ríos, Argentina. Rev. Fac. Agronomía, La Plata 102(1): 11-21.
- HARPER, R; EDWARDS, J.; MCGRATH, J; REILLY, T. & WARD, S.** 1999. Performance of *Eucalyptus globulus* plantations in south-western Australia in relation to soils and climate [en línea]. CALMScience, Department of Conservation and Land Management. Australia. In website:  
<<http://www.mbac.com.au/pdf/feuc.pdf> > [consulta: 26 junio 2003]

- HAY, A. E., KIMBERLEY, M. O. AND KAMPFRAATH, B. M. P.** 1999. Monthly diameter and height growth of young *Eucalyptus fastigata*, *E. regnans*, and *E. saligna*. In: New Zealand Journal of Forestry Science 29(2), pp. 263-273.
- HERBERT, M.** 1996. Fertilizers and eucalypt plantations in South Africa. In: Nutrition of *Eucalyptus*, pp. 303 - 325. CSIRO Publishing, Collingwood, Australia.
- HUNT, M; BEADLE,C. AND CHERRY, M.** 1999. Allometric relationships between stem variables and leaf area in planted *Eucalyptus nitens* and naturally regenerating *Acacia dealbata*. In: New Zealand Journal of Forestry Science 29(2): 289-300.
- INIONS, G.** 1992. Studies on the growth and yield of plantation *Eucalyptus globulus* in South Western Australia [en línea]. Doctor of Philosophy - Thesis Title. The University of Western Australia. In website:  
<<http://www.ifa.unimelb.edu.au/abstracts/phd.htm> > [consulta: 22 abril 2003]
- JUDD T. S., ATTIWILL, P. M., ADAMS, M. A.** 1996. Nutrient concentrations in *Eucalyptus*: A synthesis in relation to differences between taxa, sites and components. In: Nutrition of *Eucalyptus*, pp. 123 – 153. CSIRO Publishing, Collingwood, Australia.
- KING, D.** 1999. Juvenile foliage and the scaling of tree proportions, with emphasis on *Eucalyptus* [en línea] . In: Issue, Sept, 1999.  
<[http://www.findarticles.com/cf\\_0/m2120/6\\_80/56022619/p1/article.html](http://www.findarticles.com/cf_0/m2120/6_80/56022619/p1/article.html)>  
[consulta: 21 mayo 2001]
- KRIEDEMANN, P. E. AND CROMER, R. N.** 1996. The Nutritional Physiology of the Eucalypts – Nutrition and Growth. In: Nutrition of *Eucalyptus*, pp. 109 – 121. CSIRO Publishing, Collingwood, Australia.
- LACLAU, J; RANGER, J; NZILA, JD; BOUILLET, J-P; DELEPORTE, P.** 2001. Nutrient cycling in *Eucalyptus* plantations in Congo. Consequences for the management of the stands. In: Simposio IUFRO. Desarrollando el eucalipto del futuro. Valdivia, Chile. 14p.
- LIMA W. P.,** 1993. *Eucalyptus* Environmental Issues, Edusp, São Paulo. Brazil. 301 p.
- LYON, A.** 1990. Análisis del efecto de la fertilización en plantaciones de un año de *Eucalyptus globulus* Labill., en los suelos volcánicos de la VIII Región. Memoria para optar al Título Profesional de Ingeniero Forestal. Universidad de Chile. Facultad de Ciencias Agrarias y Forestales. Santiago. 112 p.

- LUGO.** 1986. Solos, interpretación físico-química [en línea]. Cátedra de Química Xeral e Agrícola, E.U.I.T.A. España. In website:  
<[http://www.geocities.com/Yosemite/8300/anexo1\\_2.htm](http://www.geocities.com/Yosemite/8300/anexo1_2.htm) > [consulta: 26 mayo 2003]
- MACEDO, R; SOARES, R; SOARES, A.** 1996 “Status nutricional de *Eucalyptus* (na fase juvenil) introduzidos na Baixada Cuibana”, MT [en línea]. In: Cerne- v2. n2. 10p. In website:  
<<http://www.dcf.ufla.br-cerne-revistav2n2-1996-cerne.pdf>> [consulta : 20 junio 2002]
- MC LAUGHLIN.** 1996. Phosphorus in australian forest soils. In: Nutrition of *Eucalyptus*, pp. 1 – 30. CSIRO Publishing, Collingwood, Australia.
- MC PHERSON E.G., PEPPER, P. J.** 1998. Comparison of Five Methods for Estimating Leaf Area Index of Open-Grown Deciduous Trees. In: Journal of Arboriculture. 24(2): 98-111.
- MEAD. D. J. AND MANSUR I.** 1993. Vector analysis of foliage data to study competition for nutrients and moisture: an agroforestry example. In: New Zealand Journal of Forestry Science 23(1), pp. 27-39.
- MELO, V; DA COSTA, L; DE BARROS, N; FERREIRA, M Y FERREIRA, R.** 1995a. Caracterización mineralógica del suelo y su relación con la reserva mineral en parcelas con *Eucalyptus saligna*, en Río Grande do Sul, Brasil. In: Simposio IUFRO. Manejo Nutritivo de Plantaciones Forestales. Valdivia, Chile pp. 71-77.
- MELO, V; DE BARROS, N; DA COSTA, L; FERREIRA, R Y FERREIRA, M.** 1995b. Formas de K y de Mg en suelos de Río Grande do Sul, Brasil, y su relación con el contenido en la planta y con la producción en parcelas con *Eucalyptus saligna*. In: Simposio IUFRO. Manejo Nutritivo de Plantaciones Forestales. Valdivia, Chile pp. 82-87.
- MELO, V; FERREIRA, R; DE BARROS, N; FERREIRA, M Y DA COSTA, L.** 1995c. Balance nutricional, eficiencia de utilización y evaluación de la fertilidad del suelo en P, K, Ca y Mg, en parcelas con *Eucalyptus saligna*, en Río Grande do Sul, Brasil. In: Simposio IUFRO. Manejo Nutritivo de Plantaciones Forestales. Valdivia, Chile pp. 181-184.

- MOLINA, H.** 1982. Estudio de fertilización de Monte Bajo de *Eucalyptus globulus* Labill. En la Provincia de San Antonio. Memoria Ing. Forestal. Universidad de Chile. Facultad de Ciencias Agrarias y Forestales. Santiago. 145 p.
- MOORHEAD, D.** 1997. Forest fertilization speakers notes [en línea]. Georgia Cooperative Extension Service, Warnell School of Forest Resources, The University of Georgia, Athens, GA 30602 U.S.A. In website:  
<<http://www.bugwood.caes.uga.edu/FERTILIZATION/bFER+NOTE.html>>  
[consulta: 6 junio 2001]
- MORA, C.** 1996. Efecto del control de malezas y fertilización en plantaciones de Pino radiata (*Pinus radiata* D. Don) de cuatro años, establecidas en Valdivia, X Región. Memoria Ing. Forestal. Universidad de Chile. Facultad de Ciencias Agrarias y Forestales. Santiago. Chile. 129 p.
- MORONI, M. AND SMETHURST, P. J.** 2003. Litterfall nitrogen and phosphorus fluxes in two Tasmanian *Eucalyptus nitens* plantations [en línea]. In: Tasforests Vol. 14. Pp: 53 – 64.  
<[http://www.forestrytas.com.au/forestrytas/pdf\\_files/tasforests\\_may\\_2003/06.pdf](http://www.forestrytas.com.au/forestrytas/pdf_files/tasforests_may_2003/06.pdf)>  
[consulta: 17 octubre 2003]
- NIINEMETS, Ü.** 1996. Plant growth-form alters the relationship between foliar morphology and species shade-tolerance ranking in temperate woody taxa. In: Vegetatio 124, 145-153.
- NOVOA, R. Y VILLASECA, S.** 1989. Mapa Agroclimático de Chile. INIA, Santiago, Chile. 221 p.
- NÚÑEZ, M.** 1987. Analisis dasométrico de dos ensayos de fertilización en *Pinus radiata* D. Don. Estudio preliminar. Tesis U. de Concepción. Chillán. Chile. 57p.
- OLIVA, M; DE BARROS, N; DE MOUZA, M.** 1995. Interacción Ca – P y déficit hídrico en la “Seca de Ponteiros” de *Eucalyptus camaldulensis* Dehn. In: Simposio IUFRO. Manejo Nutritivo de Plantaciones Forestales. Valdivia, Chile pp. 125-132.
- OSTLE, B.** 1965. Estadística Aplicada, técnicas de estadística moderna, cuándo y dónde aplicarlas. Limusa – Wiley, México. 629p.
- PEREIRA, J.S; TOMÉ, M; MEADEIRA, M; OLIVEIRA, C; TOMÉ, J AND ALMEIDA, M.H.** 1996. Eucalypt Plantations in Portugal. In: Nutrition of *Eucalyptus*, pp. 371 – 387. CSIRO Publishing, Collingwood, Australia.

- PINILLA, JC; FERRANDO, M; MOLINA, MP.** 2001. Investigación modelo de crecimiento para eucalipto en Chile. Avances a la fecha. In: Simposio IUFRO. Desarrollando el eucalipto del futuro. Valdivia, Chile. 15p.
- PINKARD, E. A.** 1992. Photosynthesis and resource allocation in the crowns of *Eucalyptus nitens* (Deane and Maiden) following green pruning [en línea]. Doctor of Philosophy - Thesis Title . University of Tasmania.  
<<http://www.ifa.unimelb.edu.au/abstracts/phd.htm> > [consulta: 23 agosto 2002]
- PRADO, J. Y BARROS, S.** 1989. *Eucalyptus*: Principios de Silvicultura y Manejo. INFOR, CORFO. Santiago, Chile. 199 p.
- PRADO, J. Y TORO, J.** 1996. Silvicultura of eucalypt plantations in Chile. In: Nutrition of *Eucalyptus*, pp. 357 – 369. CSIRO Publishing, Collingwood, Australia.
- PUNTES, G; SUÁREZ, D.** 2001. Efecto de la dosis de N y P al establecimiento y post-establecimiento de plantaciones de *Eucalyptus nitens* Maiden y *Eucalyptus globulus* Labill en dos ecosistemas de la VIII Región. In: Simposio IUFRO. Desarrollando el eucalipto del futuro. Valdivia, Chile. 10 p.
- RUBILAR, R.** 1998. Control de malezas y fertilización de plantaciones de *Pinus radiata* D. Don establecidas en suelos metamórficos del predio Quivolgo II, Constitución, VII Región. Memoria Ing. Forestal. Universidad de Chile. Facultad de Ciencias Forestales. Santiago. Chile. 116 p.
- RUIZ, F; SORIA, F; PARDO, M Y TOVAL, G** 2001. Ensayos factoriales de fertilización en masas de *Eucalyptus globulus* (Labill.) de mediana edad. Análisis de rentabilidad de inversión por fertilización. In: Simposio IUFRO. Desarrollando el eucalipto del futuro. Valdivia, Chile. 9p.
- SANTO, L.** 2000. Fertilization of *Eucalyptus* for Rapid Canopy Closure on the Hamakua Coast in Pa'auilo [en línea]. In: Hawaii Agriculture Research Center. Forestry Report 4, May 2000.  
<<http://www.hawaiiag.org/harc>> [consulta: 12 junio 2003]
- SAUR, E., NAMBIAR, E. K. S., and FIFE, D. N.** 2000. Foliar nutrient retranslocation in *Eucalyptus globulus*. In: Summary Tree Physiology, 20. pp: 1105 –1112 (2000). Heron Publishing. Victoria, Canada.
- SIERRA, V; LÓPEZ, R; BRAWNER, J.** 2001. A comparison of *Eucalyptus nitens* and *Eucalyptus globulus* in the Andean Foothills and Central Valley of Chile. In: Simposio IUFRO. Desarrollando el eucalipto del futuro. Valdivia, Chile. 6p.

- SMETHURST, P.J. AND WANG, B.** 1998. Soil solution Phosphorus and *Eucalyptus nitens* roots in NP- treated microsites in highly phosphorus – fixing soil”. *In*: New Zealand Journal of Forestry Science 28(2), pp. 140-151. New Zealand.
- STAPE, J.L.; RYAN, M AND BINKLEY, D. 2002a.** Testing the 3-PG process-based model to simulate *Eucalyptus* growth with an objective approach to the soil fertility rating parameter [en línea]. *In* : Forest Ecology and Management. 18 p.  
<[www.cnr.colostate.edu/~dan/papers/FEM\\_Stope\\_2a.pdf](http://www.cnr.colostate.edu/~dan/papers/FEM_Stope_2a.pdf)> [consulta: 27 julio 2003]
- STAPE, J.L.; RYAN, M AND BINKLEY, D. 2002b.** *Eucalyptus* production and the supply, use and the efficiency of use of water, light and nitrogen across a geographic gradient in Brazil [en línea]. *In* : Forest Ecology and Management. 17 p.  
<[www.cnr.colostate.edu/~dan/papers/FEM\\_Stope\\_1b.pdf](http://www.cnr.colostate.edu/~dan/papers/FEM_Stope_1b.pdf)> [consulta: 27 julio 2003]
- TORAL, M.** 1988. El efecto de diversas intensidades de clareo en el crecimiento de Monte Bajo de *Eucalyptus globulus*. *In*: Actas Simposio Manejo Silvícola del género *Eucalyptus*. (Cap. XIV) CORFO- INFOR. Viña del Mar – Chile. pp. 1-22.
- TORO, J.** 1987. “La fertilización forestal en Chile, avances logrados hasta 1987”. *In*: Chile Forestal N° 143. Sept – 1987. pp 27 – 30.
- TORO, J.** 1995. Avances en fertilización en *Pino radiata* y *Eucalyptus* en Chile. *In*: Simposio IUFRO. Manejo Nutritivo de Plantaciones Forestales. Valdivia, Chile pp. 293-298.
- VAN DEN DRIESSCHE, R.** 1974. Prediction of mineral nutrient status of trees by foliar analysis. *In*: Botanical Review 40 (3): 347-394.
- WEETMAN, G. F.** 1989. Graphical vector análisis technique for testing stand nutritional status. W. J. Dyck and C. A. Mees (Ed.). Forest Research Institute, New Zealand, Bulletin 152, pp. 93-109.

## APÉNDICES

### APÉNDICE 1. Análisis estadístico para el incremento en DAP

1.1 Cuadro de análisis de covarianza para incrementos en DAP entre marzo 99 y marzo2001, utilizando como covariable DAP iniciales para un 95% y 99% de confianza.\* Denota diferencias significativas en un 95% y \*\* en un 99% de confianza.

Fuente de variación	Grados de libertad	Suma de cuadrados y productos			Desviaciones respecto a la regresión		
		$\sum x^2$	$\sum xy$	$\sum y^2$	$\sum x^2 - \frac{(\sum xy)^2}{\sum x^2}$	Grados de libertad	Cuadrado medio
Repeticiones	2	49,6	19,46	10,7			
Tratamientos							
Dosis	2	87,25	-8,37	19,74			
Especie	1	4110,2	1526,9	567,23			
dosis x especie	2	84,6	60,84	46,53			
Error experimental	10	1498,67	355,6	156,6	72,21	9	8,02
Dosis + error	12	1585,93	347,25	176,24	100,21	11	
Diferencias para probar entre medias de dosis ajustadas					27,99	2	13,99
Especie + error	11	5608,9	1882,53	723,83	91,99	10	
Diferencia para probar entre medias de especie ajustadas					19,77	1	19,77
dosis x especie + error	12	1583,27	416,47	203,13	93,58	11	
Diferencia para prueba entre dosis x especie					21,36	2	10,68
Fc1;9=(H:beta=0)=10,5 *		F 2,9;0,95= 4.26 F 2,9;0,99= 8.02 F 1,9;0,95 = 5,12 F 1,9;0,99=10,6	(dosis)Fc2;9=1,74  (especie)Fc1;9=2,46				

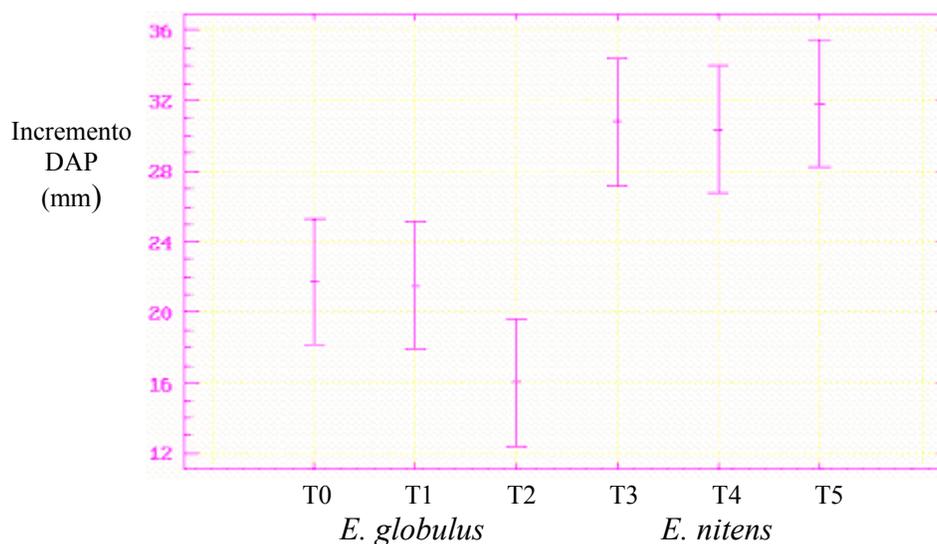
1.2 Cuadro de análisis de varianza para incrementos en DAP entre marzo 99 y marzo2001, 99% de confianza. \* Denota diferencias significativas en un 95% y \*\* en un 99% de confianza.

Fuente de variación	Grados de libertad	Suma de cuadrados	Cuadrado medio
Repeticiones	2	10,76	5,38
Tratamientos			
Dosis	2	19,64	9,82

Especie	1	567,23	567,23
dosis x especie	2	46,53	23,26
Error experimental	10	156,6	15,66
F 2,10;0,95= 4,1	(dosis)Fc2;10=0,63		
F 2,10;0,99= 7,56			
F 1,10;0,95 = 4,96	(especie)Fc1;10=36,22		
F 1,10;0,99=10,0			

### 1.3 Separación de medias para la respuesta DAP período marzo 1999 – marzo 2001.

Intervalos de confianza y comparación múltiple: LSD (95%)



### 1.4 Cuadro de prueba de comparaciones múltiples y contrastes para la fertilización entre los seis tratamientos definidos.

Método: LSD (Probabilidad 95%)

Nivel	Cuenta	Media	Grupos Homogéneos
3	3	16,03	A
2	3	21,52	A
1	3	21,74	A
5	3	30,36	B
4	3	30,81	B
6	3	31,8	B

Contraste	diferencia +/- límites
1-2	0,21667 7,20233
1-3	5,71333 7,20233
1-4	-9,07333 7,20233 *
1-5	-8,62000 7,20233 *
1-6	-10,0567 7,20233 *
2-3	5,49667 7,20233
2-4	-9,29000 7,20233 *

\* Denota una diferencia estadísticamente significativa.

## APÉNDICE 2. Análisis estadístico para el incremento en altura

**2.1 Cuadro de análisis de covarianza para incrementos en alturas entre marzo 99 y marzo 2001, utilizando como covariable alturas iniciales para un 95% y 99% de confianza.\* Denota diferencias significativas en un 95% y \*\* en un 99% de confianza.**

Fuente de variación	Grados de libertad	Suma de cuadrados y productos			Desviaciones respecto a la regresión		
		$\sum x^2$	$\sum xy$	$\sum y^2$	$\sum x^2 - \frac{(\sum xy)^2}{\sum x^2}$	Grados de libertad	Cuadrado medio
Repeticiones	2	199,55	99,12	125,32			
Tratamientos							
Dosis	2	18,35	34,51	435,99			
Especie	1	3462,12	2576,05	1916,74			
dosis x especie	2	122,85	27,82	6,42			
Error experimental	10	505,95	697,5	1616,91	655,32	9	72,81
Dosis + error	12	524,3	732,01	2052,91	1030,88	11	
Diferencias para probar entre medias de dosis ajustadas					375,56	2	187,78
Especie + error	11	3968,08	3273,55	3533,65	833,06	10	
Diferencia para probar entre medias de especie ajustadas					177,74	1	177,74
dosis x especie + error	12	628,8	725,33	1623,34	786,66	11	
Diferencia para prueba entre dosis x especie					131,34	2	65,67
Fc1;9=(H:beta=0)=13,2 **		F 2,9;0,95= 4.26	(dosis)Fc2;9=2,58				
		F 2,9;0,99= 8.02					
		F 1,9;0,95 = 5,12	(especie)Fc1;9=2,44				
		F 1,9;0,99=10,6					

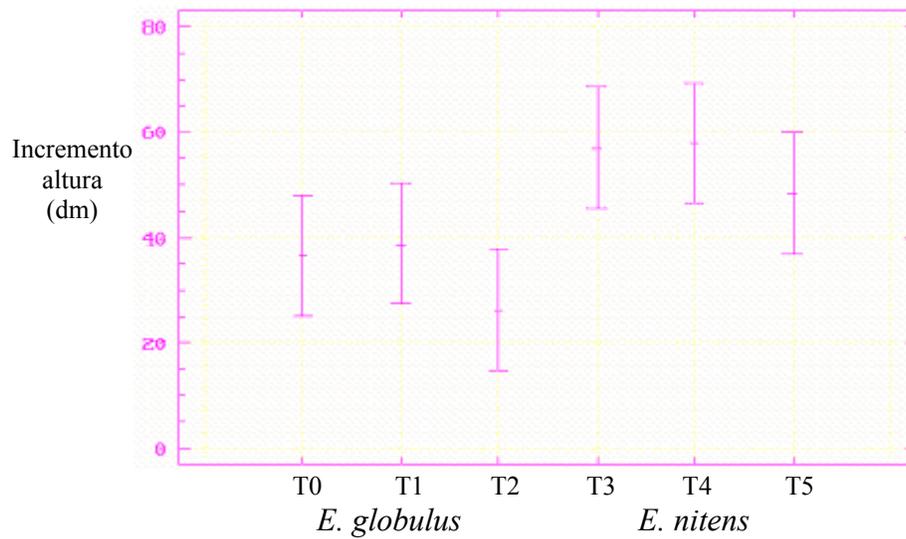
**2.2 Cuadro de análisis de varianza para incrementos en altura entre marzo 99 y marzo 2001, 99% de confianza. \* Denota diferencias significativas en un 95% y \*\* en un 99% de confianza.**

Fuente de variación	Grados de libertad	Suma de cuadrados	Cuadrado medio
Repeticiones	2	125,32	62,66
Tratamientos			
Dosis	2	435,99	217,99
Especie	1	1916,74	1916,74
dosis x especie	2	6,43	3,21
Error experimental	10	1616,91	161,69

F 2,10;0,95= 4,1	(dosis)Fc2;9=1,34
F 2,10;0,99= 7,56	
F 1,10;0,95 = 4,96	(especie)Fc1;9=11,84
F 1,10;0,99=10,0	**

### 2.3 Separación de medias para la respuesta altura período marzo 1999 – marzo 2001.

Intervalos de confianza y comparación múltiple: LSD (95%)



### 2.4 Cuadro de prueba de comparaciones múltiples y contrastes para la fertilización entre los seis tratamientos definidos.

Método: LSD (Probabilidad 95%)

Nivel	Cuenta	Media	Grupos Homogéneos
3	3	26,146667	A
2	3	36,630000	B
1	3	38,796667	B
6	3	48,206667	B
4	3	57,016667	C
5	3	57,936667	C
Contraste		diferencia +/- límites	
1-2		-2,16667	23,0077
1-3		10,4833	23,0077
1-4		-20,3867	23,0077

1-5	-21,3067	23,0077
1-6	-11,5767	23,0077
2-3	12,6500	23,0077
2-4	-18,2200	23,0077

\* Denota una diferencia estadísticamente significativa.

### APÉNDICE 3. Análisis estadístico para el incremento en área basal

**3.1 Cuadro de análisis de covarianza para incrementos en área basal entre marzo 99 y marzo 2001, utilizando como covariable áreas basales iniciales para un 95% y 99% de confianza.\* Denota diferencias significativas en un 95% y \*\* en un 99% de confianza.**

Fuente de variación	Grados de libertad	Suma de cuadrados y productos			Desviaciones respecto a la regresión		
		$\sum x^2$	$\sum xy$	$\sum y^2$	$\sum x^2 - \frac{(\sum xy)^2}{\sum x^2}$	Grados de libertad	Cuadrado medio
Repeticiones	2	16,5	12,4	9,8			
Tratamientos							
Dosis	2	12,56	-1,2	5,03			
Especie	1	706,52	469,27	311,68			
dosis x especie	2	19,8	17,54	16,97			
Error experimental	10	252,83	112,25	69,11	19,27	9	2,14
Dosis + error	12	265,4	111,05	74,14	27,68	11	
Diferencias para probar entre medias de dosis ajustadas					8,4	2	4,2
Especie + error	11	959,36	581,52	380,8	28,3	10	
Diferencia para probar entre medias de especie ajustadas					9,03	1	9,02
dosis x especie + error	12	262,74	129,8	86,08	24,29	11	
Diferencia para prueba entre dosis x especie					5,01	2	2,5
Fc1;9=(H:beta=0) =23,27 **	F 2,9;0,95= 4.26		(dosis)Fc2;9=1,96				
	F 2,9;0,99= 8.02						
	F 1,9;0,95 = 5,12		(especie)Fc1;9=4,22				
	F 1,9;0,99=10,6						

**3.2 Cuadro de análisis de varianza para incrementos en área basal entre marzo 99 y marzo 2001, 99% de confianza. \* Denota diferencias significativas en un 95% y \*\* en un 99% de confianza.**

Fuente de variación	Grados de libertad	Suma de cuadrados	Cuadrado medio
Repeticiones	2	9,8	4,9
Tratamientos			
Dosis	2	5,03	2,15
Especie	1	311,68	311,68
dosis x especie	2	16,96	8,48
Error experimental	10	69,11	6,91



2-4	-6.53000	4.51226 *
-----	----------	-----------

\* Denota una diferencia estadísticamente significativa.

#### APÉNDICE 4. Análisis estadístico para el incremento en volumen

**4.1 Cuadro de análisis de covarianza para incrementos en volumen fustal entre marzo 99 y marzo 2001, utilizando como covariable volúmenes iniciales para un 95% y 99% de confianza.\* Denota diferencias significativas en un 95% y \*\* en un 99% de confianza.**

Fuente de variación	Grados de libertad	Suma de cuadrados y productos			Desviaciones respecto a la regresión		
		$\sum x^2$	$\sum xy$	$\sum y^2$	$\sum x^2 - \frac{(\sum xy)^2}{\sum x^2}$	Grados de libertad	Cuadrado medio
Repeticiones	2	765,26	122,42	401,75			
Tratamientos							
Dosis	2	486,22	262,38	1694,82			
Especie	1	42170,8	51411,8	62677,8			
dosis x especie	2	1272,13	1648,06	2169,3			
Error experimental	10	11628,4	10473,7	14233,6	4799,85	9	533,31
Dosis + error	12	12114,6	10736,1	15928,4	6413,93	11	
Diferencias para probar entre medias de dosis ajustadas					1614,08	2	807,04
Especie + error	11	53799,3	61885,6	76911,4	5724,07	10	
Diferencia para probar entre medias de especie ajustadas					924,22	1	924,22
dosis x especie + error	12	12900,5	12121,8	16402,9	5012,83	11	
Diferencia para prueba entre dosis x especie					212,98	2	106,49
Fc1;9=(H:beta=0) =17,69 **	F 2,9;0,95= 4,26		(dosis)Fc2;9=1,51				
	F 2,9;0,99= 8,02						
	F 1,9;0,95 = 5,12		(especie)Fc1;9=1,73				
	F 1,9;0,99=10,6						

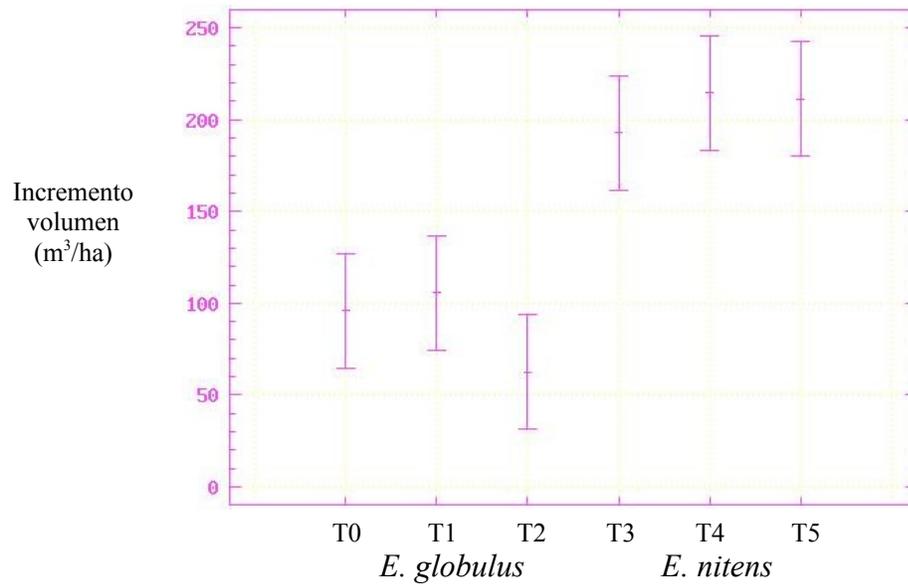
**4.2 Cuadro de análisis de varianza para incrementos en volumen fustal entre marzo 99 y marzo 2001, 99% de confianza. \* Denota diferencias significativas en un 95% y \*\* en un 99% de confianza.**

Fuente de variación	Grados de libertad	Suma de cuadrados	Cuadrado medio
Repeticiones	2	401,75	200,87
Tratamientos			
Dosis	2	1694,82	847,41
Especie	1	62677,82	62677,82
dosis x especie	2	2169,84	1084,67
Error experimental	10	14233,64	1423,36

F 2,10;0,95= 4,1	(dosis)Fc2;9=0,59
F 2,10;0,99= 7,56	
F 1,10;0,95 = 4,96	(especie)Fc1;9=44,03
F 1,10;0,99=10,0	**

#### 4.3 Separación de medias para la respuesta volumen período marzo 1999 – marzo 2001.

Intervalos de confianza y comparación múltiple: LSD (95%)



#### 4.4 Cuadro de prueba de comparaciones múltiples y contrastes para la fertilización entre los seis tratamientos definidos.

Método: LSD (Probabilidad 95%)

Nivel	Cuenta	Media	Grupos Homogéneos
3	3	62.69333	A
1	3	95.76000	A
2	3	105.81333	B
4	3	192.83000	C
6	3	211.07000	C
5	3	214.45333	C

Contraste	diferencia +/- límites	
1-2	-10.0533	62.1310
1-3	33.0667	62.1310
1-4	-97.0700	62.1310 *
1-5	-118.693	62.1310 *
1-6	-115.310	62.1310 *
2-3	43.1200	62.1310
2-4	-87.0167	62.1310 *

\* Denota una diferencia estadísticamente significativa.

## APÉNDICE 5. Análisis estadístico para la variación porcentual en concentración de nutrientes foliares

### 5.1 Cuadro de análisis de covarianza para la variación porcentual del nivel de nutrientes foliares período marzo 1999 – marzo 2000.

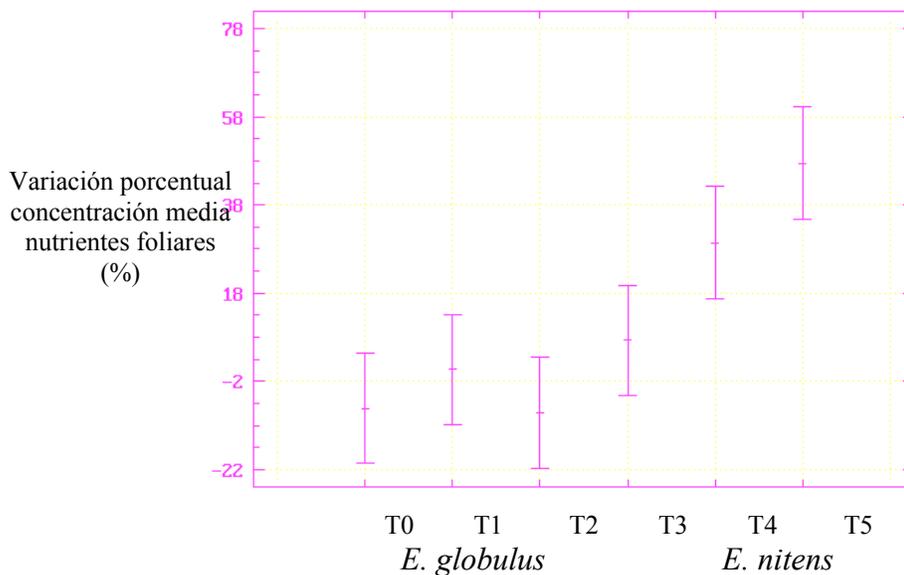
Fuente de variación	Suma de cuadrados	d.f.	Cuadrado medio	F-radio	Nivel de Sig.
COVARIABLE					
Nivel inicial Nutrientes Marzo 1999	5848,94	1	5848,94	7,61	0,0084 **
EFFECTOS					
A: Especie	16751,91	1	16751,91	21,795	0,0000 **
B: Tratamiento	8577,808	4	2144,45	2,79	0,0377 *
C: Tipo de Nutriente	47893,64	9	5321,52	6,924	0,0000 **
RESIDUAL	33818,77	44	768,61		
TOTAL (CORREGIDO)	111260,26	59			

\* Denota una diferencia estadística significativa

\*\* Denota una diferencia estadística muy significativa

### 5.2 Separación de medias para la variación porcentual de la concentración media de nutrientes foliares período marzo 1999 – marzo 2000.

Intervalos de confianza y comparación múltiple: LSD (95%)







2 - 3	3,376	18,3088
2 - 4	18,585	18,3088 *

\* Denota una diferencia estadísticamente significativa.

## APÉNCIDE 6. Prueba de normalidad

Figura resultante de las pruebas de normalidad para los DAP iniciales del ensayo Pampa Gorda (Microsoft Statistica 5.0).

