

COLEGIO DE POSTGRADUADOS

INSTITUCIÓN DE ENSEÑANZA E INVESTIGACIÓN EN CIENCIAS AGRÍCOLAS

CAMPUS MONTECILLO

POSTGRADO FORESTAL

**FERTILIZACIÓN CON POTASIO Y BORO
EN PLANTACIONES FORESTALES
COMERCIALES DE *Eucalyptus spp.* EN EL
SURESTE MEXICANO**

Mitzy Irais Rodríguez Juárez

T E S I S

**PRESENTADA COMO REQUISITO PARCIAL
PARA OBTENER EL GRADO DE:**

MAESTRA EN CIENCIAS

MONTECILLO, TEXCOCO, EDO. DE MÉXICO

2013

La presente tesis titulada: “Fertilización con potasio y boro en plantaciones forestales comerciales de *Eucalyptus spp.* en el Sureste Mexicano” realizada por la alumna: Mitzy Irais Rodríguez Juárez bajo la dirección del Consejo Particular indicado, ha sido aprobada por el mismo y aceptado como requisito parcial para obtener el grado de:

**MAESTRA EN CIENCIAS
FORESTAL**

CONSEJO PARTICULAR

CONSEJERO

Dr. Alejandro Velázquez Martínez

ASESOR

Dr. Armando Gómez Guerrero

ASESOR

Dr. Arnulfo Aldrete

ASESOR

Dra. Marivel Domínguez Domínguez

Montecillo, Texcoco, Estado de México, Septiembre de 2013.

AGRADECIMIENTOS

Al CONACYT por otorgarme la beca para llevar a cabo mis estudios de Maestría.

Al Colegio de Postgraduados Campus Montecillo por haberme permitido la realización de mis estudios

A la empresa Forestaciones Operativas de México S.A. de C.V. por haberme otorgado las facilidades para llevar a cabo esta investigación.

Al Dr. Alejandro Velázquez M. por haber sido mi guía durante la realización de esta tesis, por sus consejos, conocimientos y atinados comentarios,

Al Dr. Armando Gómez G. por sus importantes contribuciones y recomendaciones para que este documento se concluyera.

Al Dr. Arnulfo Aldrete por sus valiosas sugerencias y recomendaciones, así como su inquietud para la conclusión del documento.

A la Dra. Marivel Domínguez del Colegio de Postgraduados Campus Tabasco por todas las atenciones prestadas durante la fase de campo y por sus consejos y recomendaciones.

Al Ing. Juan Ramón Aguilar y al Ing. Manuel Mápula por su apoyo en la recopilación de información de este estudio, así como durante la realización de la fase de campo.

A Ninfa, Arely, Leo y José Luis por su apoyo en la realización de la fase de campo, porque sin su ayuda no hubiese podido realizar esta investigación.

DEDICATORIA

Con todo mi amor a la personita que tiene atrapado mi corazón, mi hijo “Emiliano”, quien me da las fuerzas para seguir adelante y el querer ser mejor persona cada día.

A mi esposo “José Luis” que me da ánimo para superarme en cada momento y por su gran comprensión y tolerancia.

A mis papás (Margarita y Fernando) por su gran apoyo incondicional para la conclusión de este proyecto en mi vida.

A mi hermano “Fer” por cuidar de mí Emi cuando lo necesité.

A tí que nunca te olvido y siempre te llevo en mi corazón y que aunque pasen los años siempre te llevo presente...Ah!!! Si estuvieras aquí!!!

CONTENIDO

1. INTRODUCCIÓN	1
2. HIPÓTESIS	3
3. REVISIÓN DE LITERATURA.....	4
3.1. DESCRIPCIÓN DE LAS ESPECIES.....	4
<i>El género Eucalyptus</i>	4
<i>Eucalyptus urophylla S.T. Blake</i>	5
<i>Eucalyptus grandis Hill ex Maiden</i>	9
3.2. FUNCIÓN DEL POTASIO EN LAS PLANTAS.....	13
3.3. FUNCIÓN DEL BORO EN LAS PLANTAS.....	13
3.4. RESPUESTAS DE LA APLICACIÓN DE K Y B.	15
<i>Incremento de la biomasa aérea</i>	16
<i>Incremento en diámetro.</i>	16
<i>Incremento en altura.</i>	16
<i>Incremento del Índice de Área Foliar (IAF).</i>	17
<i>Efecto en las características de la madera.</i>	17
3.5. RELACIÓN ENTRE CRECIMIENTO Y FOTOSÍNTESIS.....	18
3.6. LA FERTILIZACIÓN Y SU RELACIÓN CON EL CONTENIDO DE NUTRIENTES EN LAS HOJAS.	18
4. MATERIALES Y MÉTODOS	19
4.1. LOCALIZACIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO.....	19
4.2. MATERIAL BIOLÓGICO	19
4.3. APLICACIÓN DE FERTILIZANTES	20
4.4. TRATAMIENTOS.....	20
4.5. OBTENCIÓN DE DATOS.....	21
4.6. MUESTREO DE COMPARTIMENTOS DEL ÁRBOL PARA ESTIMACIÓN DE BIOMASA.....	21

4.7.	ANÁLISIS DE DATOS	22
5.	RESULTADOS Y DISCUSIÓN	23
5.1.	CRECIMIENTO EN DIÁMETRO	23
5.2.	CRECIMIENTO EN ALTURA	26
5.3.	CRECIMIENTO EN VOLUMEN	29
5.4.	EFFECTO DE LA FERTILIZACIÓN CON BORO EN <i>E. UROPHYLLA</i>	31
	<i>Crecimiento en diámetro</i>	31
	<i>Crecimiento en altura</i>	32
	<i>Crecimiento en volumen</i>	33
5.5.	ACUMULACIÓN DE BIOMASA AÉREA	34
5.6.	CONTENIDO DE NUTRIMENTOS EN LAS HOJAS	35
6.	ANÁLISIS DE VECTORES	37
7.	CONCLUSIONES	43
8.	LITERATURA CITADA	44

ÍNDICE DE CUADROS

CUADRO 1. Biomasa de los compartimentos del árbol.	34
CUADRO 2. Contenido de nutrimentos por ha en follaje de <i>E. urophylla</i>	36
CUADRO 3. Proporciones nutrimentales del contenido de nutrimentos en follaje de <i>E. urophylla</i>	37

ÍNDICE DE FIGURAS

FIGURA 1. Crecimiento en diámetro de <i>E. grandis</i> a diferentes años con diferentes dosis de B.....	24
FIGURA 2. Crecimiento en diámetro de <i>E. urophylla</i> a diferentes años con diferentes dosis de B.....	24
FIGURA 3. Crecimiento en diámetro de <i>E. grandis</i> a diferentes años con diferentes dosis de K.	25
FIGURA 4. Crecimiento en diámetro de <i>E. urophylla</i> a diferentes años con diferentes dosis de K.	25
FIGURA 5. Crecimiento en altura de <i>E. grandis</i> en diferentes momentos del turno con diferentes dosis de B.....	26
FIGURA 6. Crecimiento en altura de <i>E. grandis</i> en diferentes momentos del turno con diferentes dosis de K.	26
FIGURA 7. Crecimiento en altura de <i>E. urophylla</i> en diferentes momentos del turno con diferentes dosis de b.	27
FIGURA 8. Crecimiento en altura de <i>E. urophylla</i> en diferentes momentos del turno con diferentes dosis de K.	28
FIGURA 9. Volumen de <i>E. grandis</i> a lo largo del turno con diferentes dosis de B.	29
FIGURA 10. Volumen de <i>E. urophylla</i> a lo largo del turno con diferentes dosis de B.	29
FIGURA 11. Volumen de <i>E. grandis</i> a lo largo del turno con diferentes dosis de K.	30
FIGURA 12. Volumen de <i>E. urophylla</i> a lo largo del turno con diferentes dosis de K.....	30

FIGURA 13. Crecimiento en diámetro de <i>E. urophylla</i> a lo largo del turno fertilizado con diferentes dosis de Boro.	32
FIGURA 14. Crecimiento en altura de <i>E. urophylla</i> fertilizado con diferentes dosis de Boro.	32
FIGURA 15. Incremento en volumen de <i>E. urophylla</i> fertilizado con diferentes dosis de Boro.	34
FIGURA 16. Compartimento de la biomasa en diferentes compartimentos del árbol.....	35
FIGURA 17. Respuesta del N foliar a la aplicación de diferentes dosis de B en <i>E. urophylla</i>	38
FIGURA 18. Respuesta del P foliar a la aplicación de diferentes dosis de B en <i>E. urophylla</i>	39
FIGURA 19. Respuesta del K foliar a la aplicación de diferentes dosis de B en <i>E. urophylla</i>	40
FIGURA 20. Respuesta del Ca foliar a la aplicación de diferentes dosis de B en <i>E. urophylla</i>	41
FIGURA 21. Respuesta del Mg foliar a la aplicación de diferentes dosis de B en <i>E. urophylla</i>	41
FIGURA 22. Respuesta del B foliar a la aplicación de diferentes dosis de B en <i>E. urophylla</i>	42

**FERTILIZACIÓN CON POTASIO Y BORO EN PLANTACIONES FORESTALES
COMERCIALES DE *Eucalyptus spp.* EN EL SURESTE MEXICANO**

Mitzy Irais Rodríguez Juárez, MC.

Colegio de Postgraduados, 2013.

RESUMEN

El presente estudio se realizó con la finalidad de conocer el efecto de la adición de B y K sobre el crecimiento de *Eucalyptus grandis* y *E. urophylla* en plantaciones forestales comerciales de la empresa Forestaciones Operativas de México, S.A. de C.V. (FOMEX) en Huimanguillo, Tabasco. Se eligieron 199 árboles de *E. urophylla* y 239 de *E. grandis* que recibieron durante el establecimiento diferentes dosis de K y B, a los cuales se les midieron diámetro y altura a las edades de 1.5, 4.5 y 11 años. El K no tuvo efecto sobre ninguna especie en ninguna variable, por lo cual se realizó un análisis por nivel de B en *E. urophylla*, dado que fue la única especie que respondió a este nutrimento. Además se realizó un muestreo destructivo en el que se dividió al árbol en fuste, ramas, ramillas+hojas para estimar su biomasa aérea y se evaluó el contenido de nutrimentos en follaje por medio de un diagnóstico gráfico de vectores. Los resultados muestran que el B favoreció la altura y volumen de *E. urophylla*, no así en la acumulación de biomasa aérea. El análisis de vectores mostró incremento en el contenido de N, P, K y Ca en el follaje, lo que indica que estos elementos pueden ser aprovechados para favorecer el crecimiento.

La aplicación de dosis baja de B resultó ser el nivel más adecuado para esta especie en este tipo de condiciones.

Palabras clave: plantaciones comerciales, crecimiento, biomasa aérea, nutrimentos, *Eucalyptus*.

BORON POTASSIUM FERTILIZATION AND COMMERCIAL FOREST

PLANTATION *Eucalyptus* spp. IN SOUTHEAST MEXICO

SUMMARY

This study was realized to evaluate the effect of Boron and Potassium fertilization on the growth of two species *Eucalyptus grandis* and *E. urophylla*, in commercial forestry plantations of Forestaciones Operativas de México, S.A. de C.V. (FOMEX) company in Huimanguillo, Tabasco, Mexico. 199 and 239 trees of *E. urophylla* and *E. grandis*, respectively, were selected from a stands that were fertilized during its establishment with different doses of Boron and Potassium. These trees were measured in DBH and height at 1.5, 4.5 y 11 years old. Given that Potassium did not show any single effect in any variable or species, the treatment comparison analysis was focused in Boron and *E. urophylla*, since only this species showed response to Boron fertilization. It also was estimated tree biomass throughout a destructive analysis portioning tree component (bole, branches, and leaves). In addition, foliar nutrient content was analyzed using vector analysis. The results show that Boron fertilization had effect on *E. urophylla* tree height and volume, however did not on aerial biomass.

Vector analysis showed an increase in N, P, K, and Ca foliar content indicating that these elements may be used to favor tree growth. The lowest doses of Boron was the fertilization level more suitable for this species in this growth condition.

Key words: commercial forestry plantations, tree growth, aerial biomass, nutrients, *Eucalyptus*.

1. INTRODUCCIÓN

De acuerdo con la SEMARNAT (2010), en México existen más de diez millones de hectáreas que cuentan con buena calidad de suelo y clima para generar crecimientos rápidos en plantaciones forestales comerciales (PFC), . Sin embargo, la superficie nacional de PFC para el año 2012 fue de 143 552 ha para especies maderables y 80 758 ha para especies no maderables, siendo el género *Eucalyptus* el que destaca por ser el que ocupa la mayor superficie plantada, representando el 21% del total (CONAFOR, 2012).

Las PFC se están convirtiendo en una fuente cada vez más importante de abastecimiento de madera para diversos fines. Se perciben como una solución alterna ambiental deseable cuando el aprovechamiento de los bosques naturales (especialmente de edad madura) no garantiza la conservación del recurso forestal, ni beneficios socioeconómicos sostenidos para las comunidades (Rivera *et al.*, 2008). Por lo tanto, las PFC (en particular, las de turnos cortos), se manejan como sistemas intensivos y reciben el aporte de nutrientes importantes en forma de fertilizantes (Rengel, 2007).

Una preocupación en torno a las PFC es que sus métodos intensivos puedan llevar al agotamiento de la fertilidad del suelo conduciendo a problemas nutrimentales permanentes (Pritchett, 1990). Por lo anterior, es importante reconocer que las respuestas a los problemas de nutrición mineral, se suman al conocimiento básico de la fisiología de las plantas, ya que hay que tener en cuenta que, el crecimiento de estas, requiere la incorporación de elementos esenciales (Salisbury y Ross, 2000). Por otro lado, aunque la productividad de los sistemas forestales está relacionada con una serie de factores ambientales que comprenden la radiación solar, temperatura, y agua; la disponibilidad y

absorción de nutrientes, sigue siendo un factor crítico en sistemas intensivos (Binkley, 1993).

Los terrenos agrícolas abandonados, las zonas con alto grado de perturbación y los suelos de baja fertilidad pueden ser destinados para uso silvícola y reforestarse con éxito mediante un complemento bajo de fertilizantes (Pritchett, 1990).

Entre los elementos esenciales para las plantas, se encuentran el Potasio (K) y el Boro (B). Una de las funciones principales del potasio, es la de activar muchas enzimas, además, el control de la apertura y cierre de estomas requiere del bombeo de K hacia el interior o exterior de las células guarda, lo cual cambia la turgencia de éstas. El potasio también interviene en el equilibrio de las cargas eléctricas de los aniones que pueden necesitarse para el movimiento activo de nutriente dentro de la planta y de la solución del suelo al interior de la raíz (Binkley, 1993). Por otro lado, el Boro es el micronutriente que comúnmente es más deficiente en las plantaciones forestales, causando muerte de ramas terminales y poco crecimiento (Pritchett, 1990).

Una de las empresas de Plantaciones Forestales Comerciales más importantes en México es FOMEX (Forestaciones Operativas de México S.A. de C.V.), la cual es pionera en el establecimiento y cosecha de eucalipto en Veracruz y Tabasco, y cuenta con una superficie plantada de alrededor de 10,000 ha (KUO, 2010). La empresa, con base en la experiencia de plantaciones de eucalipto en el mundo, decidió incluir la práctica de la fertilización con elementos básicos que se consideraban limitantes en el área, como una medida para asegurar la productividad en sus plantaciones forestales comerciales; por lo que, se establecieron parcelas experimentales para evaluar la respuesta de las plantaciones a la

adición de elementos como K y B, entre otros, durante el turno de crecimiento de los árboles ó de esta manera, determinar dosis de fertilización adecuadas para turnos posteriores. Los suelos del área se han reportado bajos en K (Pérez-Sandoval *et al.*, 2012) y aunque no se tienen reportes de deficiencia en B, el encalado como práctica complementaria para mejorar el pH o capas profundas de carbonatos de calcio, pudieran conducir a deficiencias de este elemento (Goldberg, 1997).

OBJETIVOS

Conocer el efecto de la adición de Potasio (K) sobre el incremento en biomasa aérea de plantaciones forestales de *E. urophylla* S.T. Blake y *E. grandis* Hill ex Maiden.

Conocer el efecto de la adición de Boro (B) sobre el incremento en biomasa aérea de plantaciones forestales de *E. urophylla* S.T. Blake y *E. grandis* Hill ex Maiden.

2. HIPÓTESIS

- ❖ H₀: La aplicación de potasio (K) y boro (B) en plantaciones forestales de *Eucalyptus urophylla* S.T. Blake y *E. grandis* Hill ex Maiden en suelos de Huimanguillo, Tabasco, no tiene ningún efecto sobre su crecimiento.

- ❖ H_a: La aplicación de K y B en plantaciones forestales de *Eucalyptus urophylla* S.T. Blake y *E. grandis* Hill ex Maiden en suelos de Huimanguillo, Tabasco tiene efecto sobre su crecimiento.

3. REVISIÓN DE LITERATURA

3.1. Descripción de las especies.

El género *Eucalyptus*

Los eucaliptos aunque son nativos de la región de Australia, actualmente son la especie vegetal más cultivada, particularmente en las zonas tropicales y subtropicales del mundo. Sus usos diversos, desde madera para construcción, combustible, celulosa, hasta la obtención de aceites esenciales, lo hacen ser un género muy valioso y ampliamente utilizado en el mundo. Hasta el momento se han descrito entre 700 y 800 especies (Brooker, 2002). La diversidad genética del género *Eucalyptus* es muy grande y muchas de las especies tienen una gran variación intraespecífica (Turnbull y Booth, 2002).

La mayoría de las especies de este género tienen semillas muy pequeñas con poco material de reserva en cada una, pero producen semillas en grandes cantidades, además de que pueden germinar aún después de haber pasado por adversidades ambientales (FAO, 1981).

El género tiene muchas características favorables para plantaciones forestales como las tasas de crecimiento elevadas, amplia adaptabilidad a los suelos y clima, la facilidad de manejo a través de rebrotes y madera de valor (Turnbull y Booth, 2002). Además, su rápido crecimiento y buen porte, lo hacen ideal para las prácticas modernas de cosecha y aptos para ser aprovechados para madera en rollo o como fuente de celulosa, sin embargo, las especies utilizadas para estos fines son un número muy reducido (Brooker, 2002). Su turno corto (10 años en promedio) y las propiedades de sus fibras, también lo hacen un género preferido para plantaciones comerciales y proyectos de captura de carbono (Mead, 2001).

De las cientos de especies que existen en los bosques naturales, muchas de ellas han sido introducidas y probadas por su capacidad de adaptación y utilidad, pero sólo unas pocas se utilizan en forma extensiva en PFC. En China, por ejemplo, más de 200 especies han sido introducidas, pero menos de diez se cultivan actualmente a una escala significativa; sin embargo, las especies que globalmente dominan las plantaciones son: *E. camaldulensis*, *E. globulus*, *E. grandis* y *E. tereticornis* (Turnbull y Booth, 2002).

Las tasas de crecimiento rápido de los eucaliptos se favorecen con la elección adecuada del sitio de plantación, prácticas culturales intensivas, la selección de las mejores especies y procedencias y, el mejoramiento genético (Mead, 2001).

***Eucalyptus urophylla* S.T. Blake**

a) Importancia

Las plantaciones más difundidas y de mayor extensión de esta especie se encuentran en Brasil. En tiempos recientes ha aumentado mucho el establecimiento de *E. urophylla* en plantaciones de zonas tropicales (Gunn y McDonald, 1992).

b) Descripción botánica.

Es un árbol alto que puede exceder los 50 m de altura en sitios favorables (Turnbull y Pryor, 1984). En la mayor parte de su ámbito natural, *E. urophylla* es un árbol forestal que tiene normalmente de 25 a 45 m de altura y menos de 1 m de diámetro, con un tronco recto que representa de la mitad, a las dos terceras partes de la altura del árbol. Los ejemplares excepcionales alcanzan 55 m de altura y hasta 2 m de diámetro (FAO, 1981). El fuste es recto. La corteza es lisa, con manchas cremas o rosas. Las hojas jóvenes son

pecioladas, de forma ovoide-redondeadas a alargadas, y alternas. En árboles adultos, las hojas son lanceoladas (Nieto y Rodríguez, 2003).

c) Distribución geográfica

Es uno de los pocos eucaliptos que no es endémico de Australia, es originario de Timor y de otras islas de Indonesia (Turnbull y Pryor, 1984). La especie está confinada en siete islas del Archipiélago Oriental de las Islas Menores de la Sonda, es decir, Flores, Adonara, Lomblen (Lembata), Pantar, Alor, Wetar y Timor. En su hábitat natural, se distribuye entre el rango latitudinal de $7^{\circ}30'$ a los 10° Sur, mientras que la longitud está entre 122° y 127° Este (Gunn y McDonald, 1992).

d) Condiciones Climáticas

Su rango altitudinal de distribución natural es de 300 a 3000 m, la precipitación es de 1000 a 2000 mm con máximas en verano (Turnbull y Pryor, 1984). Es especialmente común en Timor, Alor y Wetar por encima de 1000 m, pero en todas partes tiene una distribución en manchas. La banda altitudinal va de 70 m en Wetar, a 2960 m al este de Timor (Gunn y McDonald, 1992). Puede prosperar en lugares donde el clima es tropical o subtropical y la precipitación excede los 1000 mm anuales (Turnbull y Pryor, 1984). La distribución de la especie corresponde a zonas tropicales cálidas y estacionalmente secas. Debido a su proximidad al Ecuador, hay sólo una pequeña variación en las medias de las temperaturas máximas mensuales ($27-29^{\circ}\text{C}$ a 400 m.). Las precipitaciones son de carácter monzónico, con un máximo bien definido en verano, variando en su mayoría entre los 700 y 1500 mm con un máximo superior de 2500 mm en Timor (Gunn y McDonald, 1992).

Puede desarrollarse bien en lugares con precipitaciones anuales de 1000 a 1500 mm y con estaciones secas no muy rigurosas (FAO, 1981).

e) Suelo y Topografía

La especie tolera suelos químicamente pobres y demanda suelos con textura franca o arenosa mientras haya buena disponibilidad de agua (Delgado *et al.*, 2009). No tolera suelos arcillosos cuando el nivel freático es superficial ya que se crean condiciones de anoxia (Nieto y Rodríguez, 2003). Crece bien en suelos profundos, húmedos y bien drenados, con pH ácido o neutro derivados de suelos volcánicos o roca metamórfica. Tolerancia suelos pobres siempre que la textura retenga humedad en épocas de sequía (RISE, 2009; Pérez *et al.*, 2012).

f) Plagas y enfermedades

La especie es altamente resistente al cancro del fuste *Diaporthe cubense* el cual es endémico de Brasil. La defoliación causada por varios insectos reduce el incremento en crecimiento considerablemente (Turnbull y Pryor, 1984). En Brasil es mucho más resistente al hongo *Diaporthe cubensis* que *E. grandis* o *E. saligna*. En las Islas Salomón, el tallo es susceptible a ser dañado a causa de la trepadora *Merremia* (FAO, 1981). Las plántulas son susceptibles a *Damping off*, y en plantaciones, los árboles son atacados por larvas de gallina ciega, las cuales se alimentan de las raíces, pudiendo provocar la muerte del árbol a menos de un año después de la plantación (RISE, 2009).

g) Comportamiento en Plantaciones Comerciales

Se han reportado rendimientos promedio de 20 a 30 m³ ha⁻¹ año⁻¹ o mayores, bajo condiciones favorables de crecimiento (Mead, 2001). Presenta un crecimiento rápido y bajo condiciones favorables tiene un rendimiento de 30 m³ ha⁻¹ año⁻¹ a una edad entre 5 y 10 años (RISE, 2009; Pérez *et al.*, 2012).

h) Requerimientos nutricionales

La demanda nutrimental de la especie depende de las características del sitio de plantación, así como del tipo de suelo. El árbol recibe dos aplicaciones de fertilización: la primera a las dos semanas después de la plantación (N, P, B y Zn) y la segunda dos meses después de la primera aplicación (N, P, K y B). Generalmente el método de fertilización es manual, esparciendo el material fertilizante alrededor del árbol, a un radio de 0.6 m (RISE, 2009).

i) Características de la madera

La madera es dura y no se fisura con facilidad (Nieto y Rodríguez, 2003). El duramen es de color rosado a café rojizo. Las fibras son relativamente cortas. La madera es muy adecuada para la producción de pulpa blanqueada químicamente, con un rendimiento de pulpa para celulosa de 49.5%. La madera es menos densa en comparación con la de otros eucaliptos, la densidad básica está entre 0.54 y 0.57 g cm⁻³ (RISE, 2009).

j) Usos

Ampliamente empleada en la construcción pesada y puentes en Timor (FAO, 1981). Se utiliza principalmente para la celulosa y tableros. También se utiliza como postes de

transmisión eléctrica y postes de larga duración, en la construcción ligera y pesada, ebanistería y carpintería, y para tableros contrachapados y aglomerados. Es útil en la protección de las riberas de los ríos y para proporcionar sombra. Es también una especie para producción de miel con buenas propiedades. Debido a que la especie no tiene requisitos edáficos muy importantes, es conveniente para la reforestación, tanto en suelos inundados, como en suelos secos de tierras bajas tropicales (Nieto y Rodríguez, 2003).

***Eucalyptus grandis* Hill ex Maiden**

a) Importancia

Es uno de los eucaliptos con mayor importancia comercial (Meskimen y Francis, 1990; Turnbull y Booth, 2002). Fuera de su lugar de origen es la principal especie plantada, especialmente para la producción de celulosa (Turnbull y Pryor, 1984).

b) Descripción botánica.

Pertenece a la familia Myrtaceae, es un árbol de porte alto, de 40 a 60 m de altura y hasta 2 m de diámetro (Penfold y Willis, 1961; CATIE, 1994). Su forma es excelente, con unos fustes claros, rectos y altos, de hasta dos tercios de la altura total (Meskimen y Francis, 1990). Las hojas adultas son alternadas de 13 a 20 cm x 2 a 3.5 cm, lanceoladas, coloración del haz verde oscuro, algunas lustrosas, envés pálido, pecioladas. Las nervaduras son moderadamente conspicuas. Las inflorescencias son axilares, de 3 a 10 flores en umbela, de 10 a 12 mm con pedúnculo largo. Los frutos son sésiles o con pedicelos cortos, piriformes a cónicos, glaucos (Penfold y Willis, 1961). La corteza es delgada y caduca, desprendiéndose en fajas para revelar una superficie lisa marcada con unos patrones ondulantes blanco plateado, gris pizarra, terracota o verde claro. En

ocasiones persiste un forro cortical gris claro, en forma de planchas o con fisuras, sobre los primeros 1 a 2 m de la base del tronco (Meskimen y Francis, 1990). Su madera es rosada a ligeramente pardo rojiza clara (FAO, 1981).

c) Distribución geográfica

Su nombre común es eucalipto rosado (rose gum) (Meskimen y Francis, 1990) o también conocido como grandis (CATIE, 1994), es nativo de la costa este de Australia (Meskimen y Francis, 1990), de los estados australianos de Queensland y New South Wales (FAO, 1981; Meskimen y Francis, 1990). La distribución natural se encuentra entre las latitudes 16 y 33°S, aunque principalmente se presenta entre los 26 y 33°S. Se encuentran poblaciones aisladas en el centro y norte de Queensland. En New South Wales usualmente se presenta por arriba de los 350 m, pero se restringe a altas elevaciones y bajas latitudes, se puede encontrar por arriba de los 900 m en Atherton Tableland (Turnbull y Pryor, 1984).

d) Clima

El clima en la distribución natural australiana del eucalipto rosado es subtropical húmedo, con temperaturas mínimas promedio durante los meses más fríos entre 2 y 10 °C y temperaturas máximas promedio de cerca de 29 °C durante los meses más calientes (Meskimen y Francis, 1990). El rango de precipitación promedio anual de la especie en forma natural es de 1000 a 1800 mm con lluvias máximas en verano-otoño. Se registran 20 mm de lluvia durante los meses más secos del año. Aunque los sitios costeros en los que se desarrolla el árbol son libres de heladas, éstas pueden presentarse de forma ocasional en las zonas altas y en las depresiones de la costa (Turnbull y Pryor, 1984). Ha sido plantada en

lugares con precipitación anual entre 800 y 2500 mm. Se desarrolla bien en lugares con temperaturas máximas entre 17 y 25 °C (CATIE, 1994).

e) Suelo y Topografía

E. grandis en su zona de distribución natural se presenta en barrancas, aunque también se le puede encontrar en altiplanos. Los suelos son profundos, bien drenados, de origen aluvial o volcánico (Turnbull y Pryor, 1984). Se encuentra principalmente en llanuras húmedas pero no anegadas, en pendientes reducidas, algunas veces se presenta en altiplanicies en áreas con buena precipitación (Penfold y Willis, 1961). Demanda sitios con suelos de textura suelta, libres de compactación (CATIE, 1994).

f) Plagas y enfermedades

Aunque es resistente a patógenos comunes, puede ser atacado por insectos defoliadores; sin embargo, el daño provocado por éstos se ve disminuido en rodales menos densos especialmente cuando los árboles son asistidos con fertilización para incrementar su tasa de crecimiento (Turnbull y Pryor, 1984).

Los hongos que atacan la raíz como *Pythium* y *Phytophthora* pueden causar grandes pérdidas de plántula en vivero (Turnbull y Pryor, 1984).

g) Daños por agentes físicos

Fuego. Los tallos que sobreviven a un incendio usualmente tienen madera con defectos (Turnbull y Pryor, 1984).

Heladas. Las heladas severas dañan a los brinzales de eucalipto rosado incluso en la zona de plantación comercial, pero rebrotan y crecen de nuevo de manera vigorosa (Meskimen y Francis, 1990).

Sequía. Si el clima es fresco, las plántulas de *E. grandis* pueden resistir la sequía, en cambio, existe gran mortalidad en condiciones cálidas. La falta de humedad puede limitar el crecimiento de árboles sin necesariamente causar daño físico (Turnbull y Pryor, 1984).

k) Comportamiento en Plantaciones Comerciales

Tiene un incremento en diámetro de 1.3 a 1.9 cm año⁻¹ (Penfold y Willis, 1961). En Sudáfrica es manejado para pulpa o puntales en ciclos de rotación corto (8-12 años) y para madera de aserrío en ciclos más largos (16-28 años) (Turnbull y Pryor, 1984).

l) Requerimientos nutricionales

La planta es sensible a la deficiencia de boro, problema que se presenta en suelos derivados de cenizas volcánicas, los síntomas se pueden confundir con los originados por sequía, sin embargo, la deficiencia puede corregirse fácilmente aplicando bórax (CATIE, 1994). El boro también puede ser un problema en suelo arenoso y donde el pH sea mayor de 8.0 (Goldberg, 1997).

m) Características de la madera

La madera de *E. grandis* es más ligera y suave que la de otros eucaliptos (Turnbull y Pryor, 1984). Böthig (2001) determinó la densidad promedio para la madera de *E. grandis* de 0.463 g cm⁻³ y dureza promedio de 30.3 MPa.

n) Usos

En su lugar de origen es utilizado en plantaciones de enriquecimiento (Turnbull y Pryor, 1984). En California, E.U., se le ha sometido a pruebas exitosas para pulpa y combustible y su madera posee un buen potencial para ser usada para postes, paletas, chapa decorativa y otros productos (Meskimen y Francis, 1990). En Colombia es usada como planta medicinal contra la tos (Arango, 2004).

3.2. Función del Potasio en las plantas

Los minerales de Potasio (principalmente los feldespatos de K), comúnmente se encuentran en las rocas y en las partículas de suelo, y el intemperismo de estos minerales constituye una fuente importante de este elemento para los bosques. Parte del K se incorpora también a los ecosistemas en forma de sales disueltas en la precipitación pluvial. La forma como lo absorben las plantas es el catión K^+ , el cual permanece en esta forma para realizar todas sus funciones en las plantas. El potasio interviene también en el equilibrio de las cargas eléctricas de los aniones que pueden necesitarse cuando existe un exceso de nutrientes catiónicos (Binkley, 1993).

3.3. Función del Boro en las plantas

El Boro aprovechable está en forma de borato $[B(OH)_3]$. Aún no se ha elucidado por completo la función que tiene este elemento dentro de las plantas, pero cuando éstas crecen en ausencia de este elemento, generalmente presentan un desarrollo anormal. Es

probable que el boro se utilice en el metabolismo de los carbohidratos, y su deficiencia es uno de los problemas nutricionales más comunes en la agricultura (Binkley, 1993).

El B, es un elemento esencial para el crecimiento de los árboles y, cuando la adición de éste es inadecuada, se manifiestan severos desordenes en el crecimiento (Lehto *et al.*, 2010).

Las deficiencias en B se han manifestado en plantaciones forestales en más de 80 países (Shorrocks, 1997), en sitios con precipitaciones que provocan fuertes escurrimientos y en suelos con pH alcalino (Bell y Dell, 2008). Generalmente las hojas de los árboles contienen menos de 10 microgramos de B por gramo de tejido y la fertilización con 5 a 10 kg de B ha⁻¹ suele ser suficiente para aligerar las limitaciones sobre el crecimiento (Binkley, 1993).

El B suele ser deficiente, especialmente cuando se aplica cal (Gupta y Cutliffe 1972). Por ejemplo el contenido de B en las hojas de *Picea abies* disminuyó después de la aplicación de cal (Lehto y Malkonen, 1994), especialmente cuando ésta se aplica en conjunto con fertilización de N, NP o NPK (Aronsson, 1980). Sin embargo, esta situación se puede evitar cuando se aplica fertilización con B (Braekke, 1983).

La deficiencia de Boro usualmente se corrige mediante la aplicación de 10 a 20 kg ha⁻¹ de bórax comercial, o su equivalente de colemanita o de borosilicatos vítreos (Pritchett, 1990).

3.4. Respuestas a la aplicación de K y B.

La fertilización produce varios cambios en la fisiología de los árboles que resultan en un mayor crecimiento del fuste. Las hojas aumentan su actividad fotosintética cuando aumentan los niveles de clorofila, los árboles pueden expandir su dosel, o bien puede cambiar la distribución de los productos fotosintéticos (Binkley, 1993).

Algunos ejemplos de dosis de fertilización con Potasio que se aplican a plantaciones comerciales de eucalipto son 116 kg K ha⁻¹ como KCl y entre 120 y 180 kg K₂O ha⁻¹ (Almeida *et al.*, 2010; Arruda y Malavolta, 2001).

Mientras las principales respuestas de fertilización de plantaciones de eucalipto han sido a la aplicación de nitrógeno y fósforo, otros nutrientes pueden ser limitantes en condiciones de sitio específicas (Florence, 1994). Por ejemplo, se ha encontrado que el boro puede afectar el crecimiento de *E. deglupta* en Papua Nueva Guinea, mientras que en Brasil y Nigeria, este nutriente se adiciona conjuntamente con NPK en plantaciones comerciales de *Eucalyptus grandis* (Lamb, 1976). Por otro lado, en China el B se ha identificado como un elemento limitante en plantaciones de eucalipto creciendo en asociación con ectomicorrizas, de tal suerte que, ahora se contempla como un elemento de aplicación rutinaria en algunas áreas (Dell y Malajezuk, 1994).

También se ha encontrado que el B reduce el daño a heladas cuando se adiciona en conjunto con NPK (Cooling y Jones, 1970); sin embargo, este efecto no se aprecia en *Eucalyptus delegatensis* y *E. nitens* (McKimm y Flinn, 1979).

Incremento de la biomasa aérea

Se recomienda el uso de fertilizantes para acelerar el desarrollo de *E. grandis* en plantaciones, ya que ha demostrado respuestas positivas en crecimiento inicial que se observa en el rendimiento final del rodal (INTA, 1995; Graciano *et al.*, 2009; Fernandez *et al.*, 2000). La fertilización en las etapas iniciales de las plantaciones de eucalipto permite un incremento de 23% de biomasa seca (Hunter, 2001).

Incremento en diámetro.

El diámetro de árboles de eucalipto es influenciado significativamente por la fertilización acelerando el crecimiento de las plantaciones (Misra *et al.*, 1998; Chamshama y Hall, 1987). Si se efectúa la aplicación de fertilizantes junto con técnicas de manejo silvícola como los aclareos, el incremento en diámetro es mayor (Stoneman *et al.*, 1996).

Incremento en altura.

Al igual que la respuesta en diámetro, el área basal y la altura también se ve beneficiada por la fertilización. Sin embargo, la respuesta positiva a la adición de fertilizantes sólo se observa en los primeros años de la plantación. Con fertilización potásica, las plantaciones de eucalipto pueden alcanzar incrementos de 33% en altura, de 118% en biomasa y 74% en área basal (Laclau *et al.*, 2009; Almeida *et al.*, 2010).

La fertilización con N, P, K, S en el establecimiento de una plantación de *E. globulus*, seguida de la fertilización anual con N, P, K, incrementa la altura en un 20% (Turnbull *et al.*, 2007)

Incremento del Índice de Área Foliar (IAF).

Uno de los efectos más perceptibles de la aplicación de nutrientes minerales a las plantas, especialmente el nitrógeno, es un incremento en el área foliar (Moorby y Besford, 1983), lo que se traduce en un mayor crecimiento del fuste (Binkley, 1993).

El índice de área foliar (IAF) es un factor clave del uso de agua y nutrientes, balance de carbón y de la tasa de crecimiento de las plantaciones forestales, sin embargo, éstas interacciones pueden depender de las condiciones del ambiente (Smethurst *et al.*, 2003).

En plantaciones de *E. grandis* la aplicación de K (116 kg K ha⁻¹ como KCl) incrementa significativamente el IAF a los 12, 24 y 36 meses después de la plantación en un 114, 93 y 125%, respectivamente (Almeida *et al.*, 2010).

Efecto en las características de la madera.

La fertilización aumenta el crecimiento del fuste, y este crecimiento puede modificar varias características que determinan la calidad de la madera. Por ejemplo, con frecuencia, la proporción del crecimiento anual que se caracteriza como madera tardía, disminuye entre un 2 y un 10% después de que se ha practicado la fertilización. La madera tardía es más densa que la madera temprana, de modo que un crecimiento acelerado puede producir madera con una densidad entre 5 y 15% menor que la que presentan los árboles no fertilizados y de crecimiento lento. La longitud de las fibras también puede disminuir con la fertilización, lo cual reduce el valor de la pulpa. El crecimiento rápido de los árboles jóvenes también se traduce en una gran proporción de madera juvenil, ésta tiende a pandearse más que la madera dura al secarse. Por otro lado, en las PFC de rápido

crecimiento, la madera juvenil se presenta en mayor proporción en turnos cortos (Binkley, 1993).

3.5. Relación entre crecimiento y fotosíntesis.

En los estudios nutricionales se ha encontrado que la tasa de fotosíntesis neta puede variar entre un 10 y un 30% conforme cambia la concentración de nutrientes de las hojas. Con frecuencia, los incrementos que se producen en el crecimiento con la fertilización son mucho mayores que el 30% de modo que, en general, una mayor eficiencia fotosintética no puede explicarse con base en la magnitud de la respuesta (Binkley, 1993).

3.6. La fertilización y su relación con el contenido de nutrientes en las hojas.

Almeida *et al.*, (2010), reportan concentraciones foliares de K de 3.7 a 5.8 g kg⁻¹ con fertilizaciones potásicas de KCl o K₂SO₄ en *E. grandis* después de 1 año de ser plantado, las cuales fueron mayores comparadas con el testigo. A los 38 meses después de la plantación, la concentración foliar de K fue de 4.4 g kg⁻¹.

En un estudio realizado al sur de Australia por Bennett *et al.*, (1996) en plantaciones de *E. regnans*, *E. nitens* y *E. globulus* se reporta que la adición de N y P incrementaron las concentraciones de N en el follaje de *E. nitens* a edades de 1 y 2 años, mientras que en *E. globulus* el incremento de N foliar fue significativo a la edad de 1 año, *E. regnans* no presentó diferencias significativas a ninguna edad en comparación con el testigo. La adición de K tuvo efecto mínimo en la concentración foliar, *E. regnans* incrementó su concentración foliar de K, sin embargo, las diferencias no fueron significativas.

En la región del Cerrado de Sao Paulo, Brasil, se encontraron correlaciones significativas entre el contenido de K en el suelo y en las hojas y entre éstos y la altura de las plantas de *E. grandis*. En sitios de alta producción, en la región de Capao Bonito, Sao Paulo, Brasil, también se encontró una relación lineal entre la concentración foliar de K y el volumen de madera de *E. grandis* de 2 años de edad (Arruda y Malavolta, 2001).

4. MATERIALES Y MÉTODOS

4.1. Localización del área de estudio

Las plantaciones de eucalipto estudiadas en el presente trabajo pertenecen a la empresa Forestaciones Operativas de México S.A. de C.V (FOMEX).

Las parcelas experimentales se ubican en el predio denominado Antonio Alemán Alba, dentro de la comunidad Gregorio Méndez, Huimanguillo, Tabasco.

Las parcelas se encuentran entre las coordenadas 17°40'38.7'' de latitud N y 93°69'36.2'' de longitud W y 17°40'32.1'' de latitud N y 93°36'26.2'' de longitud W.

4.2. Material biológico

Las PFC estudiadas corresponden a las especies *Eucalyptus urophylla* S.T. Blake y *E. grandis* Hill ex Maiden cuyas plantas fueron producidas por semilla y se establecieron en el año 2000. Los árboles se plantaron a distancias de 3.5 x 2.6 m. Se estudiaron 199 árboles de *E. urophylla* y 239 árboles de *E. grandis* que cumplieron con las siguientes

características: sanos, completos y sin deformaciones durante todo el período de evaluación.

4.3. Aplicación de fertilizantes

Todos los tratamientos incluyeron la fertilización operativa de la empresa (60 g de 18-46-00 por árbol a 3 semanas de plantación y 100 g de 18-46-00 a los 6 meses de establecida la plantación), sobre la cual se aplicaron los tratamientos. El boro (bórax) se aplicó a 5 semanas del establecimiento de la plantación (en corona de 25 cm) y el potasio (K_2O) a los 6 meses de establecimiento (al voleo, dentro de un radio no mayor a 25 cm alrededor de la planta). Las dosis aplicadas fueron repetidas un año después, al fin del período de lluvia para el bórax y al fin del estiaje para el K_2O .

4.4. Tratamientos

Los tratamientos que se evaluaron en las plantaciones fueron 9, los cuales consistieron en el testigo, tres dosis para cada fertilizante y sus combinaciones. Se muestran a continuación:

T1) 0 g de bórax y 0 g de K_2O (testigo)

T2) 0 g de bórax y 60 g de K_2O

T3) 0 g de bórax y 120 g de K_2O

T4) 6 g de bórax y 0 g de K_2O

T5) 6 g de bórax y 60 g de K_2O

T6) 6 g de bórax y 120 g de K_2O

T7) 12 g de bórax y 0 g de K_2O

T8) 12 g de bórax y 60 g de K₂O

T9) 12 g de bórax y 120 g de K₂O

4.5. Obtención de datos

Las mediciones para evaluar el efecto de los fertilizantes se llevaron a cabo durante el crecimiento de la plantación, a la edad de 1.5, 4.5 y posteriormente a los 11 años. Las variables dasométricas evaluadas fueron diámetro normal (a 1.3 m sobre el nivel del suelo) y altura total de cada árbol.

4.6. Muestreo de compartimentos del árbol para estimación de biomasa.

El muestreo de compartimentos del árbol sólo se realizó en *E. urophylla* debido a que no se encontraron efectos significativos en los tratamientos aplicados a *E. grandis*. Se consideró únicamente el nivel de B aplicado al árbol, es decir, 0, 6 y 12 g de fertilizante ya que el K no presentó algún efecto sobre las plantaciones. Dichos tratamientos son B-0 (Testigo); B-6 (aplicación de 6 g de Bórax por árbol) y B-12 (aplicación de 6 g de Bórax por árbol).

Se eligieron tres árboles para cada nivel de B. A cada árbol, se le midió el diámetro normal, altura total, altura de fuste limpio, longitud de copa, diámetro del tocón (0.30 m sobre el nivel del suelo). Dichos árboles fueron derribados y se separaron en tres compartimentos: fuste, ramas y ramillas + hojas.

Para la estimación de la biomasa del fuste, se obtuvieron tres rodajas: una a la altura del tocón, otra a la mitad de la altura de fuste limpio y una tercera a la altura de la mitad de

copa. Cada rodaja de aproximadamente 5 cm de grosor trató de obtenerse de manera uniforme, se le midieron dos diámetros en sentido opuesto en ambas caras, con la finalidad de obtener un diámetro promedio y se midió la altura (grosor) de la rodaja. El fuste fue cubicado por la fórmula de Smalian a partir de las tres secciones de fuste que se obtuvieron. Posteriormente se pesó cada rodaja para obtener su peso verde.

Para estimar la biomasa del compartimento ramas, se pesó en campo todo el componente para obtener su peso verde con una balanza digital (Labtron C Scientific ES-8000H). Se tomaron tres muestras de dicho componente y se transportaron en bolsas plásticas al laboratorio. Las muestras se secaron en estufa durante 168 horas a 70°C hasta obtener peso constante.

Una vez separado de los demás compartimentos, se pesó todo el componente ramillas + hojas y se obtuvo su peso verde, se colectaron tres muestras y se transportaron en bolsas plásticas al laboratorio. Las muestras se secaron en estufa durante 96 horas a 70°C o hasta peso constante para obtener su peso seco.

Además, se obtuvieron tres muestras de follaje de cada árbol para la realización del análisis foliar, procurando que las hojas fueran maduras y sanas.

4.7. Análisis de datos

Los datos obtenidos de las variables dasométricas (altura y diámetro), así como volumen, a las edades de 1.5, 4.5 y 11 años para cada especie y para cada nivel de B y K, se analizaron mediante Análisis de Varianza de dos vías (SAS v. 9.0) y comparación de

medias con la prueba de Duncan. Para cada tiempo de medición se realizó un análisis de varianza. Debido a que las diferencias más importantes se observaron en *E. urophylla*, con B (tratamientos B-0, B-6 y B-12), el análisis estadístico fue complementado con un análisis de mediciones repetidas.

Los datos de biomasa aérea y contenido de nutrimentos se analizaron a través de Análisis de Varianza de dos vías (SAS v. 9.0) y comparación de medias con la prueba de Duncan.

Con la finalidad de evaluar las concentraciones de nutrimentos en follaje, considerando posibles efectos de dilución, se realizó un diagnóstico gráfico de vectores de acuerdo a la metodología Timmer y Stone (1978) y actualizada por Mead *et al.*, (2010).

5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

5.1. Crecimiento en diámetro

La Figura 1 muestra el crecimiento en diámetro de *E. grandis* a las edades de 1.5, 4.5 y 11 años en los diferentes niveles de B aplicados al árbol. Sólo se encontraron diferencias significativas a la edad de 1.5 años (Cuadros A1, A2, A3).

Los diámetros encontrados en el experimento a la edad de 1.5 años son mayores a los reportados por Champion y Scholes (2003), a los 17 meses de edad para *E. grandis* cuyos valores de diámetro en diferentes tratamientos de fertilización estuvieron entre 3.4 y 4.5 cm, sin encontrar diferencias significativas entre tratamientos. Turnbull *et al.*, (2007), tampoco encontraron diferencias significativas entre los diámetros de árboles de 4 años de

edad de *E. globulus* fertilizados y no fertilizados con N-P-K, aunque el DN tendió a ser mayor en aquellos que recibieron fertilización.

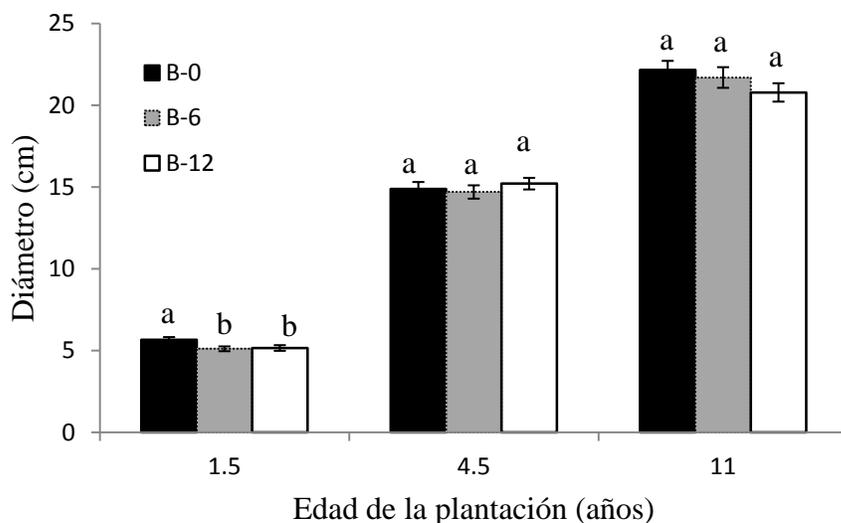


Figura 1. Crecimiento en diámetro de *E. grandis* a diferentes edades con tres dosis de B.

La Figura 2 muestra el comportamiento del diámetro en *E. urophylla*, a la edad de 1.5, 4.5 y 11 años en los diferentes niveles de B aplicado, se encontraron diferencias significativas a la edad de 11 años entre el testigo y los dos tratamientos (Cuadros A4, A5, A6).

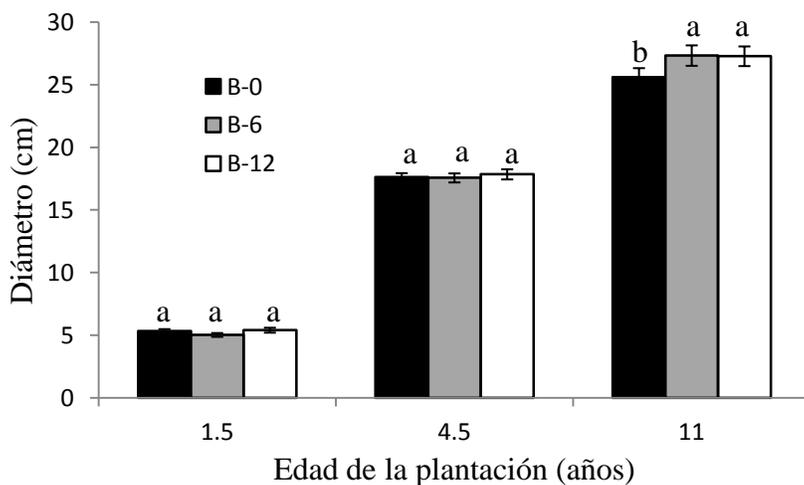


Figura 2. Crecimiento en diámetro de *E. urophylla* a diferentes edades con tres dosis de B.

No se encontraron diferencias significativas para ninguna edad a ninguna dosis de K aplicado en la especie de *E. grandis* (Figura 3).

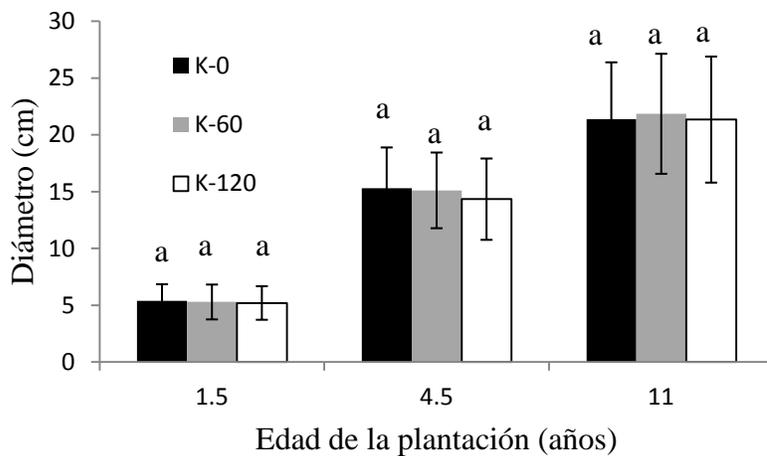


Figura 3. Crecimiento en diámetro de *E. grandis* a diferentes edades con tres dosis de K.

En *E. urophylla* tampoco se encontraron diferencias significativas para ninguna edad y nivel de K aplicado (Figura 4); aunque, la varianza fue menor.

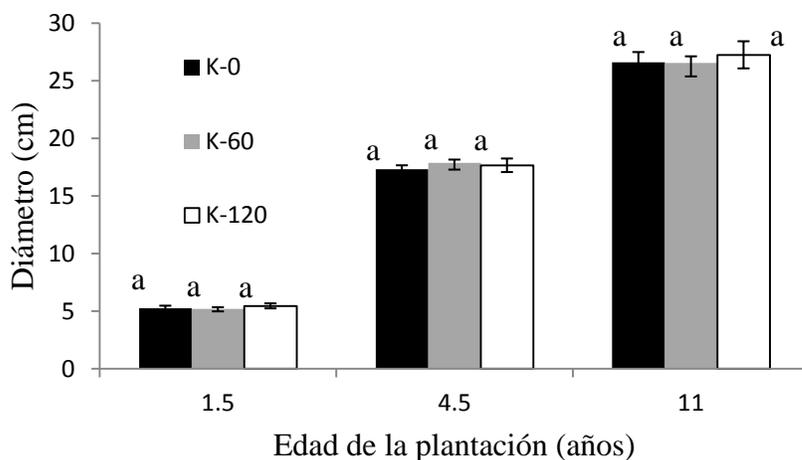


Figura 4. Crecimiento en diámetro de *E. urophylla* a diferentes edades con tres dosis de K.

El eucalipto responde bien a aplicaciones de K en suelos cuyo contenido no excede de 1.0 mmol dm^{-3} , si éste contenido es más elevado, la respuesta no es positiva (Arruda y Malavolta, 2001).

5.2. Crecimiento en altura

En la especie *E. grandis* no se encontraron diferencias significativas en la altura a ninguna edad y para ningún nivel de B y K aplicado (Figura 5 y 6) (Cuadros A7, A8, A9).

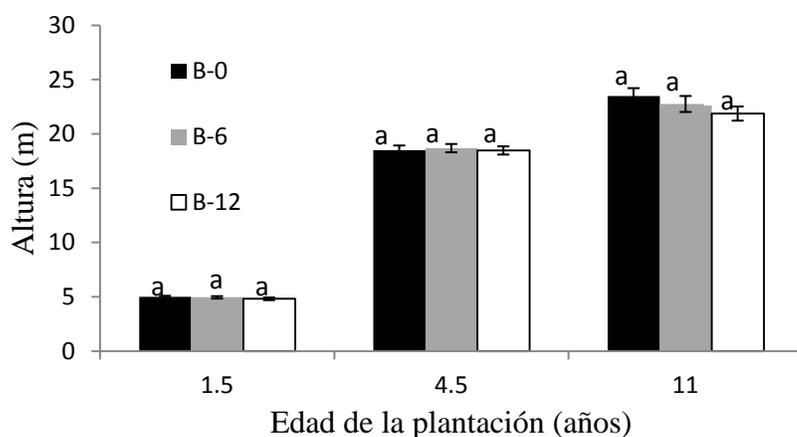


Figura 5. Crecimiento en altura de *E. grandis* en diferentes edades con tres dosis de B.

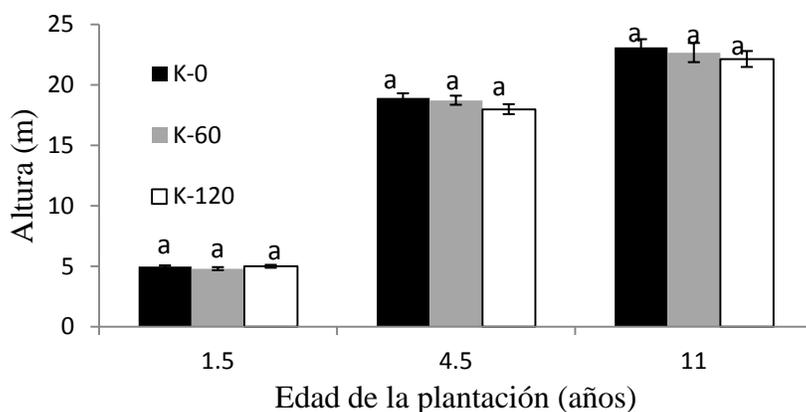


Figura 6. Crecimiento en altura de *E. grandis* en diferentes edades con tres dosis de K.

En *E. grandis*, Laclau *et al.*, (2009), no encontraron diferencias significativas en altura después de los 24 meses de edad de la plantación en tratamientos con fertilización

nitrogenada, mientras que el crecimiento en altura con fertilización potásica fue significativo, ya que a los 36 meses de edad de la plantación se presentó un incremento en altura de 3.7 m en comparación con los árboles que no fueron fertilizados.

La aplicación de diferentes dosis de B fue significativa a la edad de 11 años en la especie *E. urophylla*, la mayor altura fue para el nivel mayor de B (NB-12), el cual tuvo un incremento de 11.2 % con respecto al testigo (Figura 7) (Cuadros A10, A11, A12).

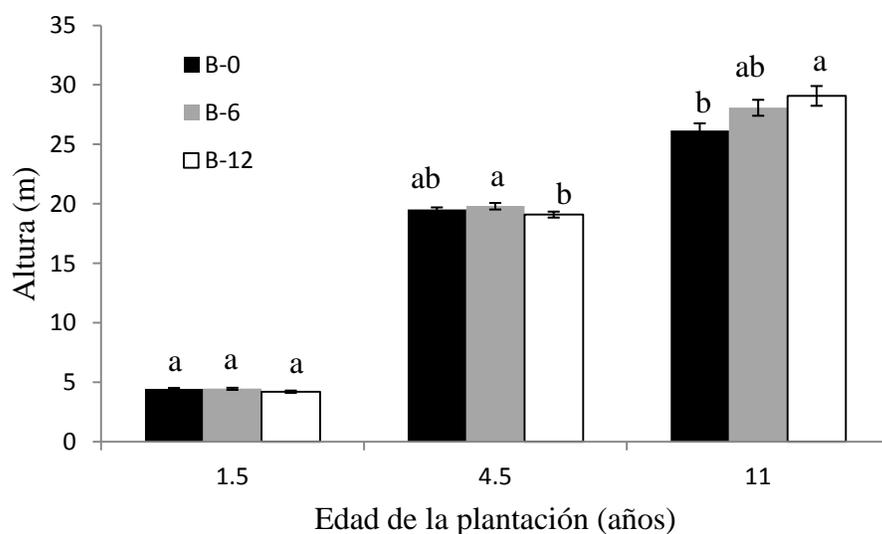


Figura 7. Crecimiento en altura de *E. urophylla* en diferentes edades con tres dosis de B.

En *E. urophylla* a la edad de 1.5 años, se encontraron diferencias significativas entre niveles de K (Figura 8), en la cual, los dos niveles de B aplicados (NB-6 y NB-12) presentaron crecimiento semejante, siendo superiores al testigo.

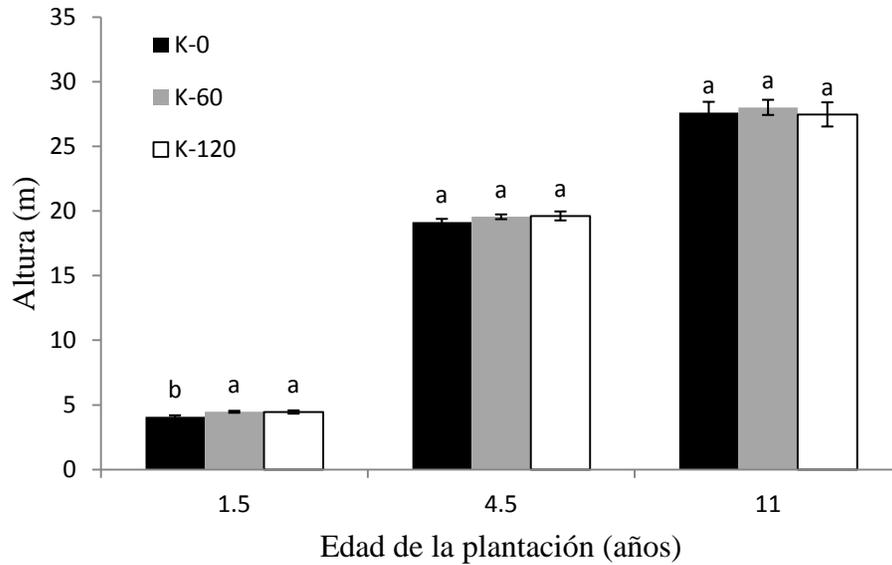


Figura 8. Crecimiento en altura de *E. urophylla* en diferentes edades con tres dosis de K.

Los resultados de respuesta temprana a la fertilización concuerdan con lo encontrado por Almeida *et al.*, (2010), quienes reportan que la fertilización potásica incrementó significativamente el crecimiento de *E. grandis* en altura (33%) y área basal en los primeros cuatro años después de la plantación. De igual manera, árboles de *E. globulus* fertilizados con N fueron significativamente mayores en altura en comparación con aquellos sin fertilización, asumiendo, que el crecimiento fue estimulado por la fertilización (Turnbull *et al.*, 2007). En ésta última especie, a los 13 meses de la plantación, la altura se vio incrementada entre 39 y 55% cuando los árboles se fertilizaron con Mg o K, sin resultar significativa cuando se combinaban los dos elementos (Mitchell y Smethurst, 2009).

5.3. Crecimiento en volumen

En la Figura 9 se observa el comportamiento del volumen para *E. grandis*, no se encontraron diferencias significativas en ningún nivel de B y ninguna edad (Cuadros A13, A14, A15).

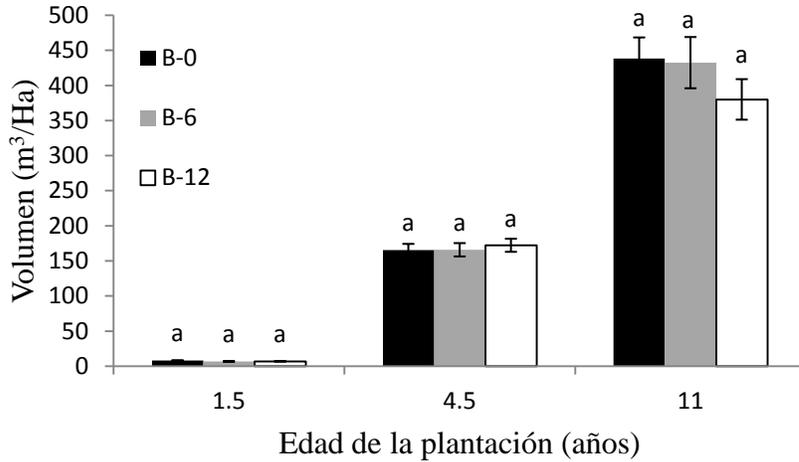


Figura 9. Volumen de *E. grandis* a lo largo del turno con diferentes dosis de B.

Se encontraron diferencias significativas en la edad de 11 años para la aplicación de B en la especie *E. urophylla* (Cuadros A16, A17, A18). En la Figura 10 se puede apreciar que el nivel NB-12 presentó mayor volumen (aproximadamente 21% más que el testigo).

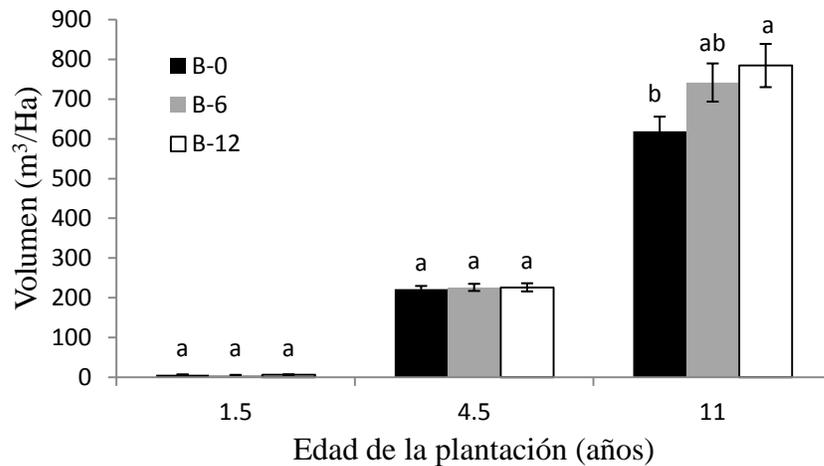


Figura 10. Volumen de *E. urophylla* a lo largo del turno con diferentes dosis de B.

Con respecto a los niveles de K evaluados, en *E. grandis*, no hubo diferencias significativas (Figura 11).

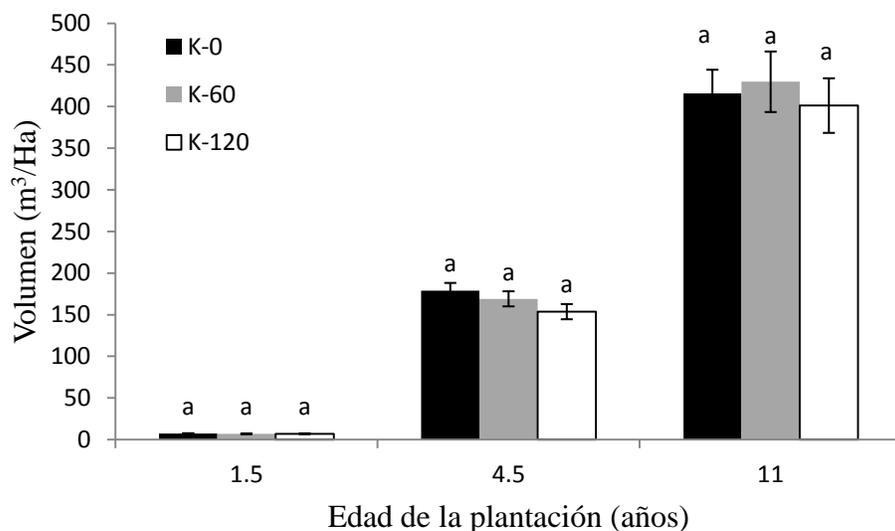


Figura 11. Volumen de *E. grandis* a lo largo del turno con diferentes dosis de K.

En la especie *E. urophylla* tampoco se encontraron diferencias significativas entre los diferentes niveles de K (Figura 12).

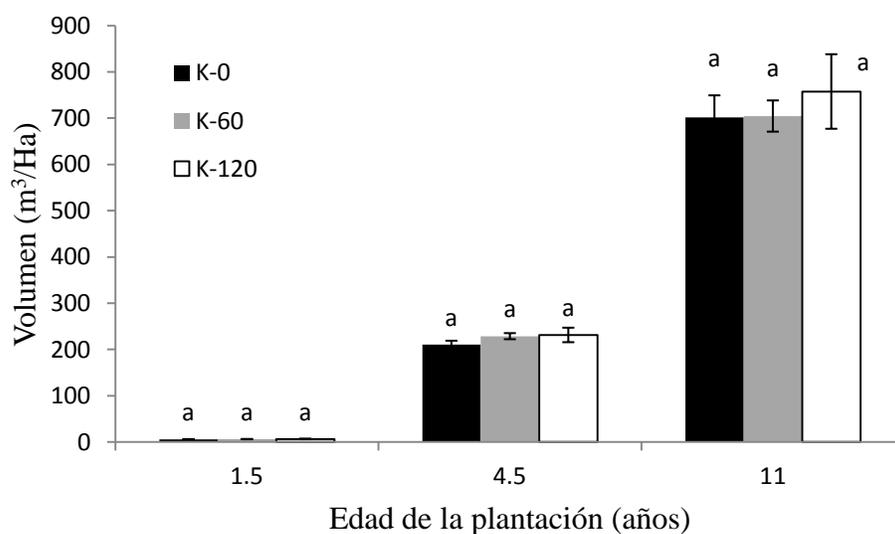


Figura 12. Volumen de *E. urophylla* a lo largo del turno con diferentes dosis de K.

5.4. Efecto de la fertilización con Boro en *E. urophylla*

Debido a que de las dos especies estudiadas sólo en *E. urophylla* y en las variables altura y volumen se encontraron diferencias significativas y únicamente en la aplicación de B, se procedió a analizar los datos por dosis de fertilización de B aplicado a los árboles por medidas repetidas, así como estimar la acumulación de biomasa aérea, además de llevar a cabo un análisis foliar, obteniéndose los resultados que a continuación se mencionan. En el sureste de México *E. urophylla* se ha mostrado como una especie con mayor capacidad para aprovechar los nutrientes del suelo y mejor adaptada para suelos menos fértiles (Pérez *et al.*, 2012).

Crecimiento en diámetro

La Figura 13 muestra el crecimiento en diámetro de *E. urophylla*, de acuerdo al análisis de medidas repetidas, no existen diferencias significativas a lo largo del tiempo entre los tres niveles de Boro aplicados en la fertilización (Cuadro A19). Estos resultados coinciden con lo encontrado por Zhou *et al.* (2012) quienes aplicaron diferentes dosis de B a brinzales de Teca (*Tectona grandis*) de aproximadamente 5 meses de edad, sin encontrar efectos significativos en su crecimiento.

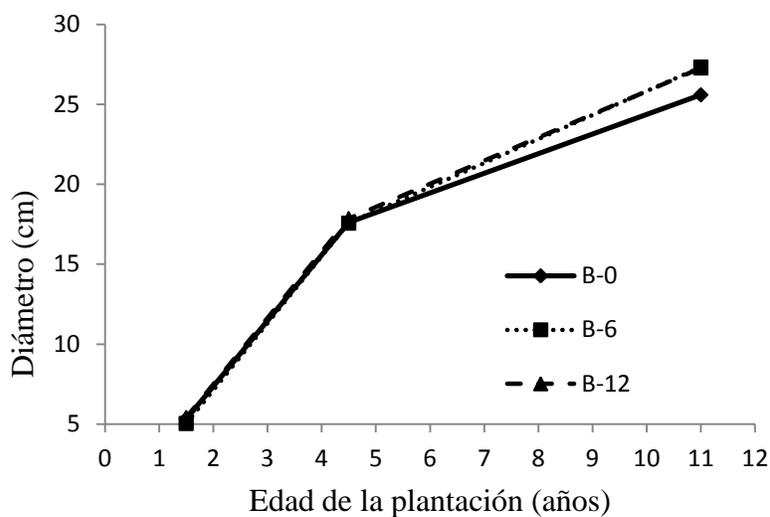


Figura 13. Crecimiento en diámetro de *E. urophylla* a lo largo del turno fertilizado con diferentes dosis de Boro.

Crecimiento en altura

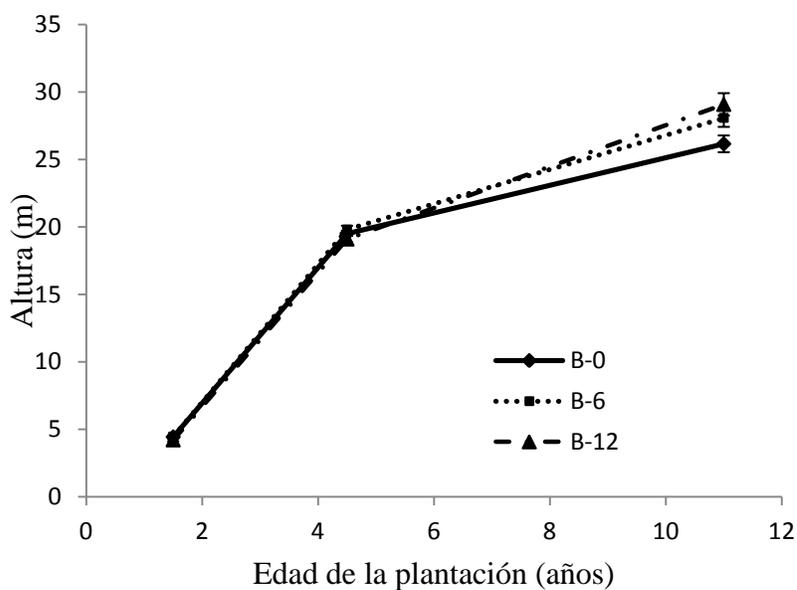


Figura 14. Crecimiento en altura de *E. urophylla* fertilizado con diferentes dosis de Boro.

En el análisis de medidas repetidas no existen diferencias significativas entre las diferentes dosis de B aplicadas a la plantación, aunque sí existe interacción entre la edad y

el nivel de B aplicado; lo que indica que cada dosis de B aplicada genera respuesta diferente en las variables de crecimiento a través del tiempo. Sin embargo, se aprecia una tendencia de aumento del diámetro a mayor dosis de B aplicado (Figura 14). Estos resultados no son los esperados y posiblemente se deba a otros factores no considerados en este estudio. La alta variabilidad de los terrenos forestales provoca que en los experimentos de campo las significancias no sean tan altas como ocurre en experimentos agrícolas donde hay menor varianza entre repeticiones. Debido a ello, Stape *et al.* (2006) sugieren que en estudios forestales se incrementen las repeticiones entre localidades más que las de los experimentos en sí. Debido a esto último, el análisis de medidas repetidas bien podría analizarse con $\alpha=0.13$, con lo cual, el nivel de B es significativo en el crecimiento en altura (Cuadro A20). Resultados diferentes a la fertilización también se han reportado con otros elementos. Por ejemplo, Laclau *et al.* (2009) encontraron respuestas limitadas a la fertilización con N, ya que sólo hubo diferencias significativas entre tratamientos de 0.6 meses a los 24 meses de edad de la plantación, pero después de esta edad, ya no se encontraron diferencias significativas.

Crecimiento en volumen

En el análisis de medidas repetidas no existen diferencias significativas entre los tres niveles de B aplicados, aunque el volumen por árbol fue mayor cuando se aplicó una dosis alta de B (Figura 15), además existe interacción entre la edad de la plantación y el volumen del árbol. Debido a múltiples factores que no se pueden controlar en el experimento en campo (climáticos, edafológicos, competencia, entre otros), los resultados pueden considerarse significantes con $\alpha=0.07$ (Cuadro A21).

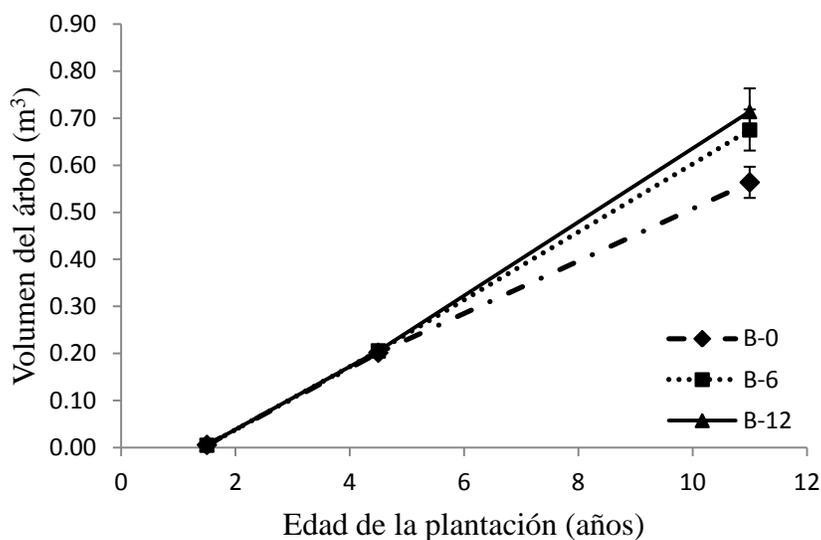


Figura 15. Incremento en volumen de *E. urophylla* fertilizado con diferentes dosis de Boro.

5.5. Acumulación de biomasa aérea

El análisis de varianza no muestra significancia estadística para los diferentes compartimentos del árbol (Cuadros A22, A23, A24, A25). Sin embargo, existe una tendencia del incremento de biomasa, a aumentar conforme a la dosis de fertilización, no así en los compartimentos de ramas y ramillas+hojas, donde la mayor biomasa se presentó en la dosis baja de B (Cuadro 1).

Cuadro 1. Biomasa de los compartimentos del árbol.

Nivel de Boro	Biomasa (Kg) ± Error estándar		
	Fuste	Ramas	Ramillas+hojas
B-0	301.661 ± 34.199	23.522 ± 12.348	13.628 ± 4.817
B-6	321.458 ± 90.192	43.273 ± 20.308	14.862 ± 4.980
B-12	342.466 ± 116.563	11.852 ± 4.016	7.505 ± 2.452

Cuando se aplicó mayor dosis de B, la asignación de biomasa fue mayor al fuste y menor a ramas, ramillas y hojas, lo que refleja gran importancia para la especie, de la cual se aprovecha su fuste para celulosa (Figura 16).

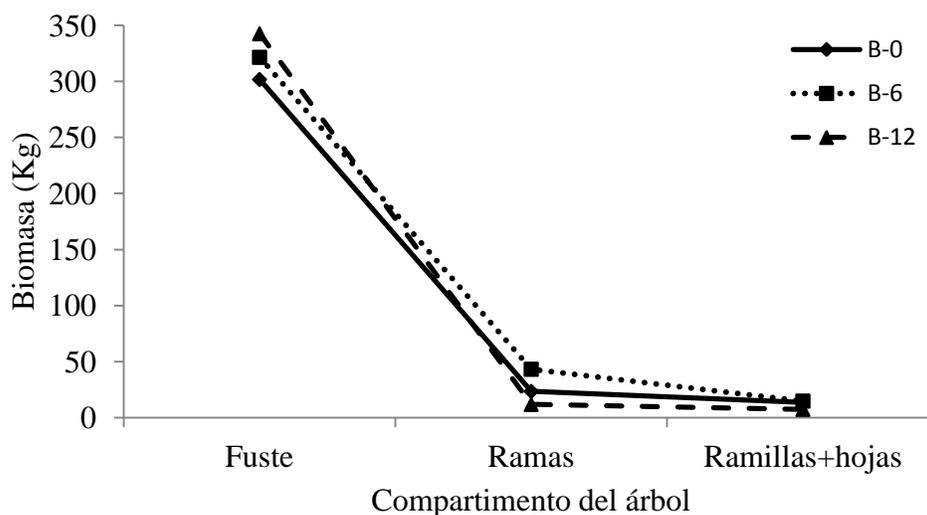


Figura 16. Compartimento de la biomasa en diferentes compartimentos del árbol.

Los resultados muestran baja respuesta a la fertilización a pesar de que en otros estudios los eucaliptos responden a la fertilización con diferentes elementos. Hunter (2001) encontró que la fertilización con NPK, incrementó significativamente la biomasa del fuste en las especies *E. camaldulensis*, *E. grandis* y *Dalbergia sissoo*, aunque en ramas y follaje no se presentaron. Da Silva *et al*, (2011) reportan que a los 36 meses de la plantación de *E. grandis* la biomasa de todos los componentes del árbol fue aproximadamente dos veces mayor en los tratamientos que recibieron fertilización de NPK.

5.6. Contenido de nutrimentos en las hojas

La dosis baja de B aplicada a los árboles, se relacionó con mayor contenido de nutrimentos en las hojas, con excepción de éste, donde el testigo presentó el mismo

contenido y los árboles con aplicación de dosis alta de este elemento, presentaron el menor contenido de este nutrimento (Cuadro 2).

De las aplicaciones de N, P, K y B únicamente se encontraron diferencias significativas entre las dosis de Boro aplicadas a los árboles (Cuadros A26-A31).

Cuadro 2. Contenido de nutrimentos por ha en follaje de *E. urophylla*.

Nivel de B	Contenido (Kg ha ⁻¹)					
	N	Ca	K	Mg	P	B
B-0	23.540	214.165	43.589	30.294	43.146	1.044
B-6	24.560	242.084	57.988	32.225	49.374	1.023
B-12	13.304	120.296	19.898	17.556	22.681	0.535

El nitrógeno es bajo en comparación con lo reportado por Hunter (2001), para *E. camaldulensis* y *E. grandis* con 148.6 y 185.4 kgN ha⁻¹ respectivamente; para P los valores son altos en comparación con los valores cercanos a 12 kgP ha⁻¹; en K se reportan 124.3 kgK ha⁻¹ y 84.5 kgK ha⁻¹; en Ca hasta 287 kgCa ha⁻¹ y para Mg se reportan hasta 57 kgMg ha⁻¹. Las proporción nutrimental N/P tiene un valor muy bajo en comparación con lo reportado por Silva *et al.* (2004), para *E. grandis* la cual es aproximadamente a 20, mientras que en la de N/K se reportan valores cercanos a 2; para el caso de P/K la proporción es mayor que la reportada, ya que se mencionan valores aproximados a 0.1, lo cual ocurre también con Ca/Mg cuyos valores encontrados por los autores varían entre 2 y 2.6 (Cuadro 3).

Cuadro 3. Proporciones nutrimentales en follaje de *E. urophylla* bajo tres tratamientos de Boro.

Proporción nutrimental	Nivel de B		
	NB-0	NB-6	NB-12
N/P	0.546	0.497	0.587
N/K	0.540	0.424	0.669
P/K	0.990	0.851	1.140
Ca/Mg	7.070	7.070	6.852

6. Análisis de Vectores

Con la finalidad de evaluar las concentraciones nutrimentales del follaje se realizó un diagnóstico nutrimental por medio del análisis gráfico de vectores.

En la Figura 17 se puede apreciar el cambio en Nitrógeno foliar en relación a la fertilización con B. En el nivel de Boro B-6 (aplicación de 6 g de Bórax) el N tiende a incrementar la biomasa del follaje, pero disminuyó la concentración del N, por lo cual, existe un incremento en el contenido de N, provocando la dilución del nutrimento. El nivel de Boro B-12 muestra la reducción de biomasa, sin aumento en la concentración de B. Como resultado de un incremento de la dosis de Boro, el N se concentró en hojas de menor biomasa. Este resultado indica que la aplicación alta de B no generó incremento en masa foliar.

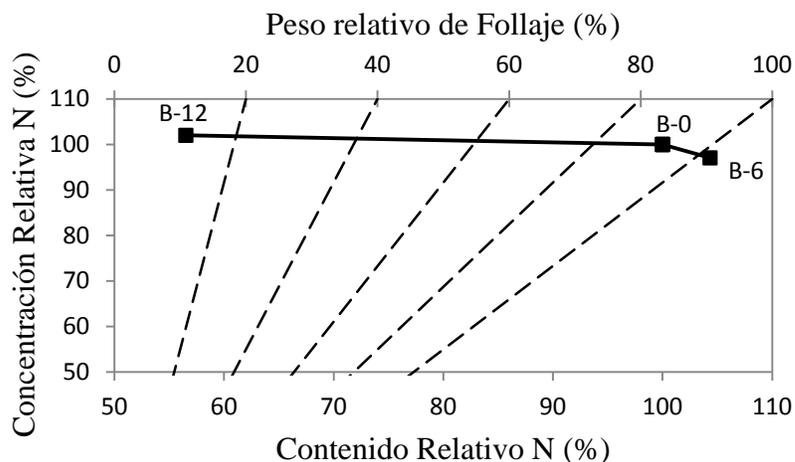


Figura 17. Respuesta del N foliar a la aplicación de diferentes dosis de B en *E. urophylla*

La respuesta del Fósforo foliar cuando se aplicó el tratamiento de Boro B-6 (6 g de Bórax) permitió que la biomasa del follaje, la concentración y el contenido de P aumentaran, lo cual refleja que el nutriente aplicado se encontraba deficiente y esto sugiere que un nivel moderado B, se correlaciona positivamente con el nivel de P; mientras que el tratamiento B-12 (aplicación de 12 g de Bórax) disminuyó en biomasa, concentración y contenido, lo que de acuerdo a la interpretación de vectores indica antagonismo como un resultado de una aplicación en exceso del nutriente aplicado (Figura 18). Como resultado de un incremento de la dosis de Boro aplicado, el P se concentró en hojas de menor biomasa, sin correlacionarse niveles alto de B y mayor contenido y concentración de P foliar. Este patrón se repite para otros nutrientes sugiriendo que las cantidades intermedias de B fueron mejores que los extremos de no aplicación o aplicación alta.

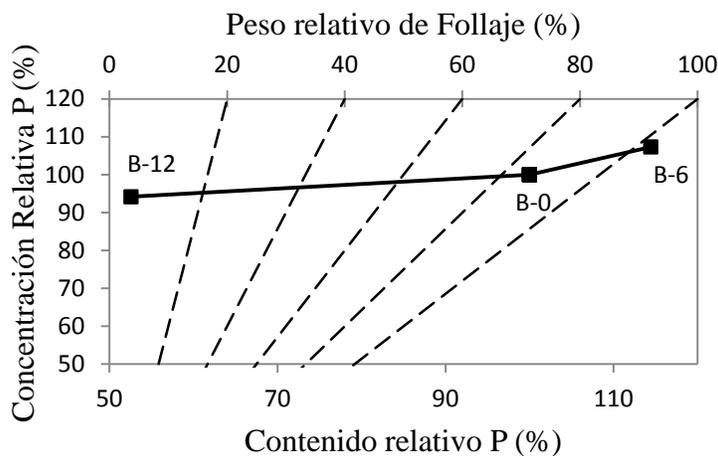


Figura 18. Respuesta del P foliar a la aplicación de diferentes dosis de B en *E. urophylla*.

En la Figura 19 se muestra la respuesta del Potasio foliar a la aplicación de B, en la que se observa al tratamiento B-6 (aplicación de 6 g de Bórax), como el tratamiento superior al testigo, obteniendo incremento en la biomasa del follaje, así como en la concentración y contenido de K, lo que puede deberse a que el B aplicado era un nutrimento deficiente que favoreció la respuesta en crecimiento. El tratamiento B-12 (aplicación de 12 g de Bórax) presentó respuesta negativa, lo que refiere que la dosis aplicada de B fue elevada y pudo haber provocado un desbalance impidiendo una respuesta positiva. Como resultado de un incremento de la dosis de Boro, el K se concentró en hojas de menor biomasa. Aunque comparado con N y P, K disminuye en forma más notoria el contenido y concentración, tendiendo a una dirección antagónica (Mead *et al.*, 2010).

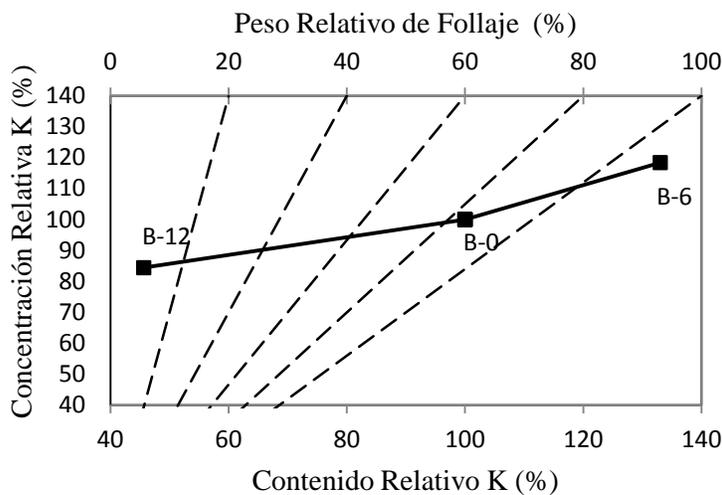


Figura 19. Respuesta del K foliar a la aplicación de diferentes dosis de B en *E. urophylla*.

En la Figura 20 se muestra el comportamiento del Calcio foliar como respuesta a la aplicación de B, donde el tratamiento B-6 (aplicación de 6 g de Bórax) fue el tratamiento superior, donde el incremento de biomasa fue superior, aunque limitado, la concentración y el contenido de Ca también aumentaron. Este pequeño incremento en biomasa puede representar un consumo de lujo de la planta, pues está consumiendo mayor cantidad de Ca para producir la misma cantidad de biomasa. El tratamiento B-12, generó poca biomasa, pero la concentración de Ca fue superior a la del testigo.

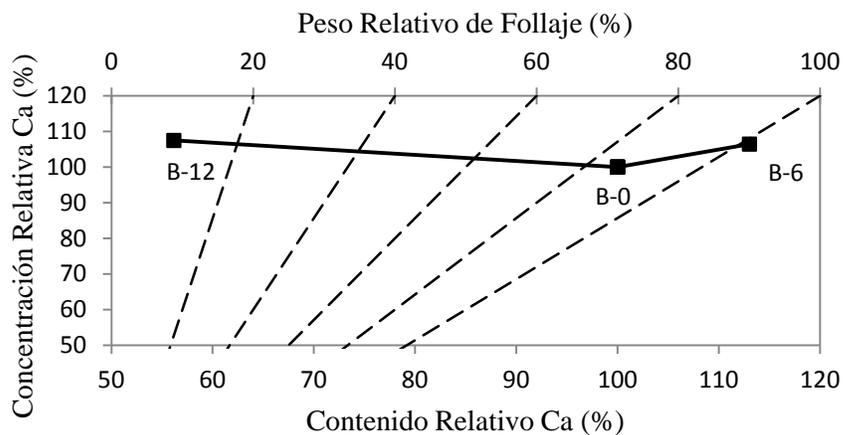


Figura 20. Respuesta del Ca foliar a la aplicación de diferentes dosis de B en *E. urophylla*.

Para el caso de Magnesio foliar, la respuesta del tratamiento B-6 (aplicación de 6 g de Bórax), fue mínima, pues el incremento en biomasa, concentración y contenido de Mg fue limitado, lo que refleja que el nutriente aplicado pudo no haber permitido la disponibilidad de este nutriente. Mientras, el tratamiento B-12 sólo fue superior al testigo en cuanto a concentración de Mg.

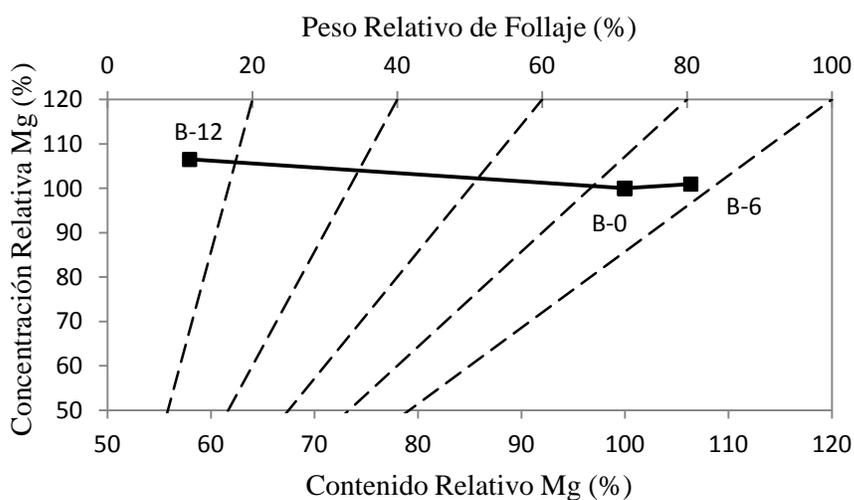


Figura 21. Respuesta del Mg foliar a la aplicación de diferentes dosis de B en *E. urophylla*

La Figura 22 muestra la respuesta del Boro foliar a la aplicación del mismo nutriente. El tratamiento B-6 (aplicación de 6 g de Bórax), mantiene la misma biomasa que el testigo, pero la concentración y el contenido disminuye. En el tratamiento B-12 (aplicación de 12 g de Bórax) la concentración y el contenido son muy parecidos, aunque la categoría en biomasa foliar no cambia.

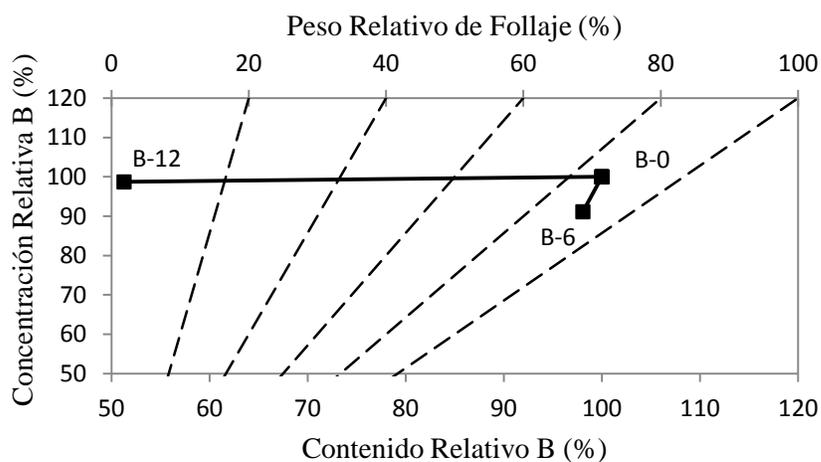


Figura 22. Respuesta del B foliar a la aplicación de diferentes dosis de B en *E. urophylla*

De acuerdo al análisis de vectores, con mayor aplicación de boro, el N, P, K, Ca y Mg se concentran en hojas de menor biomasa. La explicación de este resultado no es fácil, porque se esperaba que los niveles de B favorecieran el crecimiento y la concentración de nutrientes. Una posibilidad es que con la aplicación de fertilizante se haya creado un desbalance en el equilibrio químico de la solución del suelo, pero esta conformación requeriría de mayor investigación.

Las concentraciones foliares de B pueden variar fácilmente con la disponibilidad de agua en el suelo, lo que puede provocar incertidumbre en la interpretación de análisis de B foliar, (Lehto et al., 2010).

7. CONCLUSIONES

La fertilización con Boro y Potasio no representa crecimientos significativos en *Eucalyptus grandis* a lo largo del ciclo productivo.

En *E. urophylla* sólo la aplicación de Boro tuvo efecto sobre su crecimiento, favoreciendo la altura y el volumen por hectárea.

El análisis de vectores mostró incremento en el contenido de N, P, K y Ca en el follaje, lo que indica que estos elementos pueden ser aprovechados para favorecer el crecimiento.

La aplicación de dosis baja de B (B-6), resultó ser el nivel más adecuado para esta especie en este tipo de condiciones, lo que puede ser más rentable para las plantaciones forestales al no agregar más fertilizante, el cual puede generar el mismo efecto que sin fertilización.

No se mostraron cambios en la producción de biomasa de fuste, ramas y ramillas+hojas de *E. urophylla*.

8. LITERATURA CITADA

- Almeida J., C. R., J. P. Laclau, J. L. Moraes, J. Ranger, and L. Saint-André. 2010. A growth response to NaCl applications in *Eucalyptus* plantations established on K-deficient soils. *For. Ecol. Manage.* 259: 1786–1795.
- Arango, S. 2004. Guía de plantas medicinales de uso común en Salento, Colombia. Missouri Botanical Garden Press. Estados Unidos. 59 p.
- Aronsson, A. 1980. Frost hardiness in Scots pine (*Pinus silvestris* L.). II. Hardiness during winter and spring in young trees of different mineral nutrient status. *Stud. For. Suec.* 155: 1–27.
- Arruda, S. R. y E. Malavolta. 2001. Nutricao e adubacao potassica em *Eucalyptus*. Informacoes Agronómicas, POTAFOS. Encarte Técnico 91:1-10.
- Bell, R.W. and B. Dell. 2008. Micronutrients for sustainable food, feed, fibre and bioenergy Production. International Fertilizer Industry Association, Paris, France. 175 p.
- Bennett, L. T., C. J. Weston., T. S. Judd, P. M. Attiwill, and P. H. Whiteman. 1996. The effects of fertilizers on early growth and foliar nutrient concentrations of three plantation eucalypts on high quality sites in Gippsland, Southeastern Australia. *For. Ecol. Manage.* 89: 213-226.
- Binkley, D. 1993. Nutrición forestal. (Trad. Guzmán, M.). UTEHA-Limusa. México, D.F. 340 p.
- Böthig, S. 2001. Densidad, dureza y color de *Eucalyptus grandis* de Uruguay. LATU-JICA. Montevideo, Uruguay. 23 p.

- Brooker, I. 2002. Botany of eucalypts. *In: Eucalyptus. The genus Eucalyptus.* J.W. Coppen (ed.). Taylor and Francis. London. Pp: 3-35.
- Campion, J. M. and M. C. Scholes. 2003. Influence of irrigation and fertilization on early growth of *Eucalyptus grandis*. *Discov. innov.* 15: 213-220.
- CATIE. 1994. *Grandis: Eucalyptus grandis* Hill ex Maid, especie de árbol de uso múltiple en América Central. CATIE. Turrialba. 37 p.
- Chamshama, S. A. O. and J. B. Hall. 1987. Effects of site preparation and fertilizer application at planting on *Eucalyptus tereticornis* at Morogoro, Tanzania. *For. Ecol. Manage.* 18: 103-112.
- CONAFOR. 2012. Programa de desarrollo de plantaciones forestales comerciales: a 15 años de su creación. SEMARNAT-CONAFOR. México. 152 p.
- Cooling, E. N. and B. E. Jones. 1970. The importance of boron and NPK fertilizers to *Eucalyptus* in the Southern province, Zambia. *E. Afr. Agric. For. J.* 36: 185-194.
- Da Silva P., H. M., F. Poggiani y J. P. Laclau. 2011. Applying sewage sludge to *Eucalyptus grandis* plantations: Effects on biomass production and nutrient cycling through litterfall. *Applied and environmental soil science.* Vol. 2011. 11 p.
- Delgado C., E., A. Gómez, J. R. Valdez, H. De los Santos, A. M. Fierros, and R. W. Horwatt. 2009. Site index and soil properties in young plantations of *Eucalyptus grandis* and *Eucalyptus urophylla* in southeastern Mexico. *Agrociencia* 43: 61-72.
- Dell, B. and N. Malajezuk. 1994. Boron deficiency in eucalypt plantation in China. *Can. J. For. Res.* 24:2409-2416.

- FAO. 1981. El eucalipto en la repoblación forestal. 2ª ed. Colección FAO. Montes N° 11. Roma. 554 p.
- Fernandez J. Q. P., L. E. Dias, N. F. Barros, R. F. Novais y E. J. Moraes. 2000. Productivity of *Eucalyptus camaldulensis* affected by rate and placement of two phosphorus fertilizers to a Brazilian Oxisol. For. Ecol. and Manage. 127: 93-102.
- Florence, R.G. (Ed). 1994. Ecology and silviculture of eucalypt forests. CSIRO Publishing. Australia. 413 p.
- Goldberg, S. 1997. Reactions of boron with soils. Plant Soil 193:35-48.
- Graciano, C., E. A. Tambussi, E. Castán and J. J. Guiamet. 2009. Dry mass partitioning and nitrogen uptake by *Eucalyptus grandis* plants in response to localized or mixed application of phosphorus. Plant Soil. 319:175–184
- Gunn, B. V. y M. W. McDonald. 1992. Recolección de semillas de *Eucalyptus urophylla*. Recursos genéticos forestales No. 19. FAO. Depósito de documentos. Documento en línea. Disponible en: <http://www.fao.org/docrep/006/u5380s/U5380S10.htm> Consultado 16 de abril de 2012.
- Hunter, I. 2001. Above ground biomass and nutrient uptake of three tree species (*Eucalyptus camaldulensis*, *Eucalyptus grandis* and *Dalbergia sissoo*) as affected by irrigation and fertilizer, at 3 years of age, in southern India. For. Ecol. Manage. 144: 189-199.
- INTA. (Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria) 1995. Manual para Productores de Eucaliptos de la Mesopotamia Argentina. Grupo Forestal, EEA. INTA. Concordia, Argentina. 162 p.

- KUO. 2010. Página oficial grupo KUO. Consultado 10 junio 2011. Disponible en:
<http://www.kuo.com.mx/>
- Laclau, J. P., J. C. R. Almeida, J. L. Goncalves, L. Saint-André, M. Ventura, J. Ranger, R. M. Moreira and Y. Nouvellon. 2009. Influence of nitrogen and potassium fertilization on leaf lifespan and allocation of above-ground growth in *Eucalyptus* plantations. *Tree Physiology* 29: 111–124.
- Lamb, D. (1976) Variations in the foliar concentrations of macro and microelements in a fast growing tropical eucalypt. *Plant and Soil* **45**: 477–492.
- Lehto, T., T. Ruuholaa and B. Dellb. 2010. Boron in forest trees and forest ecosystems. Review. *For. Ecol. Manage.* 260: 2053-2069.
- McKimm, R. J. and D. W. Flinn. 1979. Eucalypt species, site preparation and fertiliser requirements for reforestation of the Toorong Plateau in central Victoria. *Aust. For.* 42: 117- 124.
- Mead, D. J. 2001. Mean annual volume increment of selected industrial forest plantation species. FAO. Roma. 27 p.
- Mead, D. J., J. T. Scott, and S. X. Chang, 2010. Using vector analysis to understand temporal changes in understorey-tree competition in agroforestry systems. *For. Ecol. Manage.* 259: 1200–1211.
- Meskimen, G. and J. K. Francis. 1990. *Eucalyptus grandis* Hill ex Maiden. Rose gum eucalyptus. En: Burns R. M.; Honkala, B. H. (eds). *Silvics of North America: 2. Hardwoods. Agric. Handb.* 654. Washington, DC: U.S. Department of Agriculture, Forest Service: 305-312.

- Misra, R. K., C. R. A. Turnbull, R. N. Cromer, A. K. Gibbons, and A. V. LaSala. 1998. Below- and above-ground growth of *Eucalyptus nitens* in a young plantation. I. Biomass. For. Ecol. Manage. 106: 283-293.
- Mitchell, A. D. and P. J. Smethurst. 2009. Magnesium and potassium deficiency induced in glasshouse-grown *Eucalyptus globulus*. Tasforests. 8: 131-143.
- Moorby, J. and R. T. Besford. 1983. Inorganic plant nutrition. In: Encyclopedia of plant physiology. Volume 15B. New Series. Läuchli A., R.L. Bielecki (Eds.). Springer-Verlag. Germany. pp: 481-527.
- Nieto, M. V., y J. Rodríguez 2003. Descripción de especies: *Eucalyptus urophylla* S.T. Blake. Corporación Nacional de Investigación Forestal. RNGR. Bogotá, Colombia. pp: 473-475.
- Penfold, A. R. and J. L. Willis. 1961. The eucalypts: botany, cultivation, chemistry and utilization. Interscience publishers. London. 551 p.
- Pérez S, R., A. Gómez G., A. Fierros G., and W. R. Horwath. 2012. Site Productivity of Clone and Seed Raised Plantations of *Eucalyptus urophylla* and *Eucalyptus grandis* in Southeast Mexico. Open Journal of Forestry 4: 225-231.
- Pritchett, W. L. 1990. Suelos forestales. Propiedades, conservación y mejoramiento. (Trad. J. Hurtado V. y M. Cervantes R). Limusa. México, D.F. 634 p.
- Rengel, Z. 2007. Nutrient Cycling in Terrestrial Ecosystems. In: Soil Biology. Vol. 10. P. Marschner, Z. Rengel (Eds.). Springer-Verlag. Germany. pp: 93-121.

- RISE (Research Information Series on Ecosystems). 2009. *Eucalyptus urophylla* and *Acacia mangium*. 21(1):1-15
- Rivera R., C. A., A. M. Fierros G., V. Vázquez. G., A. Gómez G., y A. Velázquez M. 2008. Principios, criterios e indicadores de sustentabilidad para plantaciones forestales comerciales de rápido crecimiento. *Fitotecnia Mexicana* 31: 391-397.
- Salisbury, F. B. y C. W. Ross. 2000. *Fisiología de las plantas 1. Células: agua, soluciones y superficies*. Paraninfo. Thompson Learning. Madrid, España. 305 p.
- SEMARNAT (Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales). 2010. Compendio de estadísticas ambientales 2010. Consultado 10 marzo 2011. Disponible en: http://aplicaciones.semarnat.gob.mx/estadisticas/compendio2010/01_ambiental/forestales_10.html
- Silva C., G. G., J. C. Lima N., V. H. Álvarez and F. Pahla. 2004. Nutritional diagnosis for eucalypt by DRIS, M-DRIS and CND. *Sci. Agric. (Piracicaba, Braz.)*. 61(5):507-515.
- Shorrocks, V.M., 1997. The occurrence and correction of boron deficiency. *Plant Soil* 193: 121-148.
- Smethurst, P., C. Baillie, M. Cherry and G. Holz. 2003. Fertilizer effects on LAI and growth on four *Eucalyptus nitens* plantations. *For. Ecol. Manage.* 176: 531-542.
- Stape, J. L., D., Binkley, W. S. Jacob and E. N. Takahashi. (2006). A twin-plot approach to determine nutrient limitation and potential in *Eucalyptus* plantations al landscape scales in Brazil. *For. Ecol. Manage.* 223: 1358-362.

- Stoneman, G. L., D. S. Crombie, K. Whitford, F. J. Hingston, R. Giles, C. C. Portlock, J. H. Galbraith and G. M. Dimmock. 1996. Growth and water relations of *Eucalyptus marginata* (jarrah) stands in response to thinning and fertilization. *Tree Physiology* 16: 267—274.
- Timmer, V. R., and E. L. Stone. 1978. Comparative foliage analysis of young balsam fir fertilized with nitrogen, phosphorous, potassium, and lime. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 42: 125–130.
- Turnbull, J. W. and L. D. Pryor. 1984. Choice of species and seed sources. *In: Eucalypts for wood production*. Hillis W.E. y A. G. Brown (eds.). CSIRO-Academic Press. Australia. pp: 6-65.
- Turnbull, J. W. and T. H. Booth. 2002. Eucalypts in cultivation: an overview. *In: Eucalyptus. The genus Eucalyptus*. Coppen J.W. (ed.). Taylor and Francis. London. pp: 52-74.
- Turnbull, T. L., N. Kelly, M. A. Adams and R. C. Warren 2007. Within canopy nitrogen and photosynthetic gradients are unaffected by soil fertility in field-grown *Eucalyptus globulus*. *Tree Physiology* 27: 1607–1617.
- Zhou, Z., Liang K., Xu D., Zhang Y., Huang G., and Ma H. 2012. Effects of calcium, boron and nitrogen fertilization on the growth of teak (*Tectona grandis*) seedlings and chemical property of acidic soil substrate. *New Forests* 43:231–243. DOI 10.1007/s11056-011-9276-6

APÉNDICE

Cuadro A. 1. Análisis de Varianza para diámetro de *E. grandis* a la edad de 1.5 años.

Fuente de variación	Grados de libertad	Suma de cuadrados	Cuadrados medios	F
Modelo	8	31.8592	3.9824	0.0689
Error	230	494.9606	2.1520	
Nivel de B	2	13.6611	6.8305	0.0437
Nivel de K	2	2.3140	1.1570	0.5849
Interacción B*K	4	15.6488	3.9122	0.1262
Total	238	526.8198		

Cuadro A. 2. Análisis de Varianza para diámetro de *E. grandis* a la edad de 4.5 años.

Fuente de variación	Grados de libertad	Suma de cuadrados	Cuadrados medios	F
Modelo	8	119.4528	14.9316	0.2930
Error	230	2834.6235	12.3244	
Nivel de B	2	12.6522	6.3260	0.5992
Nivel de K	2	34.1967	17.0983	0.2518
Interacción B*K	4	68.4910	17.1228	0.2384
Total	238	2954.0763		

Cuadro A. 3. Análisis de Varianza para diámetro de *E. grandis* a la edad de 11 años.

Fuente de variación	Grados de libertad	Suma de cuadrados	Cuadrados medios	F
Modelo	8	131.4424	16.4303	0.7885
Error	230	6441.5970	28.0069	
Nivel de B	2	85.4474	42.7237	0.2197
Nivel de K	2	16.5444	8.2722	0.7445
Interacción B*K	4	38.6299	9.6574	0.8474
Total	238	6573.0394		

Cuadro A. 4. Análisis de Varianza para diámetro de *E. urophylla* a la edad de 1.5 años.

Fuente de variación	Grados de libertad	Suma de cuadrados	Cuadrados medios	F
Modelo	8	9.1292	1.1411	0.8420
Error	190	418.4937	2.2026	
Nivel de B	2	2.1554	1.0777	0.6138
Nivel de K	2	2.1388	1.0694	0.6161
Interacción B*K	4	2.2167	0.5541	0.9084
Total	198	427.6230		

Cuadro A. 5. Análisis de Varianza para diámetro de *E. urophylla* a la edad de 4.5 años.

Fuente de variación	Grados de libertad	Suma de cuadrados	Cuadrados medios	F
Modelo	8	76.5969	9.5746	0.3946
Error	190	1719.96	9.0524	
Nivel de B	2	9.1096	4.5548	0.6054
Nivel de K	2	6.2937	3.1468	0.7068
Interacción B*K	4	62.0173	15.5043	0.1488
Total	198	1796.5606		

Cuadro A. 6. Análisis de Varianza para diámetro de *E. urophylla* a la edad de 11 años.

Fuente de variación	Grados de libertad	Suma de cuadrados	Cuadrados medios	F
Modelo	8	502.0802	62.7600	0.1291
Error	190	7484.0883	39.3899	
Nivel de B	2	241.0419	120.5209	0.0492
Nivel de K	2	13.6153	6.8077	0.8414
Interacción B*K	4	359.5756	89.8939	0.0620
Total	198	7986.1684		

Cuadro A. 7. Análisis de Varianza para la altura de *E. grandis* a la edad de 1.5 años.

Fuente de variación	Grados de libertad	Suma de cuadrados	Cuadrados medios	F
Modelo	8	12.5042	1.5630	0.1468
Error	230	234.5811	1.0199	
Nivel de B	2	0.9877	0.4939	0.6168
Nivel de K	2	1.0854	0.5427	0.5881
Interacción B*K	4	9.6423	2.4106	0.0539
Total	238	247.0853		

Cuadro A. 8. Análisis de Varianza para la altura de *E. grandis* a la edad de 4.5 años.

Fuente de variación	Grados de libertad	Suma de cuadrados	Cuadrados medios	F
Modelo	8	133.1110	16.6389	0.2178
Error	230	2825.5748	12.2851	
Nivel de B	2	1.7678	0.8839	0.9306
Nivel de K	2	32.9531	16.4765	0.2636
Interacción B*K	4	92.3835	23.0959	0.1148
Total	238	2958.6859		

Cuadro A. 9. Análisis de Varianza para la altura de *E. grandis* a la edad de 11 años.

Fuente de variación	Grados de libertad	Suma de cuadrados	Cuadrados medios	F
Modelo	8	207.6365	25.9546	0.7362
Error	230	9203.3453	40.0145	
Nivel de B	2	119.8042	59.9021	0.2260
Nivel de K	2	58.1166	29.0583	0.4849
Interacción B*K	4	49.5575	12.3894	0.8714
Total	238	9410.9818		

Cuadro A. 10. Análisis de Varianza para la altura de *E. urophylla* a la edad de 1.5 años.

Fuente de variación	Grados de libertad	Suma de cuadrados	Cuadrados medios	F
Modelo	8	9.2798	1.1599	0.0666
Error	190	117.7509	0.6197	
Nivel de B	2	2.4375	1.2187	0.1428
Nivel de K	2	4.8856	2.4428	0.0210
Interacción B*K	4	1.6734	0.4184	0.6100
Total	198	127.0307		

Cuadro A. 11. Análisis de Varianza para la altura de *E. urophylla* a la edad de 4.5 años.

Fuente de variación	Grados de libertad	Suma de cuadrados	Cuadrados medios	F
Modelo	8	65.3900	8.1737	0.0267
Error	190	695.4196	3.6601	
Nivel de B	2	20.8579	10.4289	0.0604
Nivel de K	2	2.3609	1.1804	0.7247
Interacción B*K	4	42.4718	10.6179	0.0232
Total	198	760.8096		

Cuadro A. 12. Análisis de Varianza para la altura de *E. urophylla* a la edad de 11 años.

Fuente de variación	Grados de libertad	Suma de cuadrados	Cuadrados medios	F
Modelo	8	588.8213	73.6027	0.0341
Error	190	6539.9373	34.4207	
Nivel de B	2	412.9494	206.4747	0.0030
Nivel de K	2	14.7179	7.3589	0.8077
Interacción B*K	4	264.3798	66.0949	0.1087
Total	198	7128.7586		

Cuadro A. 13. Análisis de Varianza para volumen Ha^{-1} de *E. grandis* a la edad de 1.5 años.

Fuente de variación	Grados de libertad	Suma de cuadrados	Cuadrados medios	F
Modelo	8	246.4525	30.8065	0.0371
Error	230	3380.8685	14.6994	
Nivel de B	2	67.9521	33.9761	0.1014
Nivel de K	2	5.7387	2.8693	0.8228
Interacción B*K	4	168.2878	42.0719	0.0242
Total	238	3627.3211		

Cuadro A. 14. Análisis de Varianza para volumen Ha^{-1} de *E. grandis* a la edad de 4.5 años.

Fuente de variación	Grados de libertad	Suma de cuadrados	Cuadrados medios	F
Modelo	8	73550.227	9193.778	0.2155
Error	230	1555688.389	6763.863	
Nivel de B	2	1588.5332	794.2666	0.8893
Nivel de K	2	20550.8305	10275.4153	0.2211
Interacción B*K	4	45677.0730	11419.2683	0.1535
Total	238	1629238.616		

Cuadro A. 15. Análisis de Varianza para volumen Ha^{-1} de *E. grandis* a la edad de 11 años.

Fuente de variación	Grados de libertad	Suma de cuadrados	Cuadrados medios	F
Modelo	8	371018.77	46377.35	0.8116
Error	230	19117413.33	83119.19	
Nivel de B	2	201293.1002	100646.5501	0.2998
Nivel de K	2	42886.3753	21443.1877	0.7728
Interacción B*K	4	161094.8262	40273.7066	0.7471
Total	238	19488432.10		

Cuadro A. 16. Análisis de Varianza para volumen Ha^{-1} de *E. urophylla* a la edad de 1.5 años.

Fuente de variación	Grados de libertad	Suma de cuadrados	Cuadrados medios	F
Modelo	8	54.0509	6.7564	0.8003
Error	190	2245.0771	11.8162	
Nivel de B	2	15.0467	7.5234	0.5302
Nivel de K	2	13.5687	6.7843	0.5642
Interacción B*K	4	11.9012	2.9753	0.9083
Total	198	2299.1281		

Cuadro A. 17. Análisis de Varianza para volumen Ha^{-1} de *E. urophylla* a la edad de 4.5 años.

Fuente de variación	Grados de libertad	Suma de cuadrados	Cuadrados medios	F
Modelo	8	65296.494	8162.062	0.1680
Error	190	1050100.833	5526.846	
Nivel de B	2	8166.1434	4083.0717	0.4791
Nivel de K	2	7242.0604	3621.0302	0.5205
Interacción B*K	4	50382.6314	12595.6579	0.0623
Total	198	1115397.326		

Cuadro A. 18. Análisis de Varianza para volumen Ha^{-1} de *E. urophylla* a la edad de 11 años.

Fuente de variación	Grados de libertad	Suma de cuadrados	Cuadrados medios	F
Modelo	8	2157553.92	269694.24	0.0725
Error	190	27899167.87	146837.73	
Nivel de B	2	1462265.215	731132.607	0.0078
Nivel de K	2	48925.024	24462.512	0.8467
Interacción B*K	4	1075304.567	26826.142	0.1246
Total	198	30056721.79		

Cuadro A. 19. Análisis de Medidas Repetidas para diámetro de *E. urophylla*.

Fuente de variación	Grados de libertad	Suma de cuadrados	Cuadrados medios	F
Nivel de B	2	49.0167	24.5084	0.4230
Tiempo	2	46152.7058	23076.3529	<0.0001
Tiempo*NB	4	89.5481	22.3870	0.1024

Cuadro A. 20. Análisis de Medidas Repetidas para altura de *E. urophylla*.

Fuente de variación	Grados de libertad	Suma de cuadrados	Cuadrados medios	F
Nivel de B	2	3532.6719	38.4579	0.1211
Tiempo	2	55641.5927	27820.7963	<0.0001
Tiempo*NB	4	248.8950	62.2238	0.0001

Cuadro A. 21. Análisis de Medidas Repetidas para Volumen por árbol de *E. urophylla*.

Fuente de variación	Grados de libertad	Suma de cuadrados	Cuadrados medios	F
Nivel de B	2	0.2947	0.1474	0.0663
Tiempo	2	43.1188	21.5594	<0.0001
Tiempo*NB	4	0.5419	0.1355	0.0060

Cuadro A. 22. Análisis de Varianza para biomasa de Fuste de *E. urophylla*.

Fuente de variación	Grados de libertad	Suma de cuadrados	Cuadrados medios	F
Modelo	2	2498.3789	1249.1895	0.9474
Error	6	137346.0575	22891.0096	
Nivel de B	2	2498.3789	1249.1894	0.9474
Total	8	139844.4364		

Cuadro A. 13. Análisis de Varianza para biomasa de Ramas de *E. urophylla*.

Fuente de variación	Grados de libertad	Suma de cuadrados	Cuadrados medios	F
Modelo	2	1513.5096	756.7548	0.3390
Error	6	3486.1617	581.0269	
Nivel de B	2	1513.5096	756.7548	0.3390
Total	8	4999.6714		

Cuadro A. 24. Análisis de Varianza para biomasa de Ramillas+hojas de *E. urophylla*.

Fuente de variación	Grados de libertad	Suma de cuadrados	Cuadrados medios	F
Modelo	2	93.1419	46.5709	0.4686
Error	6	324.0705	54.0117	
Nivel de B	2	93.1419	46.5709	0.4686
Total	8	414.2124		

Cuadro A 25. Análisis de Varianza para biomasa de Biomasa total de *E. urophylla*.

Fuente de variación	Grados de libertad	Suma de cuadrados	Cuadrados medios	F
Modelo	2	2508.4755	1254.2377	0.9585
Error	6	176455.6018	29409.2670	
Nivel de B	2	2508.4754	1254.2377	0.9585
Total	8	178964.0772		

Cuadro A. 26. Análisis de Varianza para Contenido de N en follaje de *E. urophylla*.

Fuente de variación	Grados de libertad	Suma de cuadrados	Cuadrados medios	F
Modelo	2	697.5933	348.7966	0.0478
Error	24	2419.4879	100.8119	
Nivel de B	2	697.5933	348.7966	0.0478
Total	26	3117.0811		

Cuadro A. 27. Análisis de Varianza para Contenido de P en follaje de *E. urophylla*.

Fuente de variación	Grados de libertad	Suma de cuadrados	Cuadrados medios	F
Modelo	2	3510.5626	1755.2813	0.0291
Error	24	10237.6574	426.5691	
Nivel de B	2	3510.5626	1755.2813	0.0291
Total	26	13748.2200		

Cuadro A. 28. Análisis de Varianza para Contenido de K en follaje de *E. urophylla*.

Fuente de variación	Grados de libertad	Suma de cuadrados	Cuadrados medios	F
Modelo	2	6658.1218	3329.0609	0.0039
Error	24	11359.8614	473.3276	
Nivel de B	2	6658.1218	3329.0609	0.0039
Total	26	18017.9832		

Cuadro A. 29. Análisis de Varianza para Contenido de Ca en follaje de *E. urophylla*.

Fuente de variación	Grados de libertad	Suma de cuadrados	Cuadrados medios	F
Modelo	2	73268.7410	36634.3705	0.0581
Error	24	273742.7673	11405.9486	
Nivel de B	2	73268.7410	36634.3705	
Total	26	347011.5084		0.0581

Cuadro A. 30. Análisis de Varianza para Contenido de Mg en follaje de *E. urophylla*.

Fuente de variación	Grados de libertad	Suma de cuadrados	Cuadrados medios	F
Modelo	2	1143.5927	571.7963	0.0672
Error	24	4532.0373	188.8349	
Nivel de B	2	1143.5927	571.7963	0.0672
Total	26	5675.6300		

Cuadro A. 31. Análisis de Varianza para Contenido de B en follaje de *E. urophylla*.

Fuente de variación	Grados de libertad	Suma de cuadrados	Cuadrados medios	F
Modelo	2	1.4921	0.7461	0.0471
Error	24	5.1436	0.2143	
Nivel de B	2	1.4921	0.7461	0.0471
Total	26	6.6357		