



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA CHAPINGO

DEPARTAMENTO DE SUELOS

Centro de Agroforestería para el Desarrollo Sostenible

**Maestría en Ciencias en Agroforestería
para el Desarrollo Sostenible**

**“NUTRICIÓN PARA EL RÁPIDO CRECIMIENTO DE
PLANTAS DE CAOBA (*Swietenia macrophylla*) King”**

TESIS

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

**MAESTRO EN CIENCIAS EN
AGROFORESTERÍA PARA EL
DESARROLLO SOSTENIBLE**

PRESENTA:

MORA PATIÑO MARCELA KARINA

Chapingo, México noviembre de 2006.

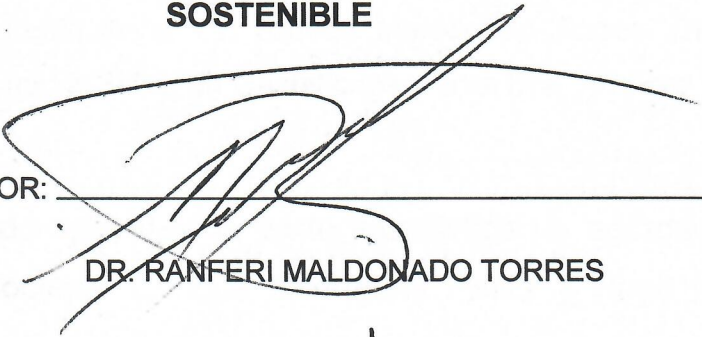


NUTRICIÓN PARA EL RÁPIDO CRECIMIENTO DE PLANTAS DE CAOBA (*Swietenia macrophylla*) King

Tesis realizada por la Biol. Marcela Karina Mora Patiño bajo la dirección del Comité Asesor indicado, aprobada por el mismo y aceptada como requisito para obtener el grado de:

MAESTRO EN CIENCIAS EN AGROFORESTERÍA PARA EL DESARROLLO SOSTENIBLE

DIRECTOR: _____


DR. RANFERI MALDONADO TORRES

ASESOR: _____


DRA. EDNA ÁLVAREZ SÁNCHEZ

ASESOR: _____


DR. JAIME SAHAGÚN CASTELLANOS

ASESOR: _____


DRA. AMPARO BORJA DE LA ROSA

NUTRICIÓN PARA EL RÁPIDO CRECIMIENTO DE PLANTAS DE CAOBA (*Swietenia macrophylla*) King

Tesis realizada por la Biol. Marcela Karina Mora Patiño bajo la dirección del Comité Asesor indicado, aprobada por el mismo y aceptada como requisito para obtener el grado de:

MAESTRO EN CIENCIAS EN AGROFORESTERÍA PARA EL DESARROLLO SOSTENIBLE

DIRECTOR: _____

DR. RANFERI MALDONADO TORRES

ASESOR: _____

DRA. EDNA ÁLVAREZ SÁNCHEZ

ASESOR: _____

DR. JAIME SAHAGÚN CASTELLANOS

ASESOR: _____

DRA. AMPARO BORJA DE LA ROSA

AGRADECIMIENTOS

Agradezco a la Universidad Autónoma Chapingo por haberme brindado la oportunidad de cursar mis estudios de maestría.

A la Coordinación General de Posgrado y la Coordinación de la Maestría Agroforestería para el Desarrollo Sostenible por darme el apoyo durante mi estancia, en especial al Dr. José Luís Romo Lozano y al MC. Miguel Uribe Gómez por su respaldo incondicional para el desarrollo de esta investigación.

A los investigadores que aportaron con su valioso conocimiento en el desarrollo de este proyecto en particular al Dr. Ranferi Maldonado Torres, Dra. Edna Álvarez Sánchez, Dr. Jaime Sahagun Castellanos y a la Dra. Amparo Borja de la Rosa.

Por haberme brindado apoyo en la parte estadística un agradecimiento en especial a los doctores Enrique Rodríguez Pérez y Hugo Ramírez Maldonado.

Además, un reconocimiento especial a los laboratoristas que me ayudaron a realizar el análisis de mis muestras: Angélica Marín Campos, Francisco Pérez Cuevas y María Dolores Coronel Sánchez.

Y por último a todos mis amigos por sus palabras de estímulo y aliento que recibí durante toda mi estancia, a Elizabeth Reyes, Miguel Rivera, Jorge a la Torre, Carlos Aguirre, Víctor Aguilar y en especial a mi gran amiga María Isabel Oble Delgadillo.

DEDICATORIA

Este trabajo va dirigido principalmente a mi familia, Emilio Yoltic Villeda Mora, Paulo César Villeda Domínguez y Virginia Domínguez Romero, por haberme brindado su valioso tiempo y ayuda incondicional para poder realizar este proyecto, mil gracias.

A mis padres, Juan Oswaldo Mora García y Bertha Patiño Villalba, ya que sin su ayuda económica y moral nunca lo hubiera logrado. Además por ser mi ejemplo de trabajo y perseverancia ante las adversidades. Los amo.

Que Dios los bendiga!!!!

DATOS BIOGRÁFICOS

La autora del presente trabajo de investigación, nació en la Provincia del Azuay-Ecuador, en la capital Cuenca, el 16 de enero de 1977. En la misma ciudad realizó sus estudios de primaria en la escuela “Santa Mariana de Jesús”, el colegio en la Unidad Educativa Fiscomicional “Asunción” obteniendo el título de bachiller en la especialidad de Químico-Biólogo. En 1994 ingresó a la Universidad del Azuay donde se realizó los estudios de licenciatura. En el 2000 obtuvo el título de Biólogo del Medio Ambiente en dicha universidad. Realizó consultorías de proyectos productivos sustentables para comunidades rurales del cantón Morona para la CRUZ ROJA de Ecuador en el año 2000. Del 2000 al 2001 se desempeñó como profesor de la Escuela Superior Amazónica. De 1999 al 2003 trabajó como Bióloga Zootecnista del proyecto Zoocriaderos de Fauna Silvestre y la elaboración de un plan de manejo alternativo sustentable para la alimentación de animales silvestres a través de sistemas agroforestales en Fundación Natura y la WWF. En el 2004 ingresó a la Universidad Autónoma Chapingo, donde realizó estudios de Maestría en Ciencias en Agroforestería para el Desarrollo Sostenible.

CONTENIDO

RESUMEN	xii
ABSTRACT	xii
I. INTRODUCCIÓN.....	2
II. OBJETIVOS	4
2.1 General	4
2.2 Específicos.....	4
III. HIPÓTESIS	5
IV. ANTECEDENTES	6
4.1 Swietenia macrophylla (Caoba)	6
4.1.1 Tallo	6
4.1.2 Hojas	6
4.1.3 Flores.....	6
4.1.4 Frutos	7
4.1.5 Distribución y requerimientos ambientales	7
4.1.5.1 Clima	7
4.1.5.2 Topografía y Suelos	7
4.1.5.3 Usos.	8
4.1.6 Crecimiento y Desarrollo del cultivo	8
4.1.6.1 Fase de vivero	8
4.1.6.2 Plantaciones	10
4.1.6.3 Problemas asociados en las fases de vivero y plantación.	12
4.2 Nutrientes promotores de crecimiento	13
4.2.1 Absorción y utilización de nutrientes.....	15
4.2.2 Síntomas de deficiencia nutricional	16
4.2.3 Características de los fertilizantes.....	18
4.2.4 Fertilizantes con macro nutrientes.....	18
4.2.5 Fertilizantes con nutrientes secundarios	18
4.2.6 Fertilizantes con micro nutrientes.....	19
4.2.7 Fertilización del cultivo con dióxido de carbono.....	19

4.2.8 Función del CO ₂ en el crecimiento y desarrollo de los árboles	20
4.3. Compuestos orgánicos e inoculantes micorrízicos promotores de crecimiento.....	20
4.3.1 Micorriza.....	21
4.3.2 Composta.....	22
V MATERIALES Y MÉTODOS	24
5.1 Tratamientos	24
5.2 Diseño Experimental y Análisis Estadístico	28
5.3 Variables Evaluadas.....	30
5.3.1 Crecimiento.....	30
5.3.2 Parámetros fisiológicos	31
5.3.2.1 Tasa de respiración y fotosíntesis	31
5.3.2.2 Concentración y acumulación de nutrientes	31
5.3.3 Estructura del tallo	32
VI RESULTADOS Y DISCUSIÓN	34
6.1 Crecimiento	34
6.2 Estimación del crecimiento en cinco meses por efecto de los tratamientos en plantas de caoba.....	38
6.3 Parámetros fisiológicos.....	45
6.3.1 Tasa de respiración y fotosíntesis	45
6.3.2 Acumulación de nutrientes	47
6.3.2.1 Macroelementos.	49
6.3.2.2 Microelementos.....	52
6.3.3 Concentración de nutrientes	56
6.4 Estructura del tallo.....	59
VII CONCLUSIONES	63
VIII Literatura citada.....	64
IX ANEXOS	67

ÍNDICE DE CUADROS

Cuadro 1. Características bioquímicas de los nutrientes minerales esenciales.....	14
Cuadro 2. Síntomas de deficiencia de micro y macro nutrientes en especies forestales.....	16
Cuadro 3. Características Físicas del Suelo “La Cima”	24
Cuadro 4. Cantidad de fertilizante aplicado al sustrato.....	25
Cuadro 5. Características de la composta.	25
Cuadro 6. Características de la multicepa	26
Cuadro 7. Combinación de los factores nutrición mineral, micorrizas, composta y dióxido de carbono, que dan como resultado 16 tratamientos.	27
Cuadro 8. Pruebas de significancia de cuadrados medios de cuatro factores [(nutrición mineral (N), micorrizas (M), composta (C) y dióxido de carbono (CO ₂)] y sus interacciones en cinco variables de plantas de caoba.	34
Cuadro 9. Análisis de la prueba DMSH, en las variables diámetro basal, altura, parte aérea, raíz y biomasa total en relación a la ausencia y presencia de N, M, C y CO ₂	35
Cuadro10. Pruebas de significancia de cuadrados medios de cuatro factores [(nutrición mineral (N), micorrizas (M), composta (C) y dióxido de carbono (CO ₂)], y sus interacciones en macro y micronutrientes en plántulas de caoba.	48
Cuadro11. Medias de las variables macro y micronutrientes en relación a la ausencia y presencia de N, M, C y CO ₂	53
Cuadro 12. Pruebas de significancia de cuadrados medios del número y diámetro de vasos vasculares de los factores (nutrición mineral (N), micorrizas (M), composta (C) y dióxido de carbono (CO ₂) y sus interacciones a dos niveles cada uno, aplicado a plántulas de caoba.....	59
Cuadro 13. Pruebas de significancia de cuadrados medios del espesor del último anillo de los factores (nutrición mineral (N), micorrizas (M), composta (C) y dióxido de carbono (CO ₂) y sus interacciones a dos niveles cada uno, aplicado a plántulas de caoba.	61

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.	Cámara plástica con cierre hermético para mantener alto el nivel de CO ₂ , ubicada en el invernadero del Departamento de Suelos en la Universidad Autónoma Chapingo.....	27
Figura 2.	Xilotomo utilizado para realizar cortes histológicos a 10 y 15 micras de espesor.....	32
Figura 3.	Cámara de flujo laminar donde se realizó el montaje de los cortes hitológicos.	33
Figura 4.	Interacción N*M. Las medias de los niveles de micorriza (M) con una misma letra en sentido vertical no difieren estadísticamente (DMSH, $\alpha \leq 0.05$).	36
Figura 5.	Interacción N*CO ₂ . Las medias de los niveles de nutrición mineral con una misma letra en sentido vertical no difieren estadísticamente (DMSH, $\alpha \leq 0.05$).	37
Figura 6.	Interacción N*M. Las medias de los niveles de micorriza con una misma letra en sentido vertical no difieren estadísticamente (DMSH, $\alpha \leq 0.05$).	38
Figura 7.	Regresión logística de altura obtenida por la aplicación de micorriza (M), nutrición mineral (N), dióxido de carbono (CO ₂), composta (C) y el testigo.	39
Figura 8.	Regresión logística del crecimiento en altura para: 1) aplicación de nutrición mineral y micorriza (N*M), 2) nutrición mineral y composta, 3) micorriza y composta (M*C), 4) micorriza y dióxido de carbono (M* CO ₂), 5) composta y dióxido de carbono (C* CO ₂), 6) nutrición mineral y dióxido de carbono (N* CO ₂) y 7) sin ninguna aplicación T0.....	40
Figura 9.	Regresión logística del crecimiento en altura producida por la aplicación de nutrición mineral (N), micorriza (M) y con ambas aplicaciones (N*M).	41
Figura 10.	Regresión logística del crecimiento en altura producida por la aplicación de nutrición mineral (N), dióxido de carbono (CO ₂) y con ambas aplicaciones (N* CO ₂).....	41

Figura 11.	Regresión logística del crecimiento en diámetro obtenida por la aplicación de micorriza (M), nutrición mineral (N), dióxido de carbono (CO ₂), composta (C) y el testigo.....	42
Figura 12.	Regresión logística del crecimiento en diámetro para: 1) aplicación de nutrición mineral y micorriza (N*M), 2) nutrición mineral y composta, 3) micorriza y composta (M*C), 4) micorriza y dióxido de carbono (M* CO ₂), 5) composta y dióxido de carbono (C* CO ₂), 6) nutrición mineral y dióxido de carbono (N* CO ₂) y 7) sin ninguna aplicación T0.....	42
Figura 13.	Regresión logística del crecimiento en volumen obtenida por la aplicación de micorriza (M), nutrición mineral (N), dióxido de carbono (CO ₂), composta (C) y el testigo.....	43
Figura 14.	Regresión logística del crecimiento en volumen para: 1) aplicación de nutrición mineral y micorriza (N*M), 2) nutrición mineral y composta, 3) micorriza y composta (M*C), 4) micorriza y dióxido de carbono (M* CO ₂), 5) composta y dióxido de carbono (C* CO ₂), 6) nutrición mineral y dióxido de carbono (N* CO ₂) y 7) sin ninguna aplicación (T0).....	44
Figura 15.	Regresión logística del crecimiento en volumen producida por la aplicación de nutrición mineral (N), dióxido de carbono (CO ₂), sin aplicación (T0) y con ambas aplicaciones (N*CO ₂).....	45
Figura 16.	Regresión exponencial de fotosíntesis obtenida por la aplicación de micorriza (M), nutrición mineral (N), dióxido de carbono (CO ₂), composta (C) y el testigo.	45
Figura 17.	Regresión exponencial de fotosíntesis para: 1) aplicación de nutrición mineral y micorriza (N*M), 2) nutrición mineral y composta, 3) micorriza y composta (M*C), 4) micorriza y dióxido de carbono (M* CO ₂), 5) composta y dióxido de carbono (C* CO ₂), 6) nutrición mineral y dióxido de carbono (N* CO ₂) y 7) sin ninguna aplicación (T0).....	46
Figura 18.	Regresión exponencial de fotosíntesis producida por la aplicación de nutrición mineral (N), dióxido de carbono (CO ₂), sin aplicación (T0) y con ambas aplicaciones (N*CO ₂).....	47

Figura 19. Interacción C*M. Las medias de los niveles de micorriza con una misma letra en sentido vertical no difieren estadísticamente (DMSH, $\alpha \leq 0.05$).	50
Figura 20. Interacción N*CO ₂ . Las medias de los niveles de CO ₂ con una misma letra en sentido vertical no difieren estadísticamente (DMSH, $\alpha \leq 0.05$).	50
Figura 21. Interacción N*C. Las medias de los niveles de composta con una misma letra en sentido vertical no difieren estadísticamente (DMSH, $\alpha \leq 0.05$).	51
Figura 22. Interacción C*CO ₂ las medias de los dos niveles de CO ₂ con una misma letra en sentido vertical no difieren estadísticamente (DMSH, $\alpha \leq 0.05$).	51
Figura 23. Interacción N*M. Las medias de los dos niveles de micorriza con una misma letra en sentido vertical no difieren estadísticamente (DMSH, $\alpha \leq 0.05$).	54
Figura 24. Interacción M*CO ₂ . Las medias de los dos niveles de CO ₂ una misma letra en sentido vertical a no difieren estadísticamente (DMSH, $\alpha \leq 0.05$).	55
Figura 25. Interacción N*CO ₂ . Las medias de los dos niveles de CO ₂ con una misma letra en sentido vertical no difieren estadísticamente (DMSH, $\alpha \leq 0.05$).	55
Figura 26. Interacción M*CO ₂ . Las medias de los niveles de CO ₂ con una letra en sentido vertical no difieren estadísticamente $\alpha \leq 0.05$	57
Figura 27. Interacción C*M. Las medias de los niveles de micorriza con unimisma letra en sentido vertical no difieren estadísticamente $\alpha \leq 0.05$	58
Figura 28. Interacción N*CO ₂ . Las medias de los niveles de CO ₂ con una misma letra en sentido vertical no difieren estadísticamente (DMSH, $\alpha \leq 0.05$).	58
Figura 29. Diámetro de vasos vasculares de las combinaciones de los factores M*CO ₂ , N, N*CO ₂ y N*M, comparados con el Testigo.....	60
Figura 30. Diámetro del último anillo en plántulas de caoba de las combinaciones de los factores M*CO ₂ , N, N*CO ₂ y N*M, comparados con el Testigo.....	62

NUTRICIÓN PARA EL RÁPIDO CRECIMIENTO DE PLANTAS DE CAOBA (*Swietenia macrophylla*) King

Nutrition for the rapid growth of mahogany plants (*Swietenia macrophylla*) King

M. Mora Patiño¹; R. Maldonado Torres²

RESUMEN

En la actualidad existe una alta demanda en el mercado mundial de maderas, esta demanda ha afectado a la especie *Swietenia macrophylla*, conocida como caoba. Dentro del manejo sostenible de las plantaciones, es de gran importancia el vigor y la disminución del tiempo de desarrollo de los árboles en la fase de vivero. La presente investigación estuvo encaminada a promover el desarrollo rápido de árboles de caoba mediante tratamientos de fertilización, a fin de acortar la fase de vivero. Plantas de caoba fueron cultivadas en macetas conteniendo suelo ácido. Los factores de estudio fueron: a) nutrición mineral balanceada, b) adición de composta (20 g kg⁻¹), c) inoculación con multicepa de micorriza (dosis 5g kg⁻¹), d) inyecciones de CO₂ (CO₂ a la concentración de 1000 μ moles mol⁻¹, con un flujo de salida de 5 a 7 L, con una aplicación de una hora dos veces por semana por un lapso de dos meses). La combinación de estos factores generó 16 tratamientos con cuatro repeticiones. El efecto de los tratamientos se valuó en las variables altura, diámetro de tallo, biomasa aérea y radical; aspectos fisiológicos a través de la tasa de fotosíntesis y la concentración de nutrientes. También se midió el efecto en los cambios estructurales en el tallo mediante cortes histológicos.

Los resultados mostraron que la nutrición mineral asociada con fertilización de CO₂, promovió significativamente el crecimiento en altura, acumulación de biomasa aérea, radical y total. Esta interacción así como la adición de composta también favoreció la acumulación de macro y micronutrientes por las plantas. Las observaciones en los cortes histológicos del tallo revelaron un incremento significativo en el diámetro de los vasos vasculares y en el grosor del último anillo. En general, la fertilización con CO₂ y sus interacciones con el resto de los factores estudiados no incrementaron la tasa de fotosíntesis. La respuesta de las plántulas de caoba a estos factores debe tomarse en cuenta para producir plantas de calidad en vivero.

Palabras clave: crecimiento y desarrollo, nutrición mineral, composta, micorrizas y CO₂.

ABSTRACT

The international wood market is currently experiencing a high demand for its products; this demand has affected the species *Swietenia macrophylla*, known as mahogany. Within sustainable plantation management, the vigour of the trees and a decrease in their development time are of great importance in the nursing phase. This research was focused on fostering the rapid development of mahogany plants by means of fertilization treatments in order to shorten the nursing phase. Mahogany plants were cultivated in flowerpots containing acid soil. The factors studied were: a) balanced mineral nutrition, b) addition of compost (20 g kg⁻¹), c) inoculation with multi-strain mycorrhizae (at a dose of 5g kg⁻¹), d) injections of CO₂ (CO₂ at a concentration of 1000 μ masses mol⁻¹, with a flow at the outset from 5 to 7 L, with an application of an hour twice a week for a period of two months). The combination of these factors generated 16 traits with four repetitions. The effect of the traits was valued in the following variables: height, stem diameter, radical and air biomass; physiological aspects through the rate of photosynthesis and the concentration of nutrients. Also, the effect on the structural changes in the stem was measured by means of histological cuttings.

The results showed that the nutrition mineral associated with CO₂ fertilization significantly promoted the growth in height, as well as the accumulation of total, radical, and air biomass. This interaction as well as the addition of compost also helped the accumulation of macro- and micronutrients by the plants. The observations in the histological stem cuttings revealed a significant increment in the diameter of the vascular elements and in the thickness of the last ring. In general, the fertilization with CO₂ and its interactions with the rest of the factors studied not favoured the photosynthetic activity. The information obtained about these factors should be taken into account in order to produce quality plants at the nursing stage.

Key words: growth and development, mineral nutrition, compost, mycorrhizae and CO₂.

¹Maestría en Agroforestería para el Desarrollo Sostenible..

² Departamento de Suelos. UACH

I. INTRODUCCIÓN

La especie caoba, es muy apreciada y altamente demandada en el mercado mundial. Los mayores proveedores de caoba del mundo para los mercados internacionales son Bolivia, Brasil, Nicaragua y Perú. Según CITIES, a finales de la década de los noventa, las exportaciones de caoba alcanzaron los 150,000 m³ por año, para después disminuir a 120,000 m³ en el 2000. Esta disminución fue particularmente dramática para Bolivia y Nicaragua, donde las exportaciones en el 2000 fueron sólo de un quinto de los volúmenes de exportación de 1997. Brasil, que es poseedor de las mayores existencias de caoba en el mundo, disminuyó de 63,000 m³ a 42,000 m³ durante el mismo período.

Estas reducciones en las explotaciones, se han debido al deterioro del área habitada por esta especie, en Costa Rica ha disminuido un 84%, El Salvador un 81%, México un 80%, Panamá un 74%, Venezuela un 70%, Perú un 53%, Ecuador un 42%. A pesar de los controles más estrictos de extracción y comercio, la disminución de sus poblaciones sigue en aumento. Más aún, existen evidencias de que estas reducciones en la exportación han incrementado la presión sobre las poblaciones de caoba, como es el caso de Perú donde, en claro contraste, las exportaciones de caoba de bosques naturales han aumentado de 11,000 m³ a 74,000 m³ durante el mismo período.

La disminución del hábitat, la alta demanda internacional, los precios lucrativos, el aumento de la actividad ilegal y períodos de corte muy largos en las plantaciones; son una amenaza que está socavando severamente los esfuerzos de los gobiernos de los países para asegurar la sostenibilidad de la extracción y comercio de esta valiosa especie maderable.

La mayoría de los países con potencial forestal para la caoba han impulsado programas de reforestación en respuesta a estos problemas, de modo que en la actualidad se cuenta con algunas técnicas y procedimientos estandarizados

para la producción de plantas en vivero. Sin embargo, la supervivencia es la clave en el éxito de la reforestación con esta especie y hasta hace algunos años, en los sistemas de producción en vivero no se había considerado el manejo de los árboles que garantice la producción de individuos vigorosos, capaces de tolerar el estrés asociado al trasplante y de mantener una tasa de crecimiento adecuada en el sitio de plantación (Román *et. al.*, 2001).

Dentro del manejo sostenible es de mucha importancia disminuir el tiempo de corte de los árboles forestales, para motivar a los productores a establecer plantaciones comerciales. A pesar de esto, se ha desarrollado muy poca investigación a cerca de procedimientos y rutinas de fertilización particulares para cada especie (Román *et. al.*, 2001) y su efecto en el crecimiento de la planta, con el fin de reducir su fase en vivero y tiempo de corte de las plantaciones de caoba.

Los nutrientes en general, ejercen una función muy importante en el desarrollo de la planta. El nitrógeno favorece el desarrollo vegetativo, la succulencia y fomenta la formación de raíces, estimula la floración y la formación de semillas; el calcio tiene una función muy especial en la estructura, permeabilidad de la membrana y la selectividad de absorción. El fósforo participa en un gran número de reacciones enzimáticas y promueve el crecimiento radical, facilitando el acceso de agua y de todos los nutrimentos minerales.

Investigaciones realizadas han demostrado que es posible la fertilización de cultivos con CO₂ con un efecto positivo en el crecimiento y desarrollo, puesto que conduce a un incremento en la tasa de fotosíntesis, área foliar y biomasa.

La presente investigación fue realizada para contribuir al entendimiento de cómo acelerar la velocidad de crecimiento de plantas de caoba, mediante el suministro de una nutrición adecuada y su mezcla con material de origen orgánico, inoculación de micorrizas y fertilización con dióxido de carbono, a fin de disminuir el período durante la fase de vivero.

II. OBJETIVOS

2.1 General

- Contribuir al conocimiento para acelerar el crecimiento de la caoba mediante la aplicación de una fertilización balanceada, combinada con micorrizas, composta y dióxido de carbono para disminuir el período de crecimiento en la fase de vivero.

2.2 Específicos

- Evaluar el efecto de una fertilización balanceada, combinada con micorrizas, composta y dióxido de carbono en el crecimiento y desarrollo de plántulas de caoba en la fase de vivero, a través de las variables altura, producción de biomasa, densidad y biomasa radical, diámetro de tallo, tasa fotosintética.
- Evaluar el efecto de una fertilización balanceada combinada con micorrizas, composta y dióxido de carbono, en la concentración y acumulación de nutrientes.
- Evaluar los cambios estructurales en el tejido del tallo de las plantas de caoba por efecto de los tratamientos.

III. HIPÓTESIS

- El empleo de una fertilización balanceada combinada con micorrizas, composta y dióxido de carbono incrementa la altura, la producción de biomasa aérea y radical, el diámetro de tallo, la densidad y la tasa de fotosíntesis de las plántulas de caoba.
- El empleo de una fertilización balanceada combinada con micorrizas, composta y dióxido de carbono incrementa la concentración y acumulación de nutrientes por la planta, así como su actividad fotosintética.
- El empleo de una fertilización balanceada combinada con micorrizas, composta y dióxido de carbono favorece el desarrollo de las plántulas de caoba, que se manifiesta como cambios estructurales celulares y de tejidos en el tallo las plántulas.

IV. ANTECEDENTES

4.1 *Swietenia macrophylla* (Caoba)

El género *Swietenia* pertenece a la familia de las meliáceas y consta de tres especies distribuidas mundialmente: *Swietenia mahogani* (L) Jacq., *Swietenia humilis* Zucc y *Swietenia macrophylla* King, según Barrosa *et.al.* (1992) a esta última corresponden las siguientes características:

4.1.1 Tallo

Fuste recto y cilíndrico, copa ancha ramificación robusta y bien distribuida, follaje denso, puede alcanzar de 40 a 45 metros de altura y de 2 a 3 metros de diámetro, corteza áspera con ciertas escamas separadas de color marrón grisáceo en árboles viejos y gris claro en los jóvenes.

4.1.2 Hojas

Dispuestas en espiral, paripinadas y algunas veces imparipinadas de 15 a 45 centímetros de largo, folios de tres a seis pares, de cinco por dos centímetros, lanceolados y ovalados muy asimétricos con el margen entero, ápice agudo hasta finalmente acuminado, base asimétrica, generalmente aguda raramente obtusa, el haz de color verde amarillento o verde oscuro y el envés verde pálido glabro en ambas superficies coriáceas; pecíolos pulvinados; de tres a nueve milímetros glabros, las hojas son caducifolias en las zonas más secas donde se distribuyen.

4.1.3 Flores

Comúnmente monoica, aunque algunos árboles sólo producen flores masculinas y otras flores femeninas. Inflorescencia en panículas axilares de 10 a 25 centímetros de largo, flores masculinas muy parecidas a las femeninas, pero con las anteras muy pequeñas, indehiscentes y sin polen, con un ovario muy grande y ovoide, toda la flor excepto el nectario es glabra en ambos sexos.

4.1.4 Frutos

Son cápsulas leñosas de color gris claro y corteza lisa de forma ovoide de 10 a 18 centímetros de largo y de 8 a 10 centímetros de diámetro, pedúnculo leñoso de 10 a 20 centímetros de longitud y un centímetro de diámetro, los frutos maduran de noviembre a marzo.

4.1.5 Distribución y requerimientos ambientales

Se encuentra en los bosques de México, América Central, Venezuela, Colombia, Perú, Ecuador, Brasil y Bolivia. Su área de distribución se ubica desde el paralelo 22° N en Veracruz (vertiente del Golfo), hasta el 17° 5´ S en Bolivia. En la vertiente del Pacífico, se dispersa en una franja costera, que se extiende desde Sinaloa en México, hasta Costa Rica.

Forma parte de selvas altas o medianas perennifolias y subperennifolias, se distribuye irregularmente, ya que en ciertos lugares sólo se encuentra un árbol cada dos o tres hectáreas. Es una especie que requiere de la luz para crecer rápidamente, por lo que al manejarse bajo un dosel protector, se debe tener la precaución de abrir los claros en el dosel.

4.1.5.1 Clima. Alcanza su desarrollo óptimo en condiciones climáticas de selvas altas perennifolias a subperennifolias, con temperatura media anual de 24° C y precipitación anual entre 2,000 a 4,000 milímetros, soportan bien sequías estacionales prolongadas sobre suelos con un manto freático al alcance de las raíces durante todo el año.

4.1.5.2 Topografía y Suelos. Esta especie crece en tierras bajas tropicales, donde la selva se inunda periódicamente, durante la época de lluvias de noviembre a febrero, con suelo húmedo durante toda la época del año. Los árboles adquieren su mejor desarrollo en las selvas altas perennifolias, las cuales presentan ciertas elevaciones de hasta 1,000 msnm, con suelos permeables y firmes de origen calizo aluvial.

4.1.5.3 Usos. Caoba, es una especie muy apreciada por la industria forestal de las zonas tropicales de México, su madera se emplea en carpintería para la fabricación de muebles finos, ebanistería de lujo, decorado de interiores, muebles para instrumentos científicos de precisión, así como para instrumentos musicales (pianos), escultura, yates, chapas, para madera contrachapada de alta calidad, hélices de avión. Es también una planta melífera, la corteza tiene propiedades astringentes, tónicas y febrífugas. En el estado de Nayarit, toman un té para el dolor de pecho, que se prepara con las semillas.

4.1.6 Crecimiento y Desarrollo del cultivo

El buen crecimiento y desarrollo de los árboles de caoba depende mucho de su fase en vivero y de adecuado manejo de las semillas antes de sembrarse.

4.1.6.1 Fase de vivero. Esta fase empieza con la recolección de las semillas, estas son de color amarillento, cada cápsula contiene normalmente, entre 45 a 70 semillas esponjosas frágiles de 8 a 10 centímetros de largo, incluyendo el ala y de 2 a 2.5 centímetros de ancho. El endodermo tiene entre 1,5 y 1,8 centímetros de largo y se aloja en la masa esponjosa, son de sabor amargo y astringente.

Se almacenan las semillas recién colectadas que tienen un elevado poder germinativo entre el 80 y 90 por ciento, pero este se pierde rápidamente si la semilla no se almacena adecuadamente, por lo que se debe guardar en recipientes metálicos de cierre hermético y depositarlos en una cámara fría a temperatura entre 3° y 7°C, bajo estas condiciones se puede tener un porcentaje de 70 a 80 por ciento de viabilidad aproximadamente, durante 1.5 a 2 años.

El sustrato que se usa para producir plantas en el vivero, requiere de ciertas características que permitieron su manejo y de una textura adecuada para facilitar la germinación de la semilla. Se prepara con tierra de monte o aluvión y arena de río proporción de 4: 1. Esta mezcla se cierne posteriormente, con la

finalidad de darle una textura uniforme, inmediatamente después se desinfecta con Bromuro de Metilo (gas tóxico). Después de aplicado el producto, debe cubrirse con plástico durante tres días, o en su defecto se puede utilizar agua caliente a 100° C.

Con el sustrato preparado se forman camellones de 0.20 metros de altura, 1.20 metros de ancho y longitud variable dependiendo de la cantidad de plantas que se desee producir.

Preparado el almácigo, se siembra la semilla desalada colocándose en forma vertical e inclinándola hacia su lado cóncavo y con la parte donde estaba el ala hacia arriba, para facilitar la emergencia de embrión y evitar deformaciones en la plántula. La semilla no requiere de ningún tratamiento previo que le permita una buena germinación antes de la siembra.

Sin embargo a principios de febrero, las plántulas alcanzarán buen tamaño y vigor para transplantarse al inicio de las lluvias, durante los meses de junio y julio. Si se siembra en el mes de julio, se dispondrá de la planta en el mes de noviembre y principios de diciembre, en la época de nortes.

La germinación de las semillas se inicia a partir de 15 a 20 días después de la siembra, pero se puede prolongar hasta 30 días. Una vez que las semillas han germinado, se transplantan a bolsas de polietileno negro de 12 centímetros de diámetro por 25 centímetros de largo, previamente llenas con el sustrato, con características semejantes al que se utilizó para la formación de los almácigos, sólo que a este se le agregan 10 gramos de Urea por bolsa, con la finalidad de darle a la planta el vigor necesario para el establecimiento en su lugar definitivo.

El transplante se debe efectuar después de cinco u ocho días de nacidas las plántulas, o sea de 40 a 45 días después de la siembra de la semilla, que es cuando tienen una coloración rojiza. Si a causa de cualquier contratiempo las plántulas se dejan más tiempo en el almácigo, el transplante se debe efectuar, teniendo la precaución de cortar las raicillas, dejándolas una longitud que puede

oscilar entre cinco a ocho centímetros. Esta operación se hace con el fin de que al colocar la planta en la bolsa, no deben de quedar dobladas las raíces, pues esto ocasiona deformaciones y retarda su crecimiento.

Generalmente, se usa sombra en las primeras etapas de desarrollo de la plántula en el envase, que dura aproximadamente un período de 18 a 22 días, con la finalidad de protegerlas de la luz solar directa; pero evitando el sombreado excesivo, ya que crea condiciones adecuadas para el desarrollo del gusano barrenador (*Hypsiphylia gradella* Zeller).

4.1.6.2 Plantaciones. Las plantaciones pueden establecerse puras de caoba, pero se debe estar consciente que el control de *H. grandella* es difícil y requiere insumos.

La asociación con especies de rápido crecimiento, ya sean nativas como el tatán, *Coloubrina arborences* y el amate *Picus tecolutensis*, o introducidas como la teca *Tectona grandis*, eucalipto *Eucalyptus grandis*, lazcar *Acrocarpus fraxinifolius*, y melina *Gmelina arborea*, forma una plantación heterogénea que además de disminuir el ataque del citado barrenador, permite posteriormente manejar diferentes turnos de corta en la plantación.

Para el enriquecimiento de acahuales, se recomienda plantar a la caoba en franjas dentro del mismo, utilizando un espaciamiento de 3 x 3 metros entre las plantas en la misma brecha y a 8 metros entre franjas, aunque esto depende de la densidad de plantación deseada.

Para sembrar la planta en el sitio previamente preparado, con una pala recta se abren hoyos de 30 centímetros de profundidad y se coloca la planta sin envase de plástico. Se debe tener cuidado de que el cuello de la raíz no quede fuera del suelo, ni muy enterrado, de lo contrario puede causar retardo en el crecimiento. En terrenos planos, la hoyadura puede hacerse con un gusano accionado por la toma de fuerza de un tractor.

En el estado de Tabasco se tiene definida dos épocas de plantación, las cuales se realizan al inicio de las lluvias: una en los meses de junio o julio y la otra de noviembre a enero. La mas adecuada es la segunda época, que es cuando se presentan temperaturas bajas, que evitan la deshidratación de la planta.

Normalmente, la densidad inicial de la plantación de caoba uniesférica o asociada con otras especies, es mil a mil 100 plantas por hectárea de todas las especies elegidas; esta densidad es práctica, ya que permite realizar actividades de mantenimiento, con un espacio adecuado para el desarrollo de la especie.

Si se planta intercalada con otras especies, disminuye el números de caobas por hectárea, pero el espaciamiento sigue siendo de 3 x 3 metros entre plantas e hileras de las especies, o sea mil 100 plantas totales por hectárea.

Los costos que se presentan en el Cuadro, incluyen todas las etapas para el establecimiento de la plantación desde la colecta de semillas, hasta la reposición de fallas. Se puede observar que con los cuidados necesarios, la siembra de raíz desnuda fue el único método que necesitó replante y aún así resulta mas barato. Siembra directa al envase 719.15, Raíz desnuda 407.15, Propagación común 755.90.

En las etapas iniciales de la plantación, el ataque del barrenador de la caoba generalmente es en la yema terminal de la planta y la obliga a ramificarse, por lo que se tiene que podar para definirle su crecimiento y su tallo. Esta labor se tiene que realizar los dos primeros años de la plantación, después de esa edad, la ramificación es menos determinante en definición del fuste.

También es importante realizar podas para conformar las copas de las especies que sirvan de dosel de caoba, con el propósito de permitir la entrada de luz, que ayuda a las caobas jóvenes a tener un buen desarrollo.

Si la densidad de la plantación de caoba es de 600 árboles por hectárea, los primeros aclareos se realizaran a los 6 o 10 años y continúan progresivamente,

de tal forma que a los 20 años de edad, se recomienda una densidad de 400 árboles por hectárea. Si a esa edad la caoba no presenta un buen incremento de altura y diámetro, se continúa esta labor hasta dejar una densidad de 200 árboles por hectárea, que será la densidad para la corta final.

Tomando en cuenta los ritmos de crecimiento de los bosques, los turnos que se requieren para el caso de maderas finas como caoba oscilan entre 60 y 80 años (Musalem *et al*, 1979).

4.1.6.3 Problemas asociados en las fases de vivero y plantación. La velocidad de extracción de los árboles de los bosques que se realiza actualmente y los cambios del uso del suelo está afectando a la masa forestal del planeta, principalmente al factor suelo, ya que esto excede la población natural de los bosques. Es por esta razón que organizaciones gubernamentales y no gubernamentales han enfocado sus esfuerzos en la repoblación de los mismos con programas de reforestación, de modo que en la actualidad cuenta con técnicas y procedimientos estandarizados en la producción de algunas plantas de viveros en México (Román *et al.*, 2001).

Estos programas han olvidado un aspecto fundamental que es la supervivencia de las plantas para reforestar que han salido de vivero, los cuales deben garantizar, en la medida de lo posible, mayores porcentajes de establecimiento en campo, con individuos vigorosos capaces de tolerar el estrés asociado al trasplante y de mantener una tasa de crecimiento adecuada en el sitio de la plantación (Duryea, 1985). Se ha comprobado que la morfología, el tamaño y la cantidad de nutrientes en los tejidos de la planta cultivada en vivero tienen una influencia directa en la supervivencia y crecimiento de la planta en campo (Thompson, 1985). La caoba aunque no es una especie que se utiliza con fines de reforestación sino en plantaciones comerciales, presenta los mismos inconvenientes que las especies forestales en la fase de vivero.

Estudios realizados demuestran que uno de los principales problemas para la buena adaptación de las plantas o sobrevivencia es realizar nutriciones

adecuadas de las plantas en vivero para un buen desempeño en condiciones de campo, tal es el caso de *Pinus greggii* E, *Manilkara sapota* L (Román *et al.*, 2001; Parada *et al.*, 2001), debido a que en ausencia de una nutrición adecuada los árboles presentan un lento crecimiento en los viveros. Román (2001), concluye en su investigación que el balance nutrimental es primordial para el desarrollo de las plántulas en etapa de vivero y que es necesaria la realización de estudios sobre regímenes y dosis de cada nutrimento que permitan determinar el óptimo fisiológico y operativo.

A pesar de ello, no se han desarrollado procedimientos y rutinas de fertilización particulares para cada especie y se desconoce, en la mayoría de ellas, su efecto en el crecimiento de las plántulas (Román *et al.*, 2001). Sin embargo, la sobreaplicación de fertilizantes, además de implicar mayores costos, puede tener efectos tóxicos o provocar un desequilibrio en el crecimiento con efectos negativos o perjudiciales en la mayoría de los casos (Duryea, 1985). Caso contrario, una aplicación balanceada, o con requerimientos apropiados de nutrimentos para cada especie mejorará la morfología y fisiología de las plantas de acuerdo con los estándares establecidos en cada vivero (Cano *et al.*, 1998).

En el caso de la caoba, se ha realizado muy pocas investigaciones de nutrición de plántulas en vivero, más bien estos estudios se dirigen a su comportamiento en campo, que incluyen las labores culturales y turnos de cosecha.

4.2 Nutrimentos promotores de crecimiento

La importancia de la nutrición mineral en la calidad y cantidad del crecimiento de especies forestales producidas en la fase de vivero no debe ser descartada. Probablemente, más que ninguna otra práctica de cultivo, con la posible excepción del riego, la fertilización controla tanto la tasa de crecimiento como el tipo de crecimiento (Landis *et al.*, 1989).

Landis (1989), ha identificado trece elementos esenciales para el crecimiento de las plantas superiores, pero este autor trabajó con diez, clasificándolos en

macro y micro nutrientes. Los macro nutrientes son constituyentes de compuestos orgánicos, como las proteínas y los ácidos nucleicos, que actúan en la regulación osmótica, y por lo tanto son encontrados en cantidades relativamente grandes en los tejidos vegetales. Las enzimas esencialmente están constituidas por micro nutrientes, y se encuentran en proporciones relativamente pequeñas en los tejidos vegetales (Landis *et al*, 1989), como se observa en el siguiente Cuadro 1:

Cuadro 1. Características bioquímicas de los nutrientes minerales esenciales.

Elementos esenciales	Forma utilizada en las plantas	Funciones bioquímicas en las plantas
Nitrógeno (N)	En la forma NO_3 , NH_4^+	Uno de los constituyentes que se encuentra en mayor porcentaje en el material orgánico. Elemento esencial de grupos atómicos involucrados en procesos enzimáticos. Asimilación por reacciones de oxidación-reducción.
Fósforo (P) Boro (B)	En forma de fosfatos, ácido bórico	Esterificación con grupos nativos de alcohol en plantas. Los ésteres fosfato están involucrados en reacciones de transferencia de energía.
Potasio (K) Magnesio (Mg) Calcio (Ca) Manganeso (Mn)	En forma de iones de la solución del medio de crecimiento	Funciones no específicas estableciendo potenciales osmóticos. Reacciones más específicas para que la conformación de proteína enzima sea llevada a un nivel óptimo (activación enzimática). Puenteando socios de reacción. Balanceando aniones indifundibles y difundibles.
Hierro (Fe) Cobre (Cu) Zinc (Zn)	En forma de iones o quelatos, de la solución del medio de crecimiento	Presente predominantemente en una forma de quelato, incorporado a grupos fotosintéticos. Posibilita el transporte de electrones por el cambio de valencia.

Fuente: modificado de Jones (1983) por Landis *et al*. (1989).

Una fertilización adecuada afecta el crecimiento de las especies forestales en su fase de vivero, lo cual es esencial para establecer programas de diseño e implementación de una nutrición adecuada en estas plantas. La nutrición se basa principalmente en fertilizantes que se descomponen en iones en una solución acuosa. Estos iones son absorbidos en sitios de intercambio catiónico en las partículas del medio de crecimiento, como la turba o vermiculita, o se mantiene en la solución del medio de crecimiento hasta que son absorbidos por el sistema radical de la planta. Una planta forestal, como cualquier planta, obtiene como iones esos elementos minerales de la solución del suelo, si bien algunos nutrientes pueden también ser tomados como moléculas o complejos orgánicos (Jones, 1983).

4.2.1 Absorción y utilización de nutrientes

La absorción de nutrientes por las plantas puede ser dividida en absorción activa y pasiva. La absorción pasiva significa que los iones son llevados dentro de la raíz de la planta mediante el flujo del agua transpiracional (flujo de masa). Los factores que controlan la absorción pasiva son el volumen de agua moviéndose dentro de la planta (demanda transpiratoria) y la concentración de los iones en la solución del medio de crecimiento que rodea a las raíces. La absorción activa ocurre cuando los iones tomados en contra el gradiente de presión osmótica que normalmente existe entre las células de la raíz y la solución del medio de crecimiento. El proceso bioquímico involucrado en la absorción pasiva no está del todo comprendido, pero existe acuerdo general en que la absorción pasiva es el mecanismo dominante. Existen tres aspectos que se deben conocer acerca de la absorción de nutrientes por las plantas (Jones, 1983).

1. La planta es capaz de absorber iones selectivamente, aún cuando la concentración de iones y la proporción de la solución de alrededor pueda ser muy diferente que la que existe dentro de las células de la raíz.
2. Los iones se acumulan en la raíz a través de un gradiente considerable.

3. La absorción activa de iones requiere de energía, la cual es generada por el metabolismo celular.

Las plantas también alcanzan nutrientes minerales mediante la extensión de sus raíces, donde las puntas de las raíces crecen dentro de nuevos suministros de nutrientes minerales (Jones, 1983). Estos procesos son simplificados con aplicaciones de fertilizante líquido, porque las raíces de las plantas son bañadas con un suministro fresco de solución nutritiva completa (Landis *et al*, 1989).

4.2.2 Síntomas de deficiencia nutricional

Las deficiencias nutricionales se caracterizan por presentar síntomas específicos y observables. Estos síntomas pueden ayudar a realizar un diagnóstico de deficiencia de nutrientes, pero para ser mas exactos es necesario realizar un análisis de nutrientes en la planta (Cuadro 2).

Cuadro 2. Síntomas de deficiencia de micro y macro nutrientes en especies forestales.

Síntomas de deficiencia	
Nitrógeno (N)	Clorosis general, seguida de “acaparamiento”, en casos severos, el follaje es pequeño, de color amarillo-verde; esto puede ser seguido por coloración púrpura, y eventualmente por una necrosis de las puntas de las hojas. Se distingue de la clorosis debida a deficiencia de hierro porque el follaje viejo es afectado primero.
Fósforo (P)	La planta entera con frecuencia queda “achaparrada”, aunque el tamaño del follaje puede o no resultar reducido. Los síntomas foliares son variables entre especies, con coloraciones desde verde claro, a amarillo o un tinte purpúreo.
Potasio (K)	Síntomas variables entre especies: follaje usualmente corto, clorótico, con algún color verde en la base; en casos severos, tonalidades oscuras y necrosis con muerte descendente desde la punta. La aparición de un color café y la necrosis también puede ocurrir.

Continuación del Cuadro 2.

Calcio (Ca)	“Acaparamiento” y crecimiento mínimo en todos los meristemas; en casos severos, las yemas terminales pueden morir o detener su elongación. Las especies latifolias exhiben quemadura de las puntas y clorosis de las hojas mas nuevas. La aparición de una tonalidad café y la muerte de las puntas de las raíces, también es común.
Magnesio (Mg)	Hojas de puntas amarillas o anaranjadas. A esto sigue necrosis en los casos severos. Las especies latifoliadas, frecuentemente exhiben necrosis internerval en las hojas.
Azufre (S)	Follaje desde clorótico hasta un amarillo-verde pálido, las hojas más jóvenes resultan más afectadas. Crecimiento limitado de las hojas y eventualmente necrosis en los casos severos.
Hierro (Fe)	La clorosis aparece primero en el follaje joven. En casos severos, el follaje es de un color amarillo brillante a blanco.
Manganeso (Mn)	Clorosis en el follaje, similar a la deficiencia de hierro.
Zinc (Zn)	Limitación extrema del crecimiento del follaje, con “mechones”, o “enrosetamiento”, seguido de muerte descendente de puntas en los casos extremos.
Cobre (Cu)	Acículas retorcidas en espiral, con las puntas amarillentas o con tonalidad bronce.
Boro (Br)	Clorosis y necrosis de la yema Terminal.
Molibdeno (Mo)	Clorosis, seguida de necrosis, empezando en la punta.
Cloro (Cl)	No están referidos síntomas de deficiencia para plantas de especies forestales.

Fuente: modificado de Armson y Sadrekia (1979), Erdmann et al. (1979), Hacskeylo et al. (1969), Morrison (1974) y Tinus McDonald (1979) por Landis et al. (1989).

4.2.3 Características de los fertilizantes

Los fertilizantes pueden ser categorizados en varias formas, pero para propósitos prácticos se consideran tres tipos de fertilizantes: fertilizantes con macro nutrientes, que proporcionan N, P y K; fertilizantes de nutrientes secundarios, que proporcionan Ca, Mg y S; y fertilizantes que proporcionan micro elementos, ya sea alguno o una combinación de los siete micro nutrientes esenciales (Landis *et al.*, 1989).

4.2.4 Fertilizantes con macro nutrientes

Los fertilizantes se comercializan en formas líquidas como sólidas y son usadas en ambos casos en viveros. Los fertilizantes sólidos pueden adquirirse en forma granular o pastillas y los líquidos generalmente son inyectados a través del sistema de riego, mientras que los fertilizantes sólidos son incorporados al sustrato, o usados previa disolución a manera de cubierta (Landis *et al.*, 1989).

En los fertilizantes uno de los principales nutrientes es el nitrógeno, puesto que es el que más limita el crecimiento de las plantas producidas en vivero, el nitrógeno esta disponible en muchas formas orgánicas e inorgánicas, siendo menos frecuente y muy costoso en su forma orgánica (Landis *et al.*, 1989). Pero disponible en muchas formas inorgánicas, hay dos iones de nitrógeno inorgánico que son absorbidos por las plantas: el amonio, un catión (NH_4^+) cargado positivamente, y el nitrato, un anión (NO_3) cargado negativamente (Landis *et al.*, 1989).

4.2.5 Fertilizantes con nutrientes secundarios

Los macro nutrientes secundarios (Ca, Mg y S), generalmente son proporcionados por el suelo y el agua, y por lo tanto no son agregados como fertilizante en viveros, con frecuencia el Ca y Mg son proporcionados en cantidades adecuadas en el agua, comúnmente utilizados para aumentar el pH en suelos ácidos (Landis *et al.*, 1989).

Los nutrientes secundarios también están presentes en muchos productos químicos usados como fertilizantes, y en las formulaciones de fertilizantes comerciales. El sulfato de amonio $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$, contiene S y el nitrato de calcio $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$ contiene Ca (Landis *et al.*, 1989).

4.2.6 Fertilizantes con micro nutrientes

Los micro nutrientes pueden ser aportados tanto de fuentes inorgánicas como de fuentes orgánicas, y las propiedades de las diferentes fuentes varían considerablemente (Landis *et al.*, 1989). La Asociación Californiana de Fertilizantes (California Fertilizer Association, 1985), clasifica los micro nutrientes como: 1) sales inorgánicas, 2) quelatos sintéticos, y 3) complejos naturales orgánicos. Los complejos orgánicos naturales son subproductos de la industria de la celulosa, pero no son recomendados para el cultivo de especies forestales en vivero, pues son menos estables que los quelatos sintéticos, y son descompuestos más rápidamente por los microorganismos (Landis *et al.*, 1989).

4.2.7 Fertilización del cultivo con dióxido de carbono

El dióxido de carbono es incoloro e inodoro. El CO_2 se encuentra conformando el 0.035% (350 ppm) de los gases de la atmósfera, aunque en los últimos años ha incrementado su concentración a causa de una masiva deforestación y la combustión de carburantes fósiles (Landis *et al.*, 1992).

Debido a que el CO_2 se encuentra en pequeñas cantidades en la atmósfera, es considerado como uno de los factores principales para fotosíntesis bajo condiciones de invernadero. Aunque en algunos experimentos realizados demuestran que a elevadas concentraciones de este gas produce una respuesta fitotóxica (Landis *et al.*, 1992).

El bióxido de carbono permite a las plantas combinar este gas con el agua formando azúcares. Algunos de estos azúcares se convierten en compuestos complejos que aumentan las sustancias sólidas secas de la planta para el crecimiento continuado a la madurez final. Sin embargo, cuando la fuente de

bióxido de carbono se reduce, la estructura compleja de la célula de la planta no puede utilizar la energía del sol completamente y se acorta el crecimiento o el desarrollo (Home Harvest, 2006)

4.2.8 Función del CO₂ en el crecimiento y desarrollo de los árboles

El carbón es uno de los 16 nutrientes que son esenciales para el crecimiento de la planta. Alrededor del 40% del peso en fresco de las plantas esta compuesto por carbón. Las plantas obtienen este compuesto en forma de CO₂ a través de los estomas de las hojas (Landis *et al.*, 1992).

Investigaciones realizadas en brinzales demuestran los beneficios del enriquecimiento con CO₂, en cuanto crecimiento en diámetro y de los meristemas de la semilla. Sin embargo, altas concentraciones pueden producir el cierre de los estomas, reduciendo automáticamente la concentración del gas dentro de la hoja. Además, mientras más rápido es el crecimiento por la adición de CO₂ da lugar generalmente a una escasez de otro factor que limita la fotosíntesis y por lo tanto el crecimiento (Landis *et al.*, 1992).

4.3. Compuestos orgánicos e inoculantes micorrízicos promotores de crecimiento

Un abono en general se considera aquel material que se aplica al suelo y estimula el crecimiento de las plantas de manera indirecta, a través de mejorar las propiedades físicas del suelo. Por otro lado, un material se considera como fertilizante cuando estimula el crecimiento de manera directa a través de aportar nutrimentos indispensables para las plantas.

En el contexto anterior, los abonos provenientes de residuos orgánicos como los estiércoles de diferentes especies de animales, biosólidos, los residuos de cosecha y las composta pueden considerarse como abonos y también como fertilizantes orgánicos (Figuroa *et al* 2004).

4.3.1 Micorriza

Una micorriza (o raíz micótica) es una asociación simbiótica y mutualista que existe entre el hongo no patógeno y las células vivas de la raíz, específicamente en las células corticales y las epidérmicas. Los hongos reciben nutrientes orgánicos de la planta al mismo tiempo que mejoran la absorción del agua y de minerales a través de la raíz. Habitualmente los hongos sólo infectan raíces jóvenes y tiernas. Con la infección se detiene o disminuye, la generación de pelos radicales, por lo que a menudo las micorrizas tienen pocos pelos de ese tipo. De no ser porque el volumen de suelo se penetra aumenta en gran medida por las delgadas hifas micóticas, que se extienden desde la micorriza, esta situación reducirá mucho la superficie de absorción. Las hifas asumen las funciones absorbentes encomendadas a los pelos radicales (Salisbury *et al*, 2000).

Existen dos grandes grupos de micorrizas: Las ectomicorrizas y las endomicorrizas, aunque en ocasiones se pueden encontrar un grupo poco común con unas propiedades intermedias, llamadas micorrizas ectoendotróficas. En las ectomicorrizas las hifas micóticas forman un manto tanto fuera como dentro de la raíz, así como los espacios intracelulares de la epidermis y de la corteza. No existe ninguna penetración intercelular hacia las células epidérmicas o de la corteza, pero sí se forma entre estas células una extensa red, llamada red de Hartig. Las ectomicorrizas son muy habituales en los árboles (Salisbury *et al*, 2000).

Las endomicorrizas forman tres subgrupos, pero el más común de ellos, es el de las micorrizas vesiculares arbusculares (VAM). Los hongos presentes en las VAM pertenecen a la familia *Endogonaceae* y generan una red interna de hifas entre las células corticales que se extiende hasta el suelo, desde donde las hifas absorben agua y sales minerales. Aunque parece que los hongos VAM penetran directamente el citosol de las células corticales (creando estructuras denominadas vesículas y arbusculos, de donde han tomado su nombre), las hifas están rodeadas por una membrana plasmática invaginada desde las

células corticales. Las VAM aparecen en la mayoría de las especies angiospermas herbáceas, tanto si son monocotiledóneas como dicotiledóneas, cultivos anuales o perennes, o bien especies nativas o introducidas (Salisbury *et al*, 2000).

La parte micótica de los dos tipos de micorriza recibe azúcares de la planta anfitrión, mientras que las plantas que crecen en la sombra y tienen deficiencias de azúcares presentan, como se podría esperar, un desarrollo escaso de micorrizas. Las plantas que crecen en suelos fértiles suelen tener micorrizas menos desarrolladas que las plantas silvestres que crecen en suelos infértiles. El beneficio bien documentado que proporcionan las micorrizas consiste en una mejor absorción de fosfatos, aunque a menudo también aumenta la absorción de otros nutrientes. Quizás el beneficio mas importante que proporcionan las micorrizas es el aumento de absorción de los iones que normalmente se difunden con lentitud hacia el interior de las raíces, o bien los que son muy necesarios, especialmente el fosfato, NH_4^+ , K^+ , y NO_3^- . Las micorrizas proporcionan notables beneficios a los árboles que crecen en suelos infértiles. De hecho, sin las propiedades de absorción de nutrientes proporcionan las micorrizas, muchas comunidades de árboles ya no existirían (Salisbury *et al*, 2000).

4.3.2 Composta

La naturaleza es un enorme sistema que hace composta, convierte los desechos orgánicos como hojas, flores, frutos y otras partes de la planta. En nutrientes o alimentos que se integran a la tierra, para después ser aprovechados, por los demás seres vivos, incluyendo al hombre. De forma tradicional, durante años, los agricultores han reunido los desperdicios orgánicos para transformarlos en abono para sus tierras. Comportar dichos restos no es más que imitar el proceso de fermentación que ocurre normalmente en el suelo de un bosque, pero acelerado, intensificado y dirigido, en el cual se produce humus (López, 2003).

La palabra composta proviene del latín *componere*, juntar; por lo tanto composta es la reunión de un conjunto de restos orgánicos que sufren un proceso de fermentación y da un producto de color marrón oscuro, con olor a humus (López, 2003).

Este abono orgánico resultante contiene materia orgánica, así como nutrientes: nitrógeno, fósforo, potasio, magnesio, calcio, hierro y otros oligoelementos necesarios para la vida de las plantas (López, 2003).

V MATERIALES Y MÉTODOS

Se realizó un experimento en condiciones de invernadero, para lo cual se empleó un suelo clasificado como Andisol proveniente de La Cima Estado de México, con las siguientes características (Cuadro 3):

Cuadro 3. Características Físicas del Suelo “La Cima”

Parámetro	Unidad	Valor
pH		5.5
Conductividad eléctrica	dS m ⁻²	0.18
Nitrógeno total	%	0.31
Nitrógeno inorgánico	mg kg ⁻¹	24.7
Materia orgánica	%	2.56
Fósforo Bray	mg kg ⁻¹	3.5
Fósforo Olsen	mg kg ⁻¹	1.6
Potasio	mg kg ⁻¹	70
Calcio	mg kg ⁻¹	604
Magnesio	mg kg ⁻¹	59.5
Zinc	mg kg ⁻¹	1.48
Manganeso	mg kg ⁻¹	3.56
Cobre	mg kg ⁻¹	0.89
Hierro	mg kg ⁻¹	42.13

De acuerdo con la Norma Oficial Mexicana de Análisis del Suelo (NOM-182-SSAI-1998), el suelo se clasificó como fuertemente ácido, con una conductividad eléctrica baja, con un porcentaje de materia orgánica bajo, muy rico en nitrógeno total, muy bajo en fósforo extractable.

Para este estudio se empleó 64 plantas, éstas se desarrollaron en el Campo Experimental el Palmar INIFAP. La edad fue de cinco meses con una longitud de 70 a 80 centímetros de altura contando con diez a quince hojas.

5.1 Tratamientos

Los tratamientos consistieron en la aplicación de nutrición mineral, composta, micorriza y CO₂. La dosis de fertilizante mineral que se aplicó dependió de la concentración de nutrientes que presentó el suelo, como se describe a continuación (Cuadro 4):

Cuadro 4. Cantidad de fertilizante aplicado al sustrato.

Fertilizante		Cantidad
Nitrato de Amonio	NH_4NO_3	0.47 g
Fosfato Diamónico	18-46-00	0.53 g
Sulfato de Potasio	K_2SO_4	7.09 g
Carbonato de Calcio	CaCO_3	3.97 g
Sulfato de Magnesio	$\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$	1.818 g
Sulfato Ferroso	$\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$	18.94 mg
Sulfato de Manganeso	$\text{MnSO}_4 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$	145 mg
Sulfato de Zinc Monohídrico	$\text{ZnSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$	136.9 mg
Sulfato de Cobre Pentahidratado	$\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$	114 mg
V-Bor	H_3BO_4	44.37 mg

La composta se aplicó en una dosis de 20 g maceta⁻¹. En el Cuadro 5 se presentan las características de la composta.

Cuadro 5. Características de la composta.

Parámetro		Valor
pH		8.11
CE	dS m ⁻¹	3.50
Humedad	%	40.00
M. Orgánica	%	38.50
Nitrógeno	%	1.50
Fósforo	%	0.43
Potasio	%	2.64
Calcio	%	8.63
Magnesio	%	0.71
Hierro	mg kg ⁻¹	2152
Manganeso	mg kg ⁻¹	122
Zinc	mg kg ⁻¹	90
Cobre	mg kg ⁻¹	14
Densidad Aparente	g cm ⁻³	0.64

El inóculo de micorriza se aplicó a razón de 1 g kg de suelo⁻¹. En el Cuadro 6 se describe la composición de la multicepa.

Cuadro 6. Características de la multicepa

Parámetro	Valor
Propágulos de hongos endomicorrizicos Mínimo 33g	<i>Cigaspora margarita</i> <i>Glomus mosseae</i> <i>G. clarum</i> <i>G. deseticola</i> <i>G. etunicatum</i> <i>G. brasilianum</i> <i>G. Intraradices</i>
Bacterias benéficas aproximadamente 225 000 UFC/g	Mas de 60 cepas fijadoras de nitrógeno solubilizadoras de fósforo y promotoras de crecimiento.
Trichoderma Gliocladium (hongos)	<i>T. harzianum</i> <i>T. ressi</i> <i>T. viride</i> <i>Gliocladium virens</i> 388 000 UFC/g.
Vitaminas promotoras de crecimiento	Biotina, ácido fólico, B, B ₂ , B ₃ , B ₆ , B ₇ , B ₁₂ , C, K.
Aminoácidos	Proteína Vegetal y de animales
Extracto de yuca y alga	<i>Yuca schidigera</i> <i>Ascophyllum nodosum</i>
Azúcares naturales	Dextrosa

El CO₂, con pureza del 99.97%, se aplicó a la atmósfera de la cámara en forma gaseosa, para lo cual se usaron cilindros especiales con capacidad para 25 kg. Para el control de la inyección de CO₂ se utilizó un regulador de presión calibrado a un flujo de salida de 10 L min⁻¹, con un tiempo de aplicación de una hora dos veces por semana por un lapso de dos meses. La concentración de CO₂ en la cámara después de la aplicación fue de 1000 µl l⁻¹ CO₂.

Para lograr una mejor distribución del CO₂ dentro de la cámara se colocó una manguera con orificios distribuida a lo largo del bancal, para facilitar la homogenización en la concentración del CO₂.

Se construyeron cámaras cerradas (Figura 1), en las que se colocaron las plantas para la aplicación del CO₂. Las unidades experimentales sin inyección de CO₂ también se colocaron en una cámara para igualar condiciones ambientales en todas las plantas.

Los tratamientos de fertilización de CO₂ permanecieron herméticamente cerrados por 24 horas en cada aplicación.



Figura 1. Cámara plástica con cierre hermético para mantener alto el nivel de CO₂, ubicada en el invernadero del Departamento de Suelos en la Universidad Autónoma Chapingo.

La combinación de los cuatro factores generó 16 tratamientos que se describen a continuación (Cuadro 7).

Cuadro 7. Combinación de los factores nutrición mineral, micorrizas, composta y dióxido de carbono, que dan como resultado 16 tratamientos.

Tratamientos	Factores de Estudio			
	N. Mineral	Micorrizas	Composta	CO ₂
T ₀	-	-	-	-
T ₁	-	-	-	CO ₂
T ₂	-	-	C	-
T ₃	-	-	C	CO ₂
T ₄	-	M	-	-
T ₅	-	M	-	CO ₂
T ₆	-	M	C	-
T ₇	-	M	C	CO ₂
T ₈	N	-	-	-
T ₉	N	-	-	CO ₂
T ₁₀	N	-	C	-
T ₁₁	N	-	C	CO ₂
T ₁₂	N	M	-	-
T ₁₃	N	M	-	CO ₂
T ₁₄	N	M	C	-
T ₁₅	N	M	C	CO ₂

N = Nutrición mineral, M = Micorrizas, C = Composta, CO₂ = Dióxido de carbono

Se emplearon macetas de 5 kg de suelo, en donde se mezclaron previamente los fertilizantes minerales, la composta y el inóculo de micorrizas, de acuerdo con cada tratamiento.

5.2 Diseño Experimental y Análisis Estadístico

El diseño experimental empleado fue completamente al azar con cuatro repeticiones. El diseño de tratamientos fue un factorial 2^4 , ya que son cuatro factores [Nutrición mineral (N), micorriza (M), composta (C) y dióxido de carbono (CO_2)] con dos niveles (presencia y ausencia de fertilizante) cada uno. El modelo en que se basó el análisis de varianza fue el siguiente (Martínez, 1988):

$$Y_{ijklm} = \mu + N_i + M_j + C_k + \text{CO}_{2l} + (NM)_{ij} + (NC)_{ik} + (\text{NCO}_2)_{il} + (MC)_{jk} + (\text{MCO}_2)_{jl} + (\text{CCO}_2)_{kl} + (\text{NMC})_{ijk} + (\text{NCCO}_2)_{ikl} + (\text{MCCO}_2)_{jkl} + (\text{NMCO}_2)_{ijl} + (\text{NMCCO}_2)_{ijkl} + \sum_{ijklm}$$

$$i, j, k, l, m = 1, 2$$

$$m = 1, 2, 3, 4$$

Donde:

Y_{ijklm} = es la observación correspondiente a la repetición m de la combinación de los niveles i, j, k y l de los factores N, M, C y CO_2 , respectivamente

μ = es la media general

N_i = es el efecto del nivel i en nutrición mineral

M_j = es el efecto del nivel j en micorriza

C_k = es el efecto del nivel k en composta

CO_{2l} = es el efecto del nivel l en dióxido de carbono

$(NM)_{ij}$ = es la interacción entre los factores N_i y M_j

$(NC)_{ik}$ = es la interacción entre los factores N_i y C_k

$(NCO_2)_{il}$ = es la interacción entre los factores N_i y CO_{2l}

$(MC)_{jk}$ = es la interacción entre los factores M_j y C_k

$(MCO_2)_{jl}$ = es la interacción entre los factores M_j y CO_{2l}

$(CCO_2)_{kl}$ = es la interacción entre los factores C_k y CO_{2l}

$(NMC)_{ijk}$ = es la interacción entre los factores N_i , M_j y C_k

$(NCCO_2)_{ikl}$ = es la interacción entre los factores N_i , C_k y CO_{2l}

$(MCCO_2)_{jkl}$ = es la interacción entre los factores M_j , C_k y CO_{2l}

$(NMCO_2)_{ijl}$ = es la interacción entre los factores N_i , M_j y CO_{2l}

$(NMCCO_2)_{ijkl}$ = es la interacción entre los factores N_i , M_j , C_k y CO_{2l}

Cuando la interacción entre dos factores fue significativa, las comparaciones de las medias de los dos niveles de un factor en cada uno de los niveles de otro factor se analizaron con la prueba de Tuckey (Steel y Torrie, 1988).

Además, se realizaron regresiones logísticas y exponenciales para las variables de altura, diámetro, volumen y fotosíntesis con el programa de cómputo no lineal para la estimación de parámetros de regresión no lineal útiles en el análisis de crecimiento de cultivos (Rodríguez *et al.*, 2006).

Modelo Logístico

$$y = \frac{A}{1 + Be^{-Cx}}$$

Donde:

y = variable de respuesta

x = variable independiente

A = asíntota, valor de y cuando x tiende a infinito. Cuando y es igual a $A/2$ corresponde a la ordenada del punto de inflexión de la curva

B = parámetro asociado a la ordenada de origen

C = parámetro relacionado con el valor de x para el punto de inflexión, relacionado con la velocidad de crecimiento.

e = es la base del logaritmo natural ($e=2.718281828$)

Modelo Exponencial

$$y = Be^{-Cx}$$

Donde:

y = variable de respuesta

x = variable independiente

B = parámetro asociado a la ordenada de origen

C = parámetro relacionado con la velocidad de crecimiento

e = es la base del logaritmo natural ($e=2.718281828$)

5.3 Variables Evaluadas

5.3.1 Crecimiento

Para la evaluación del crecimiento de las plantas de caoba se registró la altura, midiendo desde el cuello de la planta hasta el ápice, mientras que el diámetro del tallo se midió con un vernier en el cuello de la planta (al ras del suelo), esta

medición se realizó cada dos semanas después de haber instalado el experimento.

Al término del experimento (cinco meses) se cuantificó la biomasa aérea y radical, seccionando la planta en raíz, tallo y hojas. Cada muestra vegetal previamente lavada con una solución de HCl al 1%, agua destilada y agua desionizada, se colocó en bolsas de papel, y se secaron en una estufa a 60°C hasta peso constante y se determinó la biomasa neta producida.

A las raíces se les determinó la densidad radical, para lo cual se empleó probetas de 1000 mL, en donde se introdujeron las raíces y se tomó la lectura del volumen desplazado.

El volumen del tallo se evaluó de acuerdo a la estimación de la productividad, mediante el cálculo de índice de biomasa, el cual se obtuvo a partir de las variables diámetro a la altura del cuello y altura total de la planta.

$$\text{Indicador de Biomasa (cm}^3\text{)} = D^2 * H$$

Donde:

D = diámetro del cuello (ras del suelo).

H = altura total de la planta.

5.3.2 Parámetros fisiológicos

5.3.2.1 Tasa de respiración y fotosíntesis. Se determinaron mediante un análisis de gases infrarrojo (IRGA), donde se seleccionó hojas jóvenes totalmente desarrolladas. Las mediciones se realizaron entre las 11:00 y 13:00 horas cuando se presentó la mayor radiación y es donde las plantas presentan mayor actividad fotosintética, las mediciones se realizaron cada dos semanas.

5.3.2.2 Concentración y acumulación de nutrientes. El análisis de las muestras vegetales se realizó en el laboratorio de Química de Suelos del Departamento de Suelos. Las muestras vegetales de hojas, tallos y raíz, fueron secadas a 60°

C hasta peso constante y posteriormente fueron molidas en malla número 60 en un molino de acero inoxidable.

El tejido vegetal se digirió mediante una mezcla diácido ($\text{HNO}_3/\text{HClO}_4$ relación 4;2). En el digerido se determinaron en el equipo de absorbancia atómica la concentración de K, Ca, Mg, Fe, Zn, Mn, Cu y P. Para el análisis de N, la muestra vegetal se trató con una mezcla de ácido sulfúrico salicílico y posteriormente evaluó en destilación por arrastre de vapor (Bremmer 1965).

5.3.3 Estructura del tallo

Para evaluar este parámetro se utilizaron rodajas del tronco de 5 cm de espesor. Se sometieron a un proceso de ablandamiento en un digestor a una presión de 10 lb/in^2 durante minuto y medio. Una vez ablandados se obtuvieron en un xilotomo cortes transversales con un espesor de 15μ (Figura 2).

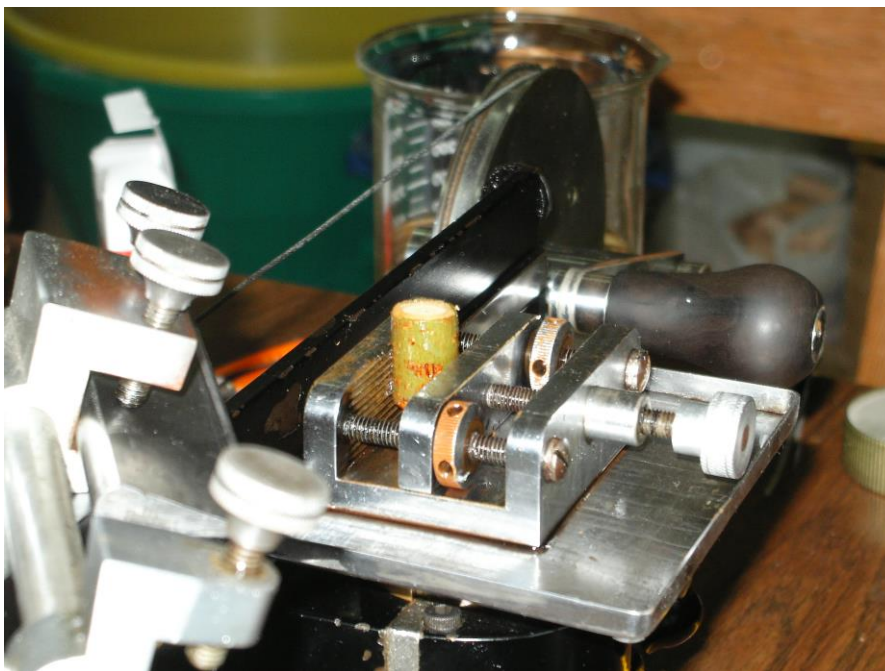


Figura 2. Xilotomo utilizado para realizar cortes histológicos a 10 y 15 micras de espesor.

Los cortes se depositaron en un frasco con agua destilada, esta se decantó y se agregó colorante (colorante que se prepara: 50% alcohol, 50% agua y 1 g de

Pardo de Bismarck por cada 100 mL) hasta cubrirlos y se dejaron reposar cinco minutos (López, 2003).

Después de la tinción se efectuó la deshidratación, para esto los cortes se pasaron por alcohol del 96 y 100%, posteriormente se lubricaron con xilol. Se colocó un corte de cada tipo de tratamiento y se fijó en el portaobjetos, se agregó una gota de Entellan a cada corte y se colocó un cubre objetos, finalmente se dejaron secar las preparaciones para pasar a realizar las observaciones de vasos y zonas de crecimiento de la madera de caoba (Figura 3) (López, 2003).



Figura 3. Cámara de flujo laminar donde se realizó el montaje de los cortes hitológicos.

Para observar las zonas de crecimiento en los cortes hitológicos de los tallos de las plantas se utilizó un microscopio de circuito cerrado (Nikon) y para las mediciones de diámetro de vasos el programa Motic (2003).

VI RESULTADOS Y DISCUSIÓN

6.1 Crecimiento

Las pruebas de significancia de diámetro basal, altura, parte aérea, raíz, biomasa total, volumen desplazado de raíz en función de los factores N, M, C y CO₂ se presentan en el Cuadro 8.

En la última medición de diámetro basal y altura sólo el factor CO₂ y la interacción de los factores nutrición mineral y micorriza fueron estadísticamente significativos ($\alpha \leq 0.01$ y $\alpha \leq 0.05$), sólo en la variable altura (Cuadro 8).

Cuadro 8. Pruebas de significancia de cuadrados medios de cuatro factores [(nutrición mineral (N), micorrizas (M), composta (C) y dióxido de carbono (CO₂)] y sus interacciones en cinco variables de plantas de caoba.

Fuentes de Variación	Diámetro basal (cm)	Altura (cm)	Parte aérea (g)	Raíz (g)	Biomasa Total (g)	Volumen desplazado de raíz (ml)
CO ₂	0.035	1056.25**	1066.75	13.533	839.98	76.562
C	0.001	2.25	363.90	1.473	411.684	351.562
C*CO ₂	0.012	0.25	174.405	3.208	130.302	76.562
M	0.001	81.00	67.630	4.922	36.060	76.562
M* CO ₂	0.012	49.00	503.385	0.670	540.795	76.562
M* C	0.018	121.00	86.327	0.0004	86.722	39.062
M*C*CO ₂	0.035	182.25	758.382	23.124	502.992	189.062
N	0.035	9.00	9901.49**	4.075	10307.325**	1.562
N*CO ₂	0.026	289.00	3693.144**	82.969**	4883.214**	451.562
N*C	0.012	12.25	462.518	4.911	562.75	451.565
N*C*CO ₂	0.001	49.00	111.540	2.877	150.246	1.562
N*M	0.001	552.25*	284.301	43.411*	105.524	1.562
N*M*CO ₂	0.026	256.00	797.709	30.955	1142.947	1.562
N*M*C	0.007	12.25	1685.205	11.585	1976.247	14.062
N*M*C*CO ₂	00001	90.25	393.080	4.978	309.584	264.062
Error	0.066	6332.00	25215.45	432.630	28796.522	6875
Coeficiente de Variación	7.92	11.572	23.56	17.42	21.293	20.75
Media	1.482	99.250	97.25	17.23	114.487	57.656

* $\alpha \leq 0.05$, ** $\alpha \leq 0.01$

En este estudio se encontró que el CO₂ fue un factor importante en el incremento en altura de las plantas de caoba. En promedio, la fertilización con

CO₂ incrementó en un 30% la altura de las plantas con respecto a los tratamiento sin CO₂ (Cuadro 9).

Cuadro 9. Efectos principales en las variables diámetro basal, altura, parte aérea, raíz y biomasa total (Cuadro 8).

Tratamientos		Diámetro basal (cm)	Altura (cm)	Parte aérea (g)	Raíz (g)	Biomasa Total (g)
N	Con	1.506 ^a	99.62 ^a	109.69 ^a	17.48 ^a	127.18 ^a
	Sin	1.459 ^a	98.87 ^a	84.82 ^b	16.97 ^a	101.79 ^b
M	Con	1.478 ^a	98.12 ^a	98.28 ^a	16.95 ^a	115.24 ^a
	Sin	1.487 ^a	100.37 ^a	96.23 ^a	17.50 ^a	113.73 ^a
C	Con	1.48 ^a	99.06 ^a	99.64 ^a	17.38 ^a	117.02 ^a
	Sin	1.47 ^a	99.43 ^a	94.87 ^a	17.07 ^a	11.95 ^a
CO ₂	Con	1.50 ^a	103.31 ^a	101.34 ^a	16.77 ^a	118.13 ^a
	Sin	1.45 ^a	98.18 ^b	93.17 ^a	17.69 ^a	110.86 ^a
CV		7.92	11.572	23.56	17.42	21.293

$\alpha \leq 0.05$

Letras similares en sentido vertical no difieren estadísticamente.

Landis (1992) observó que también hay efectos benéficos del CO₂ en el crecimiento de plantas de pino en vivero. Con respecto a la interacción entre nutrición mineral y micorriza (Figura 4), si bien resultó estadísticamente significativa, las medias de las alturas obtenidas con y sin micorriza tanto en ausencia como en presencia de nutrición mineral no difieren estadísticamente (DMSH, $\alpha \leq 0.05$), no obstante que se invirtió el orden de superioridad de las medias.

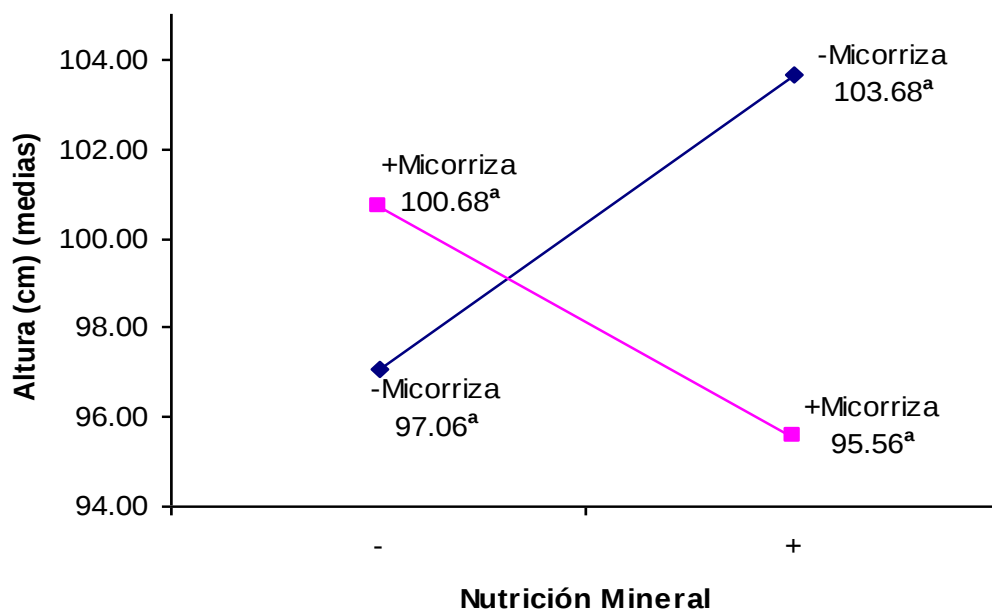


Figura 4. Interacción N*M. Las medias de los niveles de micorriza (M) con una misma letra en sentido vertical no difieren estadísticamente (DMSH, $\alpha \leq 0.05$).

Al no presentar diferencia estadística (DMSH, $\alpha \leq 0.05$), este resultado posiblemente se debió a que la micorriza fue afectada por la fertilización ya que algunas especies de hongos micorrízicos responden de manera distinta a la fertilización, algunos hongos se adaptan (*Laccaria laccata* y *Rhizopogon vinicolor*) y otros reducen la formación ectomicorrízica (*Pisolithus tinctorius*) (Landis et. al., 1989).

El factor N y la combinación N y CO₂ influyó en el peso seco aéreo y total de las plantas de caoba, en tanto que el peso seco de raíz fue afectado por la aplicación N con CO₂ y N con M (Cuadro 8) En promedio, la adición de nutrientes (N) incrementó el peso seco aéreo en 23% y la biomasa total en 15% con respecto al los tratamiento sin N (Cuadro 9). Esto indica que es posible mejorar las condiciones de desarrollo de las plantas en la fase de vivero para garantizar su sobrevivencia en el campo (Román et. al., 2001).

El efecto en la adición de N y CO₂ en las variables de respuesta parte aérea, raíz y biomasa total se observa en la Figura 5. La figura muestra que una nutrición balanceada (+N) en la fase de vivero y fertilización con CO₂ (+CO₂), favorece el desarrollo aéreo, radical y en consecuencia la biomasa total, esto

posiblemente se debe a que una buena nutrición fomenta una buena asimilación de nutrientes (Landis, 1989) y al combinarse con el CO₂ incrementa la fotosíntesis de las plantas dando como consecuencia una mayor acumulación de biomasa (Landis *et al.*, 1992; Román *et al.*, 2001; Sánchez *et al.*, 2000).

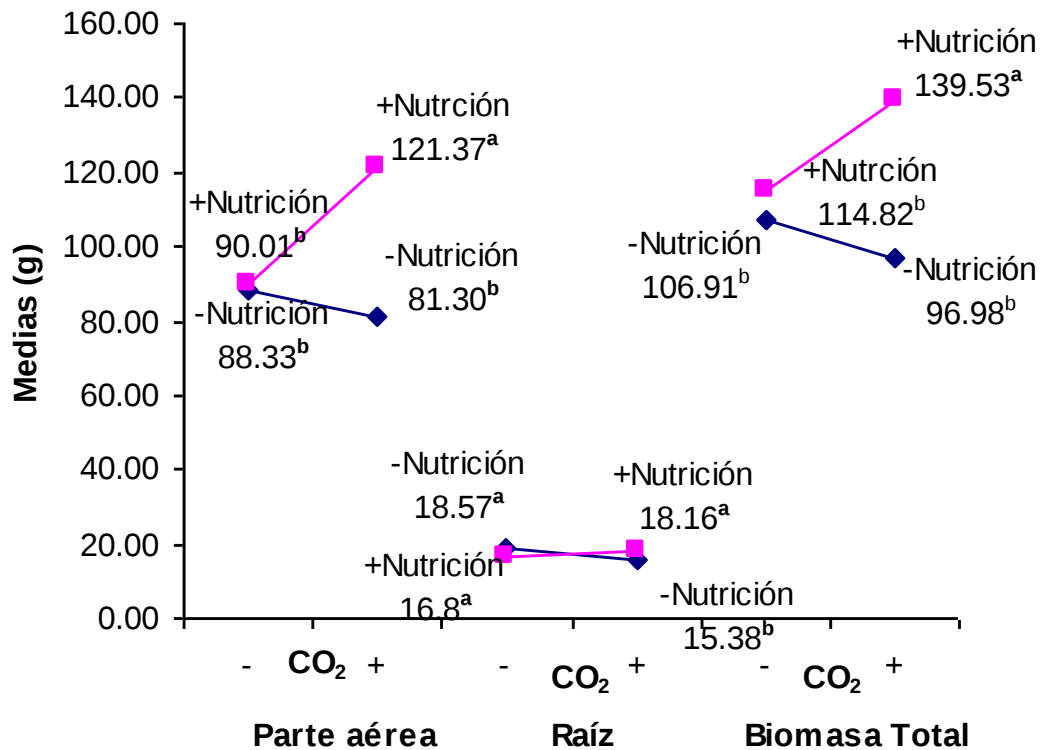


Figura 5. Interacción N*CO₂. Las medias de los niveles de nutrición mineral con una misma letra en sentido vertical no difieren estadísticamente (DMSH, $\alpha \leq 0.05$).

El efecto de las combinaciones de los niveles de nutrición mineral con los de micorrizas en la variable raíz se presenta en la Figura 6. La interacción de nutrición mineral y micorrizas (N*M) fue estadísticamente significativa ($\alpha \leq 0.05$) para la raíz de la planta (Cuadro 8). Pero la DMSH ($\alpha \leq 0.05$) no detectó diferencias entre las medias obtenidas con y sin aplicación de micorrizas, tanto cuando se aplicó nutrición mineral como cuando no se aplicó. La respuesta de esta combinación N y M se podría explicar a que las plantas responden a la formación de micorrizas más fuertemente en suelos de baja fertilidad, además que depende del tipo y la forma de fertilizante que se empleó, posiblemente

inhibieron la actividad micorrízica (Landis et. al. 1989) sin diferenciar un crecimiento de raíz entre las interacciones.

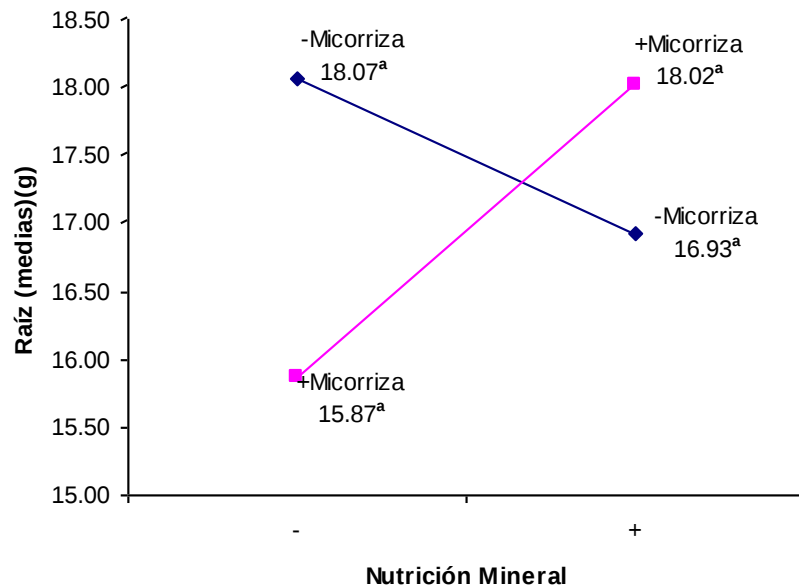


Figura 6. Interacción N*M. Las medias de los niveles de micorriza con una misma letra en sentido vertical no difieren estadísticamente (DMSH, $\alpha \leq 0.05$).

El análisis de varianza del volumen desplazado de raíz se muestra que no existe significancia estadística entre los factores estudiados y en sus interacciones (Cuadro 8).

6.2 Estimación del crecimiento en cinco meses por efecto de los tratamientos en plantas de caoba

El comportamiento de la altura a través del tiempo como respuesta a la aplicación de composta (C), dióxido de carbono (CO₂), nutrición mineral (N) y micorriza (M) se muestran en la Figura 7.

Las aplicaciones que produjeron mejor respuesta en la altura fueron: N que incrementó en un 60% con respecto al testigo, debido a que los iones de los nutrientes minerales que se adicionaron fueron absorbidos directamente y eficientemente del suelo por medio de las raíces (Landis, 1989), y el CO₂ que incrementó en un 62% con respecto al testigo, validando investigaciones realizadas por Landis et. al. (1992) en brinzales donde el CO₂ ejerció un efecto

importante en la actividad fotosintética de la planta generando resultados benéficos en el crecimiento en altura.

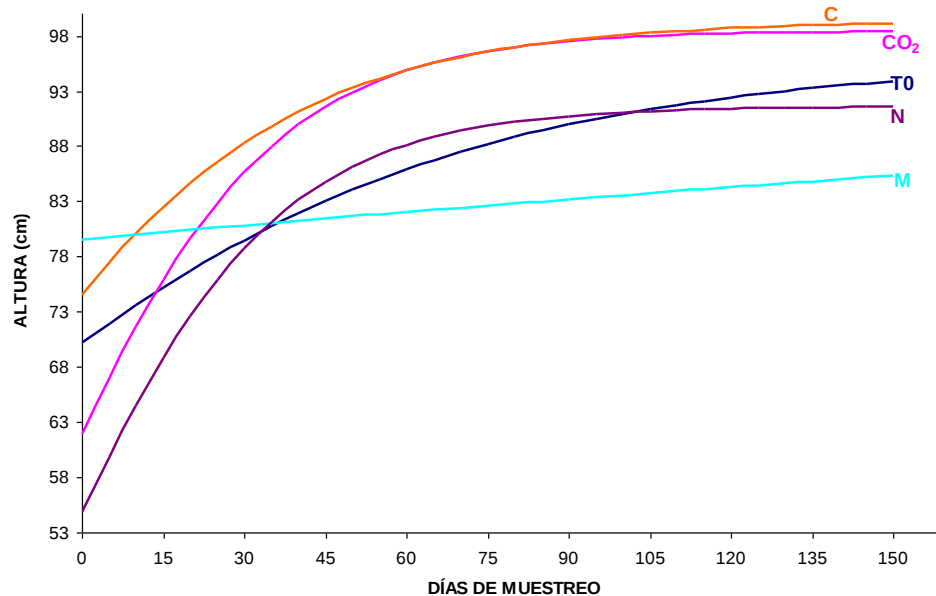


Figura 7. Regresión logística de altura obtenida por la aplicación de micorriza (M), nutrición mineral (N), dióxido de carbono (CO₂), composta (C) y el testigo.

En la Figura 8 se muestra la respuesta a las aplicaciones de varias combinaciones de N, M, C y CO₂ en la variable altura. Los mejores resultados se obtuvieron con la aplicación de nutrición mineral y CO₂ (N*CO₂), con un crecimiento del 60 % en cinco meses de estudio. Esto posiblemente se debe a que el CO₂ incrementa la actividad fotosintética de la planta y crea una demanda de absorción de nutrientes minerales (Landis *et. al.*, 1992); de hecho todas las aplicaciones que incluyeron CO₂ produjeron mayor altura.

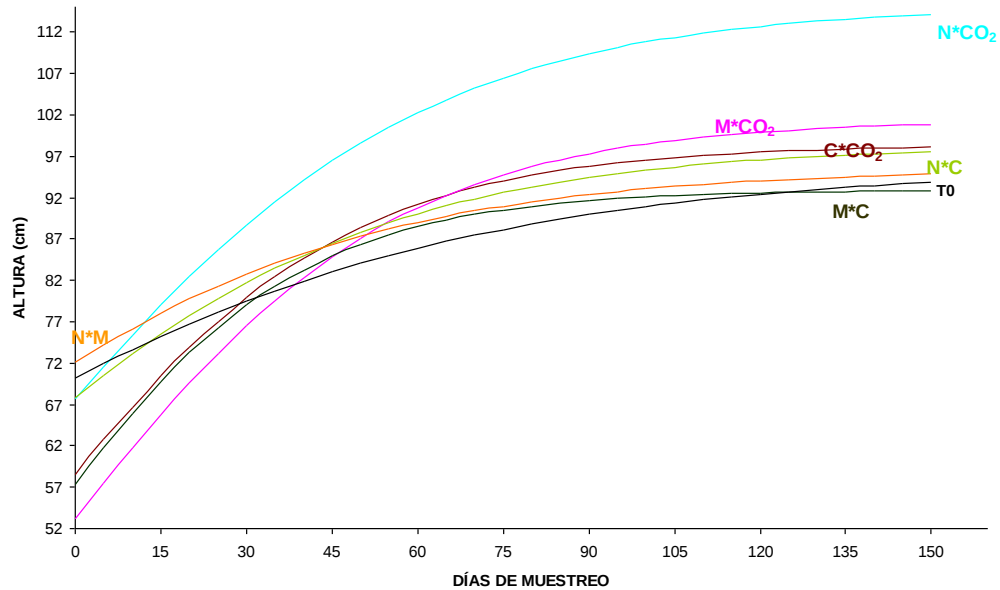


Figura 8. Regresión logística del crecimiento en altura para: 1) aplicación de nutrición mineral y micorriza (N*M), 2) nutrición mineral y composta (N*C), 3) micorriza y composta (M*C), 4) micorriza y dióxido de carbono (M* CO₂), 5) composta y dióxido de carbono (C* CO₂), 6) nutrición mineral y dióxido de carbono (N* CO₂) y 7) sin ninguna aplicación (T0).

Este resultado no coincidió con el análisis de varianza, debido a que esta observación se realizó con los últimos datos tomados en el muestreo. Por esta razón se realizó regresiones de las interacciones N*M y N*CO₂ que fueron significativos en el análisis de varianza (Figuras 9 y 10).

En donde mostró que la interacción N*M no tiene diferencias significativas, es por esta razón que cuando se realizó la prueba de DMSH las agrupó en uno solo, caso contrario el crecimiento en altura con el tratamiento N*CO₂ que obtuvo un 60% de incremento en altura en cinco meses de estudio.

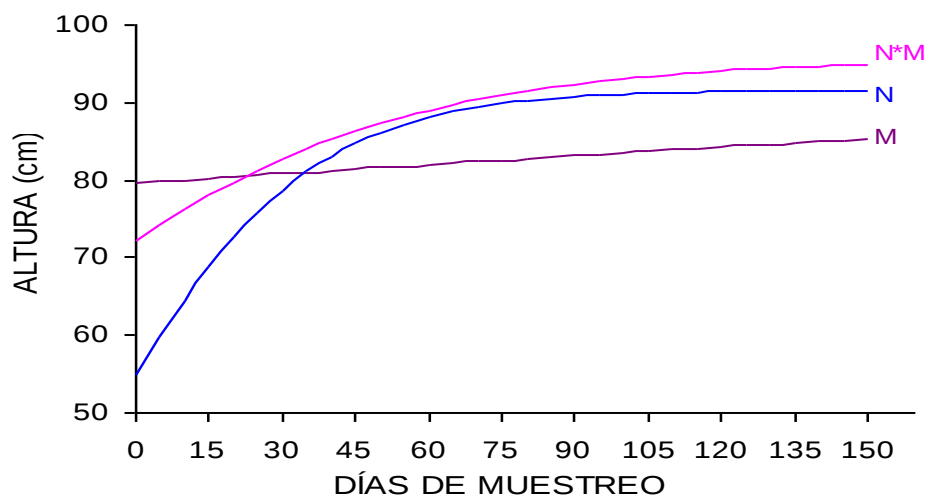


Figura 9. Regresión logística del crecimiento en altura producida por la aplicación de nutrición mineral (N), micorriza (M) y con ambas aplicaciones (N*M).

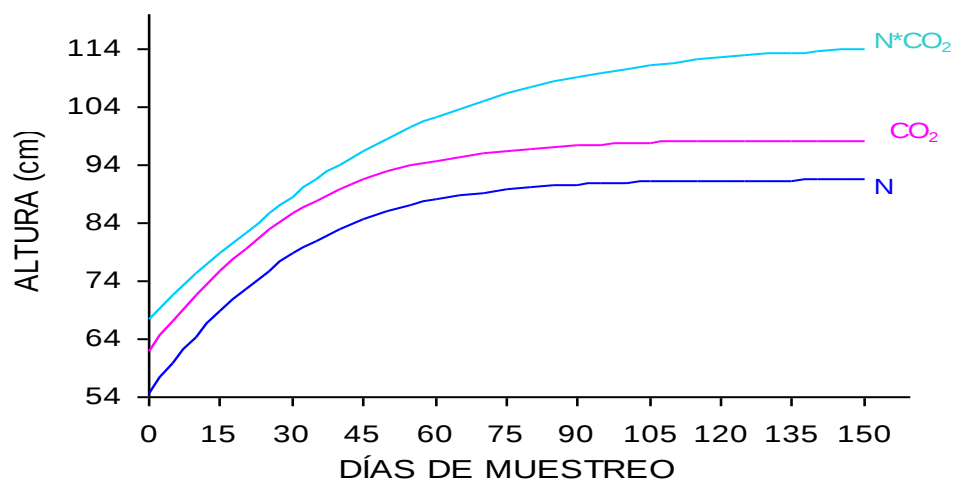


Figura 10. Regresión logística del crecimiento en altura producida por la aplicación de nutrición mineral (N), dióxido de carbono (CO₂) y con ambas aplicaciones (N* CO₂).

Las regresiones que se observan en las figuras 11 y 12 analizan el comportamiento de los factores comparado con el testigo y las combinaciones de dos niveles, en respuesta a la variable diámetro.

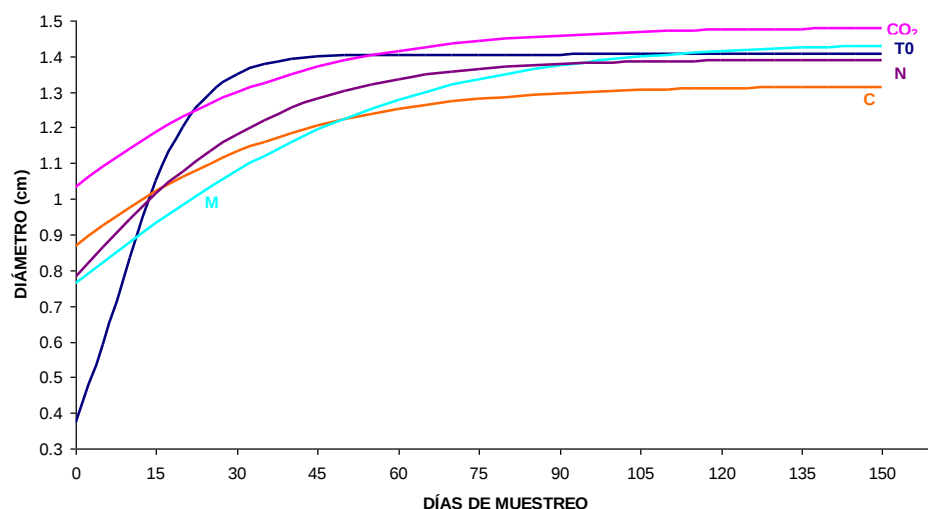


Figura 11. Regresión logística del crecimiento en diámetro obtenida por la aplicación de micorriza (M), nutrición mineral (N), dióxido de carbono (CO_2), composta (C) y el testigo.

Al analizar el comportamiento de los factores y sus interacciones entre si, demuestran que no existen diferencias entre factor ni sus combinaciones, el aumento de diámetro fue estadísticamente similar. Aunque al observar las Figuras 11 y 12, muestra que el factor CO_2 y todas las interacciones que lo contengan tuvieron diámetros de tallos mayores, al igual que estudios realizados por Landis *et. al.* (1992) en brinzales de pino, donde al adicionar CO_2 fomentó una mayor actividad fotosintética y una mayor absorción de nutrientes infiriendo sus resultados en mayores diámetros.

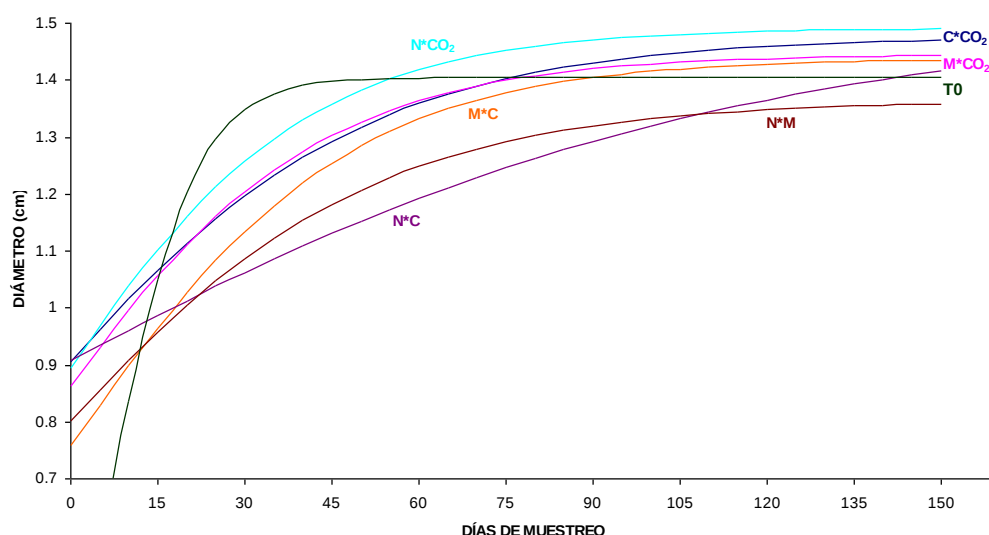


Figura 12. Regresión logística del crecimiento en diámetro para: 1) aplicación de nutrición mineral y micorriza (N^*M), 2) nutrición mineral y composta, 3) micorriza y composta (M^*C), 4) micorriza y dióxido de carbono (M^*CO_2), 5) composta y dióxido de carbono (C^*CO_2), 6) nutrición mineral y dióxido de carbono (N^*CO_2) y 7) sin ninguna aplicación T0.

El análisis de regresión del crecimiento en volumen de los factores y sus interacciones entre si, se muestran en la Figura 13 y 14.

Al analizar el resultado obtenido en las regresiones de los factores comparando con el testigo (Figura 13), se observó que todos los factores obtuvieron un resultado positivo en el crecimiento en volumen, esto se debe a que todos aportaron o acumularon nutrimentos en los tejidos en comparación al testigo.

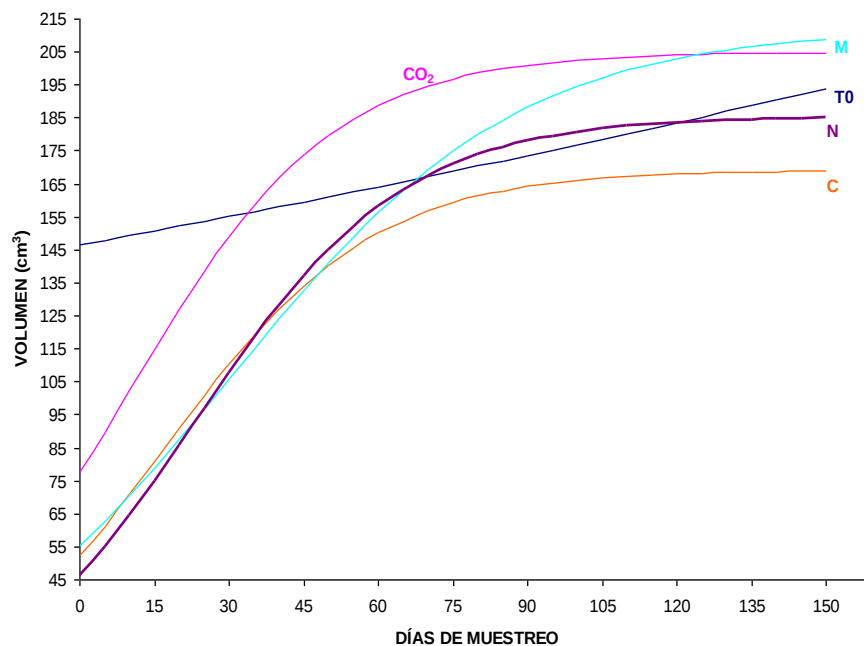


Figura 13. Regresión logística del crecimiento en volumen obtenida por la aplicación de micorriza (M), nutrición mineral (N), dióxido de carbono (CO₂), composta (C) y el testigo.

En el análisis de las regresiones que se obtuvieron en las interacciones de los factores demuestra que todas las combinaciones con el factor CO₂ fueron mejores que las que no, siendo la mayor N*CO₂, seguidas de C*CO₂ y M*CO₂ (Figura 14). Demostrando que el CO₂ estimula la acumulación de biomasa en las plantas (Sánchez et al., 2000; Landis et. al., 1992).

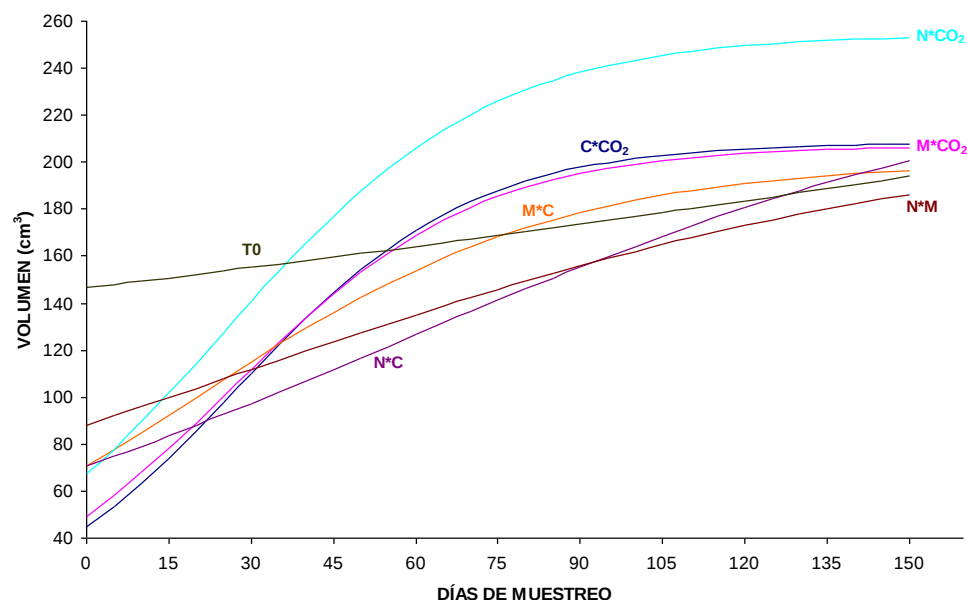


Figura 14. Regresión logística del crecimiento en volumen para: 1) aplicación de nutrición mineral y micorriza (N*M), 2) nutrición mineral y composta, 3) micorriza y composta (M*C), 4) micorriza y dióxido de carbono (M* CO₂), 5) composta y dióxido de carbono (C* CO₂), 6) nutrición mineral y dióxido de carbono (N* CO₂) y 7) sin ninguna aplicación (T0).

En la Figura 15, se muestran las regresiones de las interacciones de N*CO₂, en donde la combinación de N con CO₂ fue el mejor tratamiento en acumulación de biomasa, reforzando lo que se obtuvo en el análisis de varianza en biomasa total (Cuadro 8), mostrando que la combinación de CO₂ y nutrición mineral fomentan una mayor absorción de nutrientes y una mayor acumulación de biomasa en la planta (Landis *et. al.*, 1992).

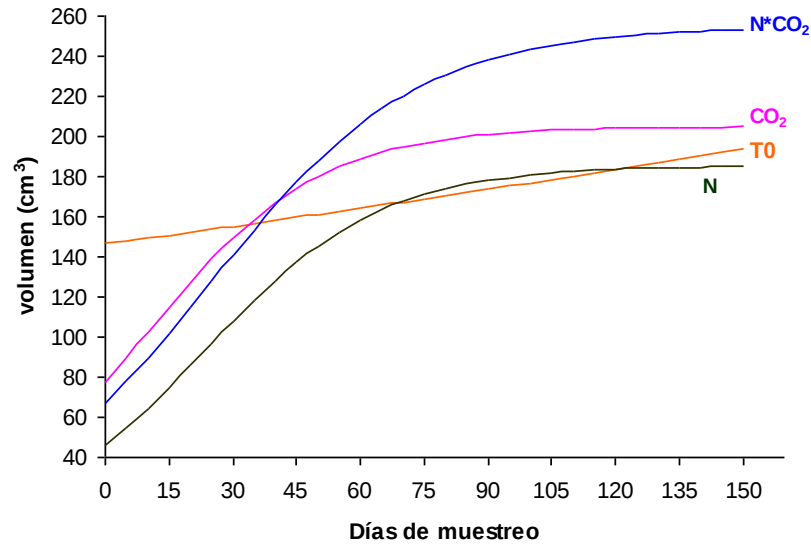


Figura 15. Regresión logística del crecimiento en volumen producida por la aplicación de nutrición mineral (N), dióxido de carbono (CO₂), sin aplicación (T0) y con ambas aplicaciones (N*CO₂).

6.3 Parámetros fisiológicos

6.3.1 Tasa de fotosíntesis

En la Figura 16, se observa la regresión exponencial de la curva de fotosíntesis de plántulas de caoba con base a los cuatro factores comparándolos con el testigo. Al analizar la curva se puede evidenciar que no existieron diferencias significativas en el comportamiento de los factores y el testigo.

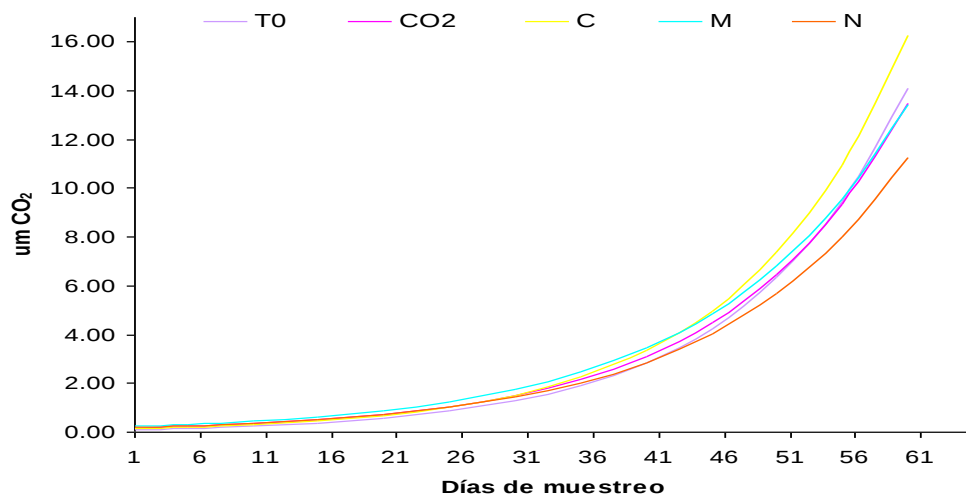


Figura 16. Regresión exponencial de fotosíntesis obtenida por la aplicación de micorriza (M), nutrición mineral (N), dióxido de carbono (CO₂), composta (C) y el testigo.

Se comparó el comportamiento en una curva exponencial de las interacciones de los cuatro factores y el testigo (Figura 17). En donde, existió el mismo comportamiento que la curva anterior, todos los tratamientos tuvieron el mismo comportamiento en su actividad fotosintética.

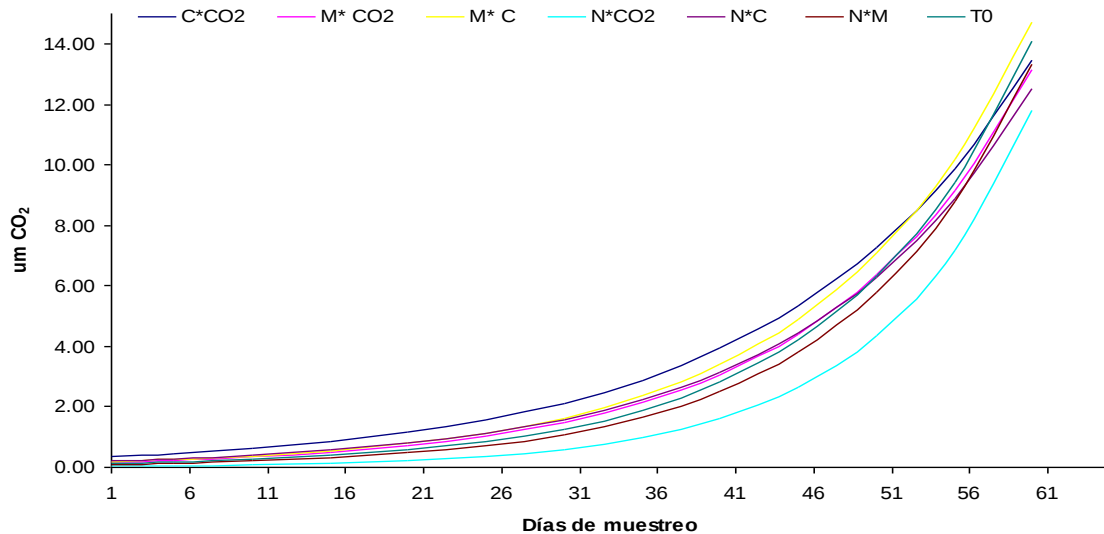


Figura 17. Regresión exponencial de fotosíntesis para: 1) aplicación de nutrición mineral y micorriza (N*M), 2) nutrición mineral y composta, 3) micorriza y composta (M*C), 4) micorriza y dióxido de carbono (M* CO₂), 5) composta y dióxido de carbono (C* CO₂), 6) nutrición mineral y dióxido de carbono (N* CO₂) y 7) sin ninguna aplicación (T0).

En las gráficas se comparó la mejor interacción N*CO₂ con base a los análisis de varianza de altura, volumen y contenido nutrimental. En la Figura 18, se muestra el comportamiento exponencial de la fotosíntesis con base a la interacción N*CO₂ comparada con el testigo.

Al comparar las curvas se observó igualmente que no existió ninguna diferencia en la actividad fotosintética a pesar de ser un buen tratamiento en cuanto a crecimiento y acumulación de nutrientes.

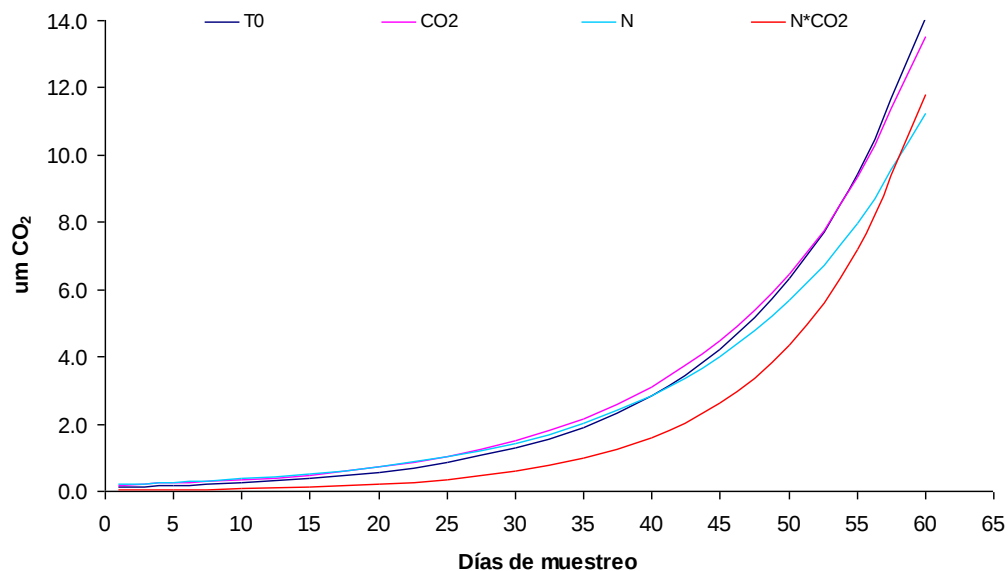


Figura 18. Regresión exponencial de fotosíntesis producida por la aplicación de nutrición mineral (N), dióxido de carbono (CO₂), sin aplicación (T0) y con ambas aplicaciones (N*CO₂).

6.3.2 Acumulación de nutrientes

Se realizaron pruebas de significancia contenidos nutrimentales de los factores nutrición mineral, micorrizas, composta y dióxido de carbono; y de sus interacciones (Cuadro 10).

Cuadro10. Pruebas de significancia de cuadrados medios de cuatro factores [(nutrición mineral (N), micorrizas (M), composta (C) y dióxido de carbono (CO₂)] para varios macro y micronutrientes en plántulas de caoba.

Fuentes de Variación	Contenidos Nutrimentales								Concentraciones Nutrimentales							
	Macroelementos				Microelementos				Macroelementos				Microelementos			
	N	Ca	Mg	K	Mn	Cu	Fe	Zn	N	Ca	Mg	K	Mn	Cu	Fe	Zn
CO ₂	0.001	1.23	0.31**	0.38	0.6	0.07	168.2**	1.22	0.0037	42	103.8*	0.32	9.68	1.3	6336*	14.7
C	0.0001	0.44	0.18**	0.64**	10.1**	0.16*	33.3	0.73	0.0021	69.5	0.47	54.4*	763**	8.7	1187	17.9
C*CO ₂	0.0001	0.04	0.21**	0.19	0.22	0.026	9.48	0.63	0.00003	155.8	5.63	5.3	1.29	0.03	168	13.6
M	0.009	0.53	0.02	0.06	0.07	0.02	1.02	2.09*	0.0037	185.3	0.04	8.85	16.6	1.8	256	130.1**
M* CO ₂	0.0043	0.009	0.001	0.35	0.51	0.015	147.5**	0.02	0.0001	20.8	72.05	51.7*	94.3	3.5	10257**	0.08
M* C	0.0023	0.2	0.11**	0.61**	0.2	0.021	5.94	0.17	0.0102	0.32	140.9*	47.55*	17	2.4	0.18	0.007
M*C*CO ₂	0.0123	0.82	0.01	0.0004	10.9**	0.1	17.34	0.16	0.0021	149	10.57	6.21	748**	5.1	799	0.22
N	0.159**	7.72**	0.33**	23.7**	25.1**	0.51**	243.4**	5.06**	0.0092	363.1	209.4**	2448.1**	557*	12.2	1393	0.04
N*CO ₂	0.0021	2.79**	0.53**	0.38	0.31	0.003	164.9**	2.86*	0.0129	35.5	116.9*	9.91	169	5.7	1405	1.8
N*C	0.0037	0.12	0.15**	0.03	1.12	0.14	12.04	0.25	0.00003	11.6	0.69	2.97	12.2	7.4	11.2	1.88
N*C*CO ₂	0.0054	0.11	0.18**	0.103	0.78	0.17*	76.7*	0.05	0.0026	147.1	0.06	0.35	171	9.3	4315	0.21
N*M	0.0008	0.35	0.001	0.03	6.3**	0.0001	18.7	0.1	0.0047	67.2	11.7	36.49	367	0.003	548	55
N*M*CO ₂	0.022	1.28	0.014	0.007	0.87	0.03	0.31	0.44	0.005	147.2	12.64	4.49	0.02	0.8	6.66	0.007
N*M*C	0.054*	2.55**	0.13**	0.34	18.3**	0.14*	122.3*	1.55	0.014	234.6	90.4*	2	967**	6	3658	11.7
N*M*C*CO ₂	0.009	0.84	0.043	0.002	0.16	0.01	19.25	0.3	0.001	362.9	35.03	4.54	10.41	2.8	290.7	3.52
Error	0.008	21.6	0.717	5.66	74.2	1.79	886.5	24.28	0.003	4343.9	1015.2	2683.3	3878	149.5	30736	868.9
Coefficiente de Variación	29.28	32.3	52.62	31.3	43.39	53	37.27	33.66	17.34	18.1	58.42	23.62	34.59	48.27	31.88	19.72
Media	0.322	2.07	0.23	1.06	2.86	0.36	11.53	2.11	0.331	52.54	7.87	13.7	28.7	3.65	117.4	21.5

* $\alpha \leq 0.05$, ** $\alpha \leq 0.01$

6.3.2.1 Macroelementos. Al realizar el análisis contenido nutrimental de macroelementos en hojas de plantas de caoba el factor N fue estadísticamente significativo ($\alpha \leq 0.01$) en todos los nutrientes. Seguido por el factor C ($\alpha \leq 0.01$) en magnesio y potasio, CO₂ ($\alpha \leq 0.01$) en magnesio y M no mostró diferencias (Cuadro 10). Esto se debe a que los tres primeros factores favorecieron la asimilación de nutrientes para la planta (Landis et al., 1989; Román et al., 2001; Sánchez et al., 2000), en el caso de N y C los nutrientes fueron absorbidos por la planta, ya que esta fue capaz de asimilar los iones de los nutrimentos que se encontraron en el medio (Landis, 1989) y el CO₂ al incrementar la actividad fotosintética estimula a que la planta absorba los iones que requiere, mediante la energía generada (Landis, 1989), caso contrario al de la micorriza que posiblemente no se adaptó al medio.

Las interacciones significativas de dos factores en el análisis de varianza de los contenidos nutrimentales de las plantulas de caoba se muestran en las figuras 19, 20, 21 y 22.

Al analizar las combinaciones de los factores N*CO₂ y C*M mostró que afectaron la acumulación de dos nutrientes, como se observa en las figuras 19 y 20. La combinación de los factores N*CO₂, se obtuvo un mayor contenido de nutrientes al aplicar solamente N, esto se debe a que en algunos casos a altas concentraciones de CO₂ las plantas cierran los estomas y decrece la actividad fotosintética por consecuencia hay menor acumulación de biomasa en las plantas (Landis et al., 1992).

Con respecto a la aplicación de C*M, sólo en ausencia de composta la aplicación de micorriza incrementó significativamente (DMSH, $\alpha \leq 0.05$) al potasio (Figura 20), esto se debe a que la composta también es un fertilizante (Dimas, 2003) y la micorriza no se adaptó al medio (Castellano et al., 1989) es por eso que no influyó en los resultados.

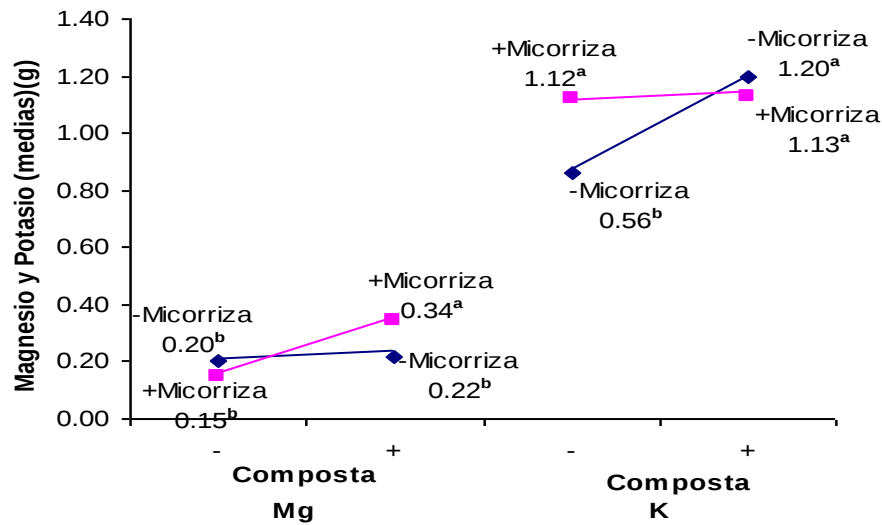


Figura 19. Interacción C*M. Las medias de los niveles de micorriza con una misma letra en sentido vertical no difieren estadísticamente (DMSH, $\alpha \leq 0.05$).

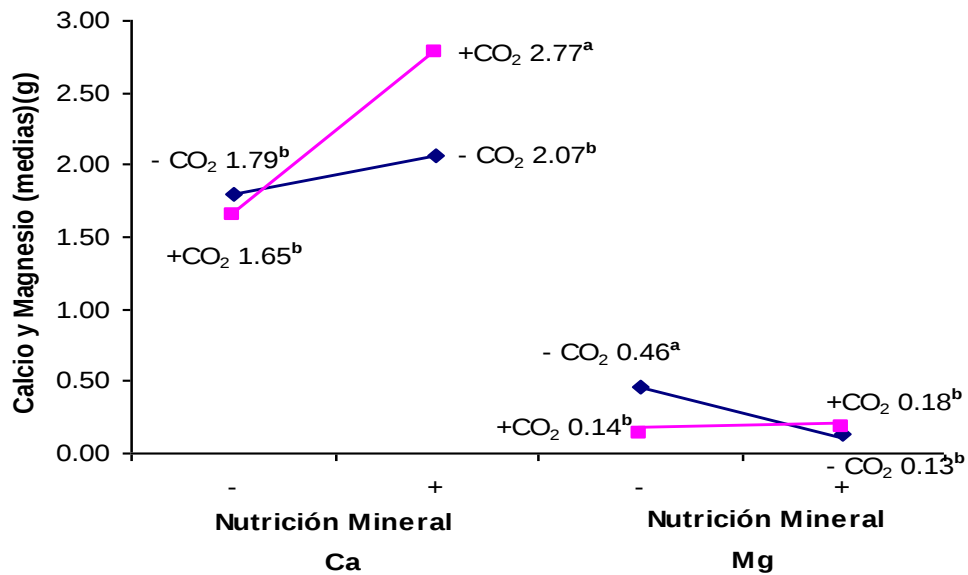


Figura 20. Interacción N*CO₂. Las medias de los niveles de CO₂ con una misma letra en sentido vertical no difieren estadísticamente (DMSH, $\alpha \leq 0.05$).

En las figuras 21 y 22, al analizar los resultados de la interacción de composta con N y composta con CO₂ en respuesta a la variable magnesio, en el primer caso N*C la acumulación de magnesio en la planta aumentó significativamente en comparación con las demás interacciones debido a que la composta es un

nutriente que mejora la estructura del suelo y ayuda la absorción de nutrientes por la planta (INFOAGRO, 2006). Caso contrario en la interacción de C*CO₂ no fue significativa, solo la aplicación de C dio efectos relevantes (Figura 22).

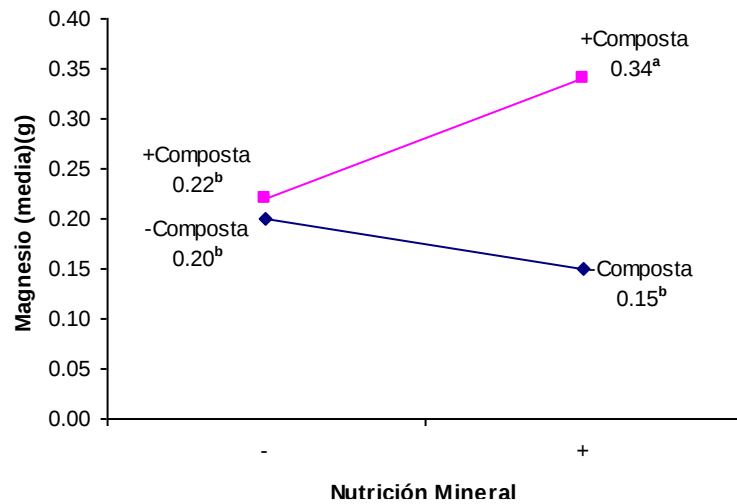


Figura 21. Interacción N*C. Las medias de los niveles de composta con una misma letra en sentido vertical no difieren estadísticamente (DMSH, $\alpha \leq 0.05$).

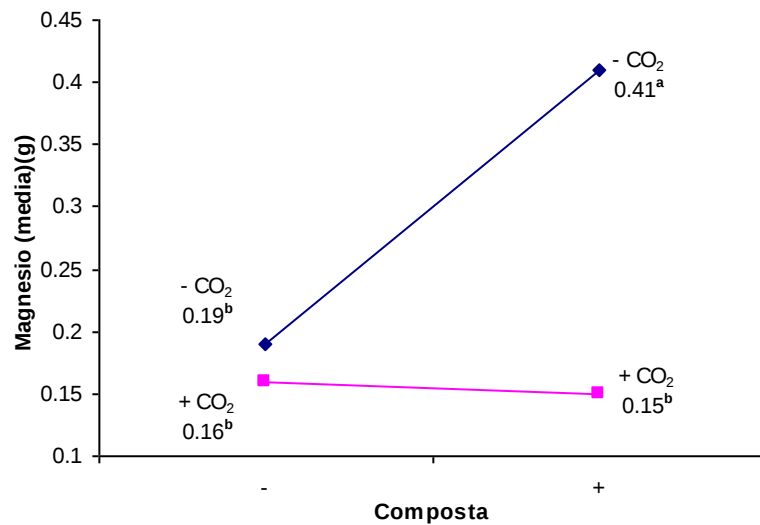


Figura 22. Interacción C*CO₂ las medias de los dos niveles de CO₂ con una misma letra en sentido vertical no difieren estadísticamente (DMSH, $\alpha \leq 0.05$).

6.3.2.2 Microelementos. En las pruebas de significancia para los microelementos contenidos en las hojas de plantas de caoba se observó; que el factor N fue significativo ($\alpha \leq 0.01$) en todos los nutrientes, seguido por C infiriendo significativamente en manganeso y cobre ($\alpha \leq 0.01$, $\alpha \leq 0.05$), en el caso de CO₂ obtuvo diferencias en hierro ($\alpha \leq 0.01$) y M en el elemento zinc ($\alpha \leq 0.05$) (Cuadro 11)

Cuadro11. Efectos principales para varios macro y micronutrientes (Cuadro 10).

Tratamientos		Contenido nutrimental								Concentración nutrimental							
		Macroelementos				Microelementos				Macroelementos				Microelementos			
		N	Ca	Mg	K	Mn	Cu	Fe	Zn	N	Ca	Mg	K	Mn	Cu	Fe	Zn
N	Con	0.37 ^a	2.42 ^a	0.15 ^b	1.70 ^a	3.49 ^a	0.45 ^a	13.4 ^a	2.39 ^a	0.34 ^a	54.9 ^a	6.0 ^b	19.9 ^a	31.6 ^a	4.0 ^a	122.0 ^a	21.5 ^a
	Sin	0.27 ^b	1.79 ^b	0.30 ^a	0.48 ^b	2.23 ^b	0.27 ^b	9.58 ^b	1.83 ^b	0.31 ^a	50.1 ^a	9.6 ^a	7.5 ^b	25.9 ^b	3.2 ^a	112.7 ^a	21.5 ^a
M	Con	0.33 ^a	2.16 ^a	0.25 ^a	1.12 ^a	2.9 ^a	0.38 ^a	11.4 ^a	2.29 ^a	0.33 ^a	54.2 ^a	7.8 ^a	14.1 ^a	29.2 ^a	3.8 ^a	115.4 ^a	22.9 ^a
	Sin	0.31 ^a	1.98 ^a	0.21 ^a	1.06 ^a	2.83 ^a	0.34 ^a	11.6 ^a	1.93 ^a	0.32 ^a	50.8 ^a	7.8 ^a	13.3 ^a	28.2 ^a	3.4 ^a	119.4 ^a	20.1 ^b
C	Con	0.32 ^a	2.15 ^a	0.28 ^a	1.19 ^a	3.26 ^a	0.41 ^a	12.2 ^a	2.22 ^a	0.33 ^a	53.5 ^a	7.7 ^a	14.6 ^a	32.3 ^a	4.02 ^a	121.7 ^a	22.1 ^a
	Sin	0.32 ^a	1.99 ^a	0.17 ^b	0.99 ^b	2.46 ^b	0.31 ^b	10.8 ^a	2.0 ^a	0.32 ^a	51.5 ^a	7.9 ^a	12.8 ^b	25.3 ^b	3.2 ^a	113.1 ^a	21.03 ^a
CO₂	Con	0.32 ^a	2.21 ^a	0.16 ^b	1.17 ^a	2.96 ^a	0.39 ^a	13.1 ^a	2.25 ^a	0.33 ^a	53.3 ^a	6.5 ^b	13.8 ^a	28.3 ^a	3.8 ^a	127.4 ^a	22.05 ^a
	Sin	0.31 ^a	1.93 ^a	0.30 ^a	1.02 ^a	2.76 ^a	0.33 ^a	9.9 ^b	1.97 ^a	0.32 ^a	51.7 ^a	9.1 ^a	13.6 ^a	29.1 ^a	3.5 ^a	107.4 ^b	21.08 ^a
CV		17.34	32.3	52.62	31.3	43.39	53	37.27	33.66	29.28	18.1	58.42	23.62	34.59	48.27	31.88	19.72

$\alpha \leq 0.05$

Letras similares en sentido vertical no difieren estadísticamente.

Las interacciones significativas en microelementos de dos factores en el analisis de varianza de los contenidos nutrimentales de las plantulas de caoba se muestran en las Figuras 23, 24 y 25.

Al analizar la combinación de N*M en relación a la variable de respuesta manganeso (Figura 23), se observa que existió una mejor acumulación del nutriente cuando únicamente se aplicó N, como ya se mencionó anteriormente esto es debido a que los fertilizantes no permitieron que los hongos micorrizicos se adaptaran al medio (Castellanos et al., 1989). En la aplicación M*CO₂, demostró que la interacción sin M y sin CO₂ es la única que no presentó efectos significativos en la acumulación de hierro (Figura 24).

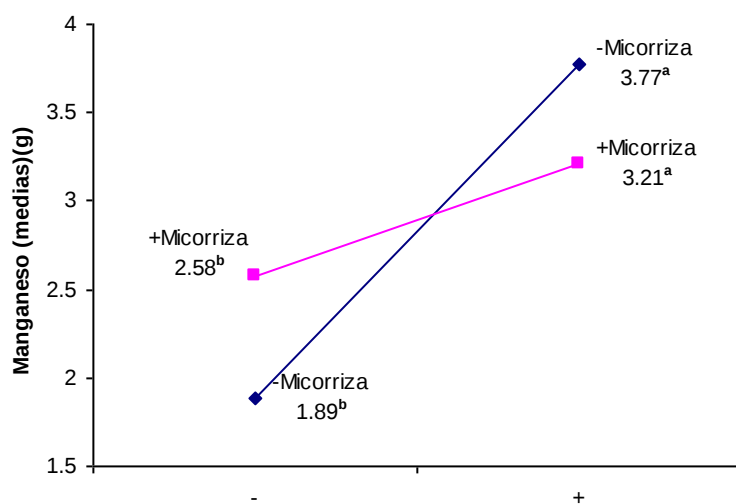


Figura 23. Interacción N*M. Las medias de los dos niveles de micorriza con una misma letra en sentido vertical no difieren estadísticamente (DMSH, $\alpha \leq 0.05$).

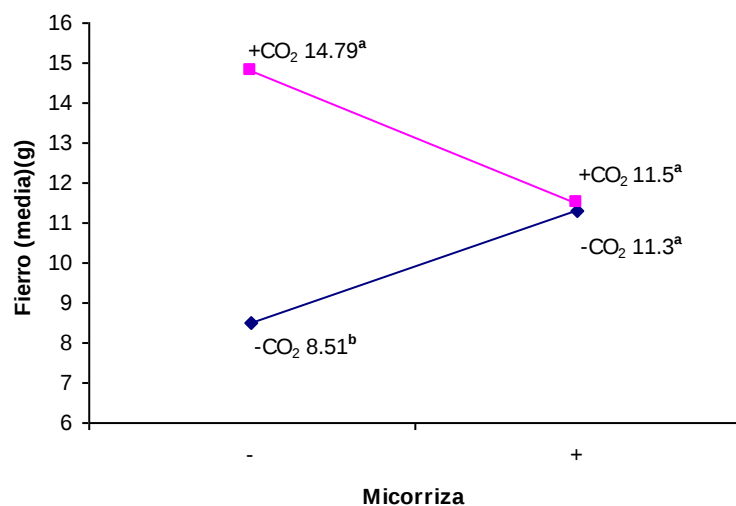


Figura 24. Interacción M*CO₂. Las medias de los dos niveles de CO₂ una misma letra en sentido vertical a no difieren estadísticamente (DMSH, $\alpha \leq 0.05$).

En el caso de la aplicación N*CO₂, esta presentó efectos significativos en la acumulación de zinc en las plantulas (Figura 25).

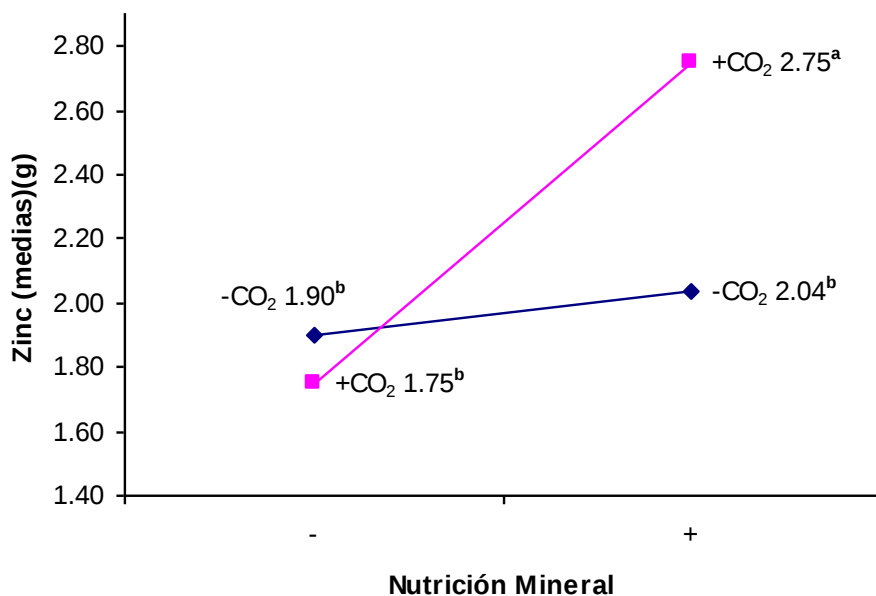


Figura 25. Interacción N*CO₂. Las medias de los dos niveles de CO₂ con una misma letra en sentido vertical no difieren estadísticamente (DMSH, $\alpha \leq 0.05$).

En el cuadro 11, se observó la significancia de los factores con sus dos niveles en contenidos nutrimentales. Al analizar el efecto de los factores con sus dos niveles en el contenido nutrimental de las hojas de plántulas de caoba demuestra en el Cuadro 10, obtuvimos que el factor N tuvo diferencias significativas en los contenidos de micro y macroelementos. En el caso de C es diferente significativamente en los elementos de magnesio, potasio, manganeso y cobre. Al aplicar CO₂ las diferencias se obtuvieron en los elementos magnesio y hierro, caso contrario para el factor M se encontró únicamente diferencia en la acumulación de zinc en las plántulas de caoba. Esto se debe a que la micorriza que se aplicó posiblemente tuvo problemas al adaptarse en el medio (Castellanos et al., 1989) y los demás factores promovieron la disposición, absorción y acumulación de nutrientes en la planta.

6.3.3 Concentración de nutrientes

Se realizaron pruebas de significancia de concentraciones nutrimentales en el tejido foliar por factor nutrición mineral, micorrizas, composta y dióxido de carbono. También fueron consideradas las interacciones a dos niveles cada uno, aplicado a plántulas de caoba, como se observa en el Cuadro 10.

Con respecto al análisis de las concentraciones nutrimentales en las hojas de plántulas de caoba se muestra que los factores; CO₂ tuvo diferencias significativas en magnesio y hierro ($\alpha \leq 0.05$). El factor C influenció en potasio y manganeso ($\alpha \leq 0.01$, $\alpha \leq 0.05$). Mientras que el factor M afectó significativamente a zinc ($\alpha \leq 0.01$) y N originó diferencias estadísticas en las variables magnesio, potasio y manganeso ($\alpha \leq 0.01$ y $\alpha \leq 0.05$).

En cuanto a las interacciones de los factores se encontraron diferencias significativas en; M*CO₂ en las variables potasio y hierro ($\alpha \leq 0.01$, $\alpha \leq 0.05$), M*C en las variables magnesio potasio ($\alpha \leq 0.05$), M*C*CO₂ en la variable manganeso ($\alpha \leq 0.01$), N*CO₂ en la variable magnesio ($\alpha \leq 0.05$) y N*M*C en las variables magnesio y manganeso ($\alpha \leq 0.01$, $\alpha \leq 0.05$) (Cuadro 10).

En la Figura 26, 27 y 28, se muestra las interacciones de dos factores significativos en el análisis de varianza aplicado a la concentración de nutrientes encontrado en plántulas de caoba.

Al analizar la acumulación del potasio en la interacción M*CO₂ se agrupó en un solo conjunto (DMSH $\alpha \leq 0.05$) demostrando que no existió diferencias significativas al aplicar M, como al aplicar CO₂ y al aplicar la combinación de los dos factores (Figura 26); y con la interacción C*M mostró ser significativamente diferente al aplicar únicamente composta. Este resultado posiblemente se debió al efecto de la composta que por ser un fertilizante orgánico (Dimas, 2003) la micorriza tiene problemas al adaptarse al medio en presencia de fertilizantes y se adaptan a suelos de baja fertilidad (Castellanos et al., 1989)(Figura 27).

Con relación a la concentración de magnesio existieron diferencias significativas en la interacción de M*C (Figura 27).

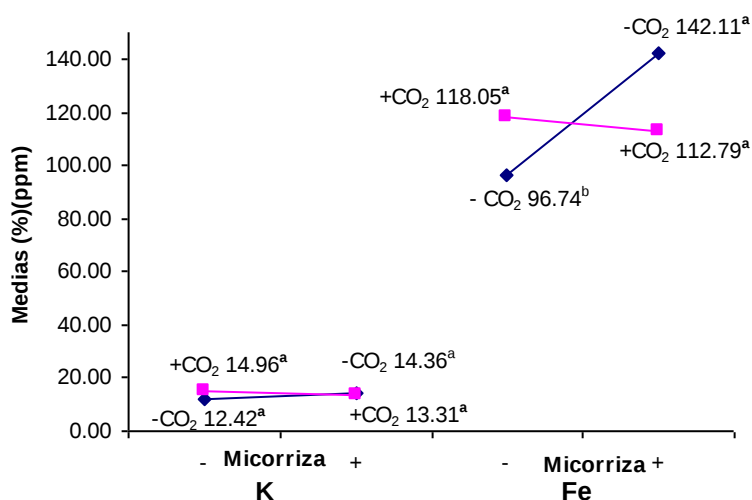


Figura 26. Interacción M*CO₂. Las medias de los niveles de CO₂ con una letra en sentido vertical no difieren estadísticamente $\alpha \leq 0.05$.

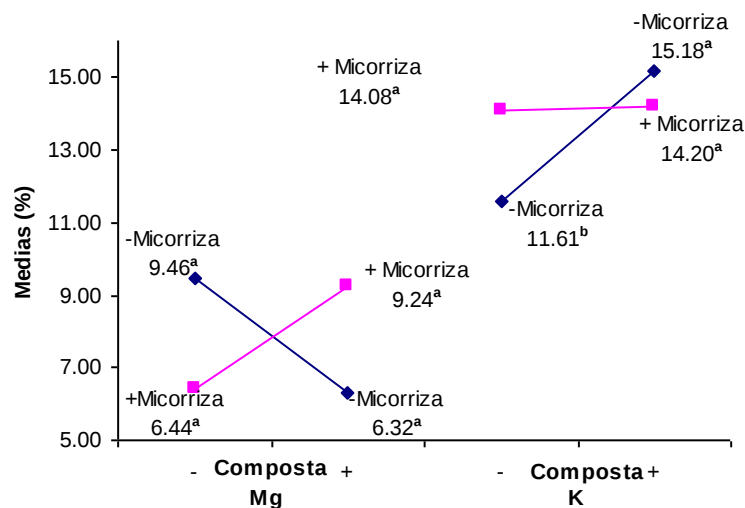


Figura 27. Interacción C*M. Las medias de los niveles de micorriza con una misma letra en sentido vertical no difieren estadísticamente $\alpha \leq 0.05$.

En la Figura 28, se observa que en la interacción de N*CO₂ no existió diferencias significativas en la concentración de magnesio en la plántula.

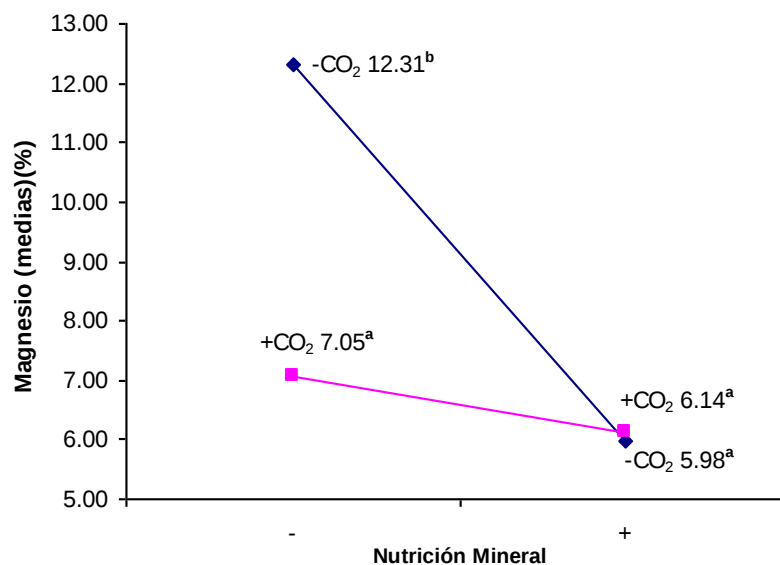


Figura 28. Interacción N*CO₂. Las medias de los niveles de CO₂ con una misma letra en sentido vertical no difieren estadísticamente (DMSH, $\alpha \leq 0.05$)

En el Cuadro 11, se observa la significancia de los factores con dos niveles en concentración nutrimental.

En la concentración de nutrientes analizados por factores de tratamiento en las hojas de plántula de caoba se presentaron diferencias significativas; en N en los elementos de magnesio, potasio y manganeso, en M únicamente en zinc, en C para los elementos de potasio y manganeso y en CO₂ para los elementos de magnesio y fierro.

6.4 Estructura del tallo

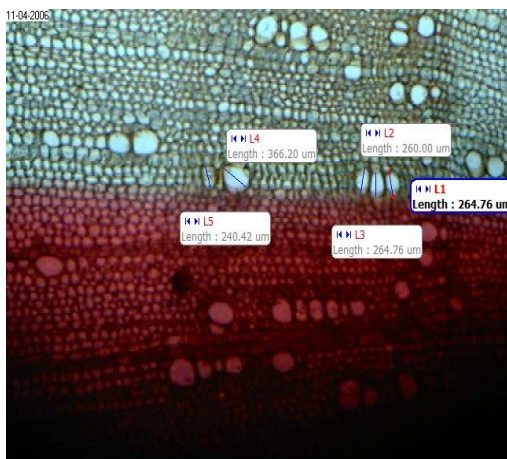
En el Cuadro 12, se muestra la significancia que existe en el número y diámetro de vasos vasculares en función de los factores N, M, C y CO₂.

El análisis no detectó diferencias significativas en ninguno de los tratamientos empleados sobre el número de vasos encontrados en las plantas de caoba, caso contrario para el diámetro de vasos donde si existieron diferencias en el factor N y en las combinaciones de los factores M*CO₂, N*CO₂ y N*M ($\alpha \leq 0.01$) (Figura 29).

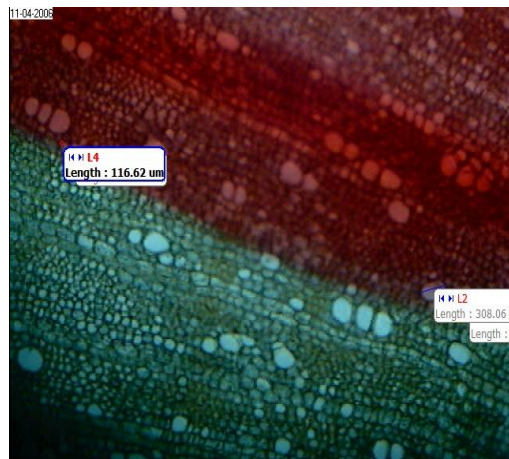
Cuadro 12. Pruebas de significancia de cuadrados medios del número y diámetro de vasos vasculares de los factores nutrición mineral (N), micorrizas (M), composta (C) y dióxido de carbono (CO₂) y sus interacciones a dos niveles cada uno, aplicado a plántulas de caoba.

Tratamientos	Número de Vasos	Diámetro de Vasos (cm)
CO ₂	2.25	422833.1
C	36	108863.5
C*CO ₂	5.06	30733.9
M	4	19556.8
M* CO ₂	52.56	1189111.3**
M* C	18.06	617386.8
M*C*CO ₂	2.25	146341.6
N	1.56	3974792.6**
N*CO ₂	0.25	1385946.4**
N*C	0	470273.3
N*C*CO ₂	7.56	567498.8
N*M	2.25	3368610.6**
N*M*CO ₂	10.56	0
N*M*C	10.56	112523.9
N*M*C*CO ₂	1	262894.3
Error	12.78	162158.5
Coficiente de Variación	45.21	25.86
Media	7.90	1556.9

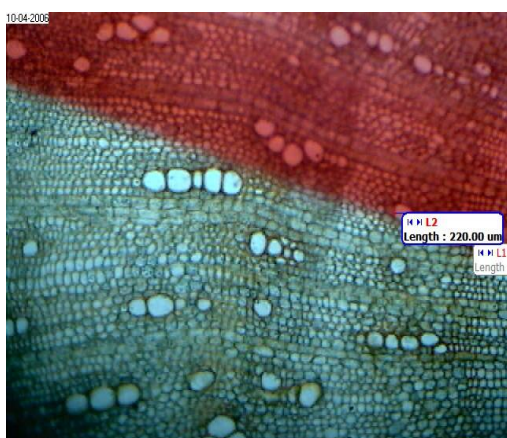
** $\alpha \leq 0.01$



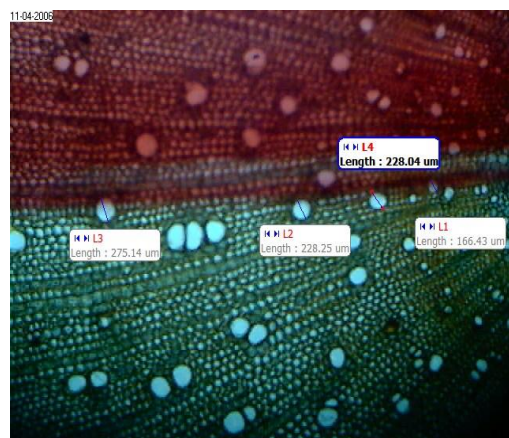
M*CO₂



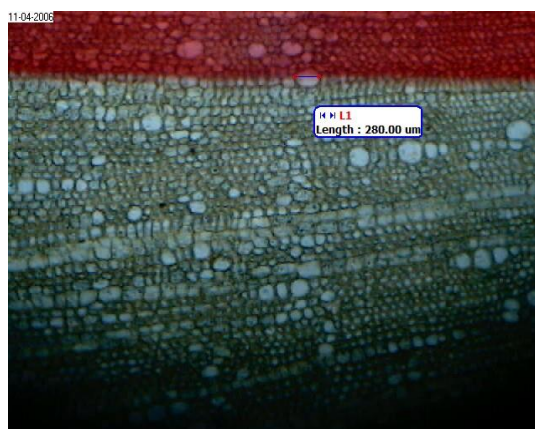
N



N*CO₂



N*M



T0

Figura 29. Diámetro de vasos vasculares de las combinaciones de los factores M*CO₂, N, N*CO₂ y N*M, comparados con el Testigo.

Al comparar las combinaciones de los factores que resultaron significativas con la prueba de DMSH, las agrupó en un solo conjunto.

La prueba de significancia del espesor de último anillo en función de los factores N, M, C y CO₂ se presentan en el Cuadro 13.

Para el espesor del último anillo sólo N es significativa ($\alpha \leq 0.05$) (Figura 30). Y va de acuerdo que con una nutrición adecuada se incrementa el contenido de biomasa en la planta (Román et al., 2001) (Cuadro 13).

Cuadro 13. Pruebas de significancia de cuadrados medios del espesor del último anillo de los factores (nutrición mineral (N), micorrizas (M), composta (C) y dióxido de carbono (CO₂) y sus interacciones a dos niveles cada uno, aplicado a plántulas de caoba.

Tratamientos	Último anillo (mm)
CO ₂	0.05
C	0.14
C*CO ₂	0.044
M	0.70
M* CO ₂	0.003
M* C	0.37
M*C*CO ₂	0.088
N	1.78*
N*CO ₂	0.032
N*C	0.56
N*C*CO ₂	0.112
N*M	0.013
N*M*CO ₂	0.36
N*M*C	0.054
N*M*C*CO ₂	0.58
Error	9.45
Coeficiente de Variación	24.02
Media	1.84

* $\alpha \leq 0.05$

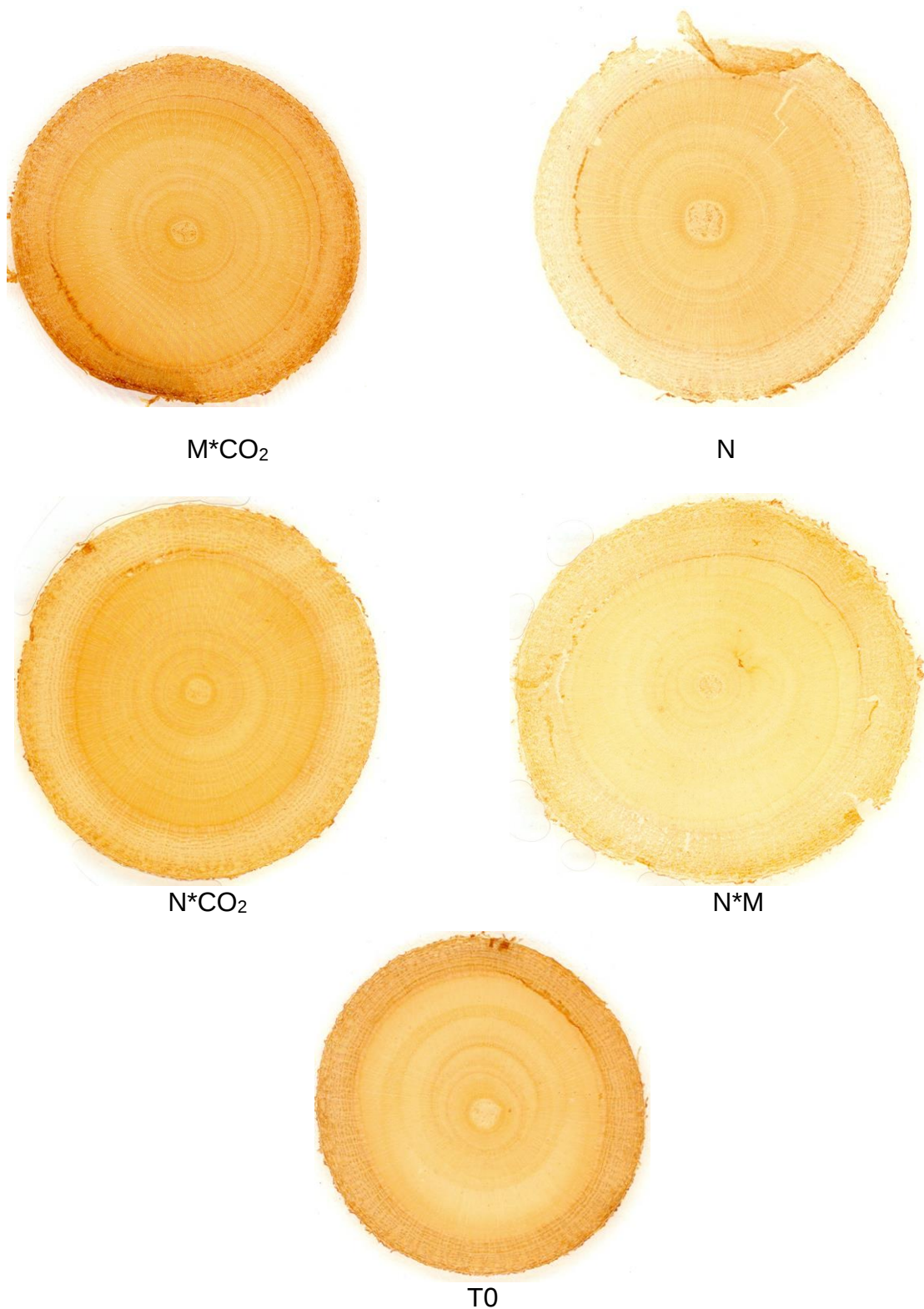


Figura 30. Diámetro del último anillo en plántulas de caoba de las combinaciones de los factores $M*CO_2$, N , $N*CO_2$ y $N*M$, comparados con el Testigo.

VII CONCLUSIONES

De los factores estudiados, la nutrición mineral, sola o en combinación con la fertilización con dióxido de carbono favoreció el crecimiento y desarrollo de las plántulas de caoba en las variables altura, producción de biomasa total, aérea y radical.

La fertilización con dióxido de carbono, así como su combinación con los factores estudiados, no afectaron significativamente la tasa de fotosíntesis de los árboles.

La nutrición mineral adecuada y en combinación con la adición de cosmposta, favorecieron las mayores concentraciones y acumulaciones de macro y micronutrientes en las plántulas de caoba.

La nutrición mineral balanceada, fue el factor significativamente más determinante en promover el crecimiento y desarrollo, acumulación de nutrientes, diámetro de vasos y espesor del último anillo en el tallo. La suma de todas estas variables son indicativas de producción plántulas vigorosas y de calidad comparadas con el manejo tradicional, con altas posibilidad de adaptarse al momento del transplante y en los primeros años de la plantación.

La adición de compostas y micorrizas, en las condiciones en que se realizó el estudio, en general, no fueron factores determinantes en el desarrollo de las plántulas de caoba, excepto cuando se combinaron con fertilizaciones de CO₂, con lo que se favorecieron cambios estructurales celulares y de tejidos en el tallo.

VIII Literatura citada

- Barrosa J. T., L. Pallares, y E. Cruz P. 1992. Producción de planta y establecimiento de plantaciones de caoba en el Estado de Tabasco. Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos. México. pp 25.
- Bremmer J. M. 1965. Total nitrogen *in* Methods of soil analysis. Black C. A. (ed.). Part 2. Agronomy G. American Society of Agronomy. Madison. Wisconsin. pp 1149-1178.
- Cano P. A., J. Vargas H., V. Gonzáles H., G. Vera C. y M. Cetina A. 1998. Caracterización morfológica de plántulas de *Pinus greggi* Engelm. en dos sistemas de producción de vivero. Ciencia Forestal en México 23: 19-27.
- Castellano M. y R. Molina. 1989. Micorrizae *in* The Container Tree Nursery Manual. Landis, T., R. Tinus, S. McDonald, J. Barrett (eds). Department of Agriculture. pp 91-149.
- Dimas J. 2003. Producción de compost *in* Abonos orgánicos y plasticultura. Salazar, E., M. Fortis, A. Vázquez, C. Vázquez (eds.). Sociedad Mexicana de la Ciencia del Suelo. pp 62-84.
- Domínguez S., G. Murrias, N. Herrero y J. Peñuelas. 2001. Cultivo de once especies mediterráneas en vivero: implicaciones prácticas *in* Revista Ecológica. pp: 213-223.
- Duryea M. L. 1985. Proceedings: evaluating quality: principles, procedures, and predictive abilities of major test *in*: Workshop held October 16-18 1984. Duryea (ed.) Forest Research Laboratory. Oregon. pp 1-4.
- Figueroa U. y A. Cueto W. 2003. Abonos orgánicos y plasticultura. Uso sustentable del suelo y abonos orgánicos *in* Sociedad Mexicana de la Ciencia del Suelo. Salazar, E., M. Fortis, A. Vázquez, C. Vázquez (comps.). México. pp 1-22.
- Home Harvest Copyright. 2006. <http://homeharvest.com/aboutus.htm>.
- INFOAGRO. 2006. <http://www.infoagro.com/abonos/compostaje.asp>.
- Jones J. B. 1983. A guide for the hydroponic and soilless culture grower. Portland, OR: Timber Press. pp 124.
- Landis T. D., 1989. Mineral nutrients and fertilization *in* The Container Tree Nursery Manual. Landis, T., R. Tinus, S. McDonald, J. Barrett (eds). Department of Agriculture. pp 1-71.

- Landis, T. D., R. Tinus, S. McDonald and J. Barnett. 1989. The Biological Component: Nursery Pest and Mycorrhizae *in* The Container Tree Nursery Manual. Landis, T., R. Tinus, S. McDonald, J. Barnett (eds). Department of Agriculture. pp 171.
- Landis T. D., R. Tinus, S. McDonald and J. Barnett. 1992. Atmospheric environment. The Container Tree Nursery Manual 3: 122-141.
- López I. 2003. Características anatómicas y propiedades físico-mecánicas de la madera de *Eucalyptus camaldulensis* Denhn. Proveniente de la plantación "Ing. Mario Ávila" en Texcoco, Estado de México. Tesis Maestría UACH. Chapingo México. pp 21-26.
- López J. 2003. Abonos Orgánicos y Plasticultura. Producción de compost *in* Sociedad Mexicana de la Ciencia del Suelo. Salazar, E., M. Fortis, A. Vázquez, C. Vázquez (comps). México. pp 62-84.
- Martínez A. 1988. Diseños experimentales: métodos y elementos de la teoría. Editorial Trillas. México. pp 755.
- Musalem M. y A Niembro. 1979. Introducción a la Reforestación *in* Apuntes de curso silvicultura III. Universidad Autónoma Chapingo. México. 249 páginas.
- Parada F. A., D. Jaén C., A. Becerril R. y E. García P. 2001. Desarrollo y calidad del portainjerto de chicozapote inoculado con *Glomus mosseae*, aspersión de AG3 y fertilización NPK al suelo y foliar. Terra 19: 133-139.
- Román A., R., J. Vargas H., G. Vaca C., A. Trinidad S. y M. Alarcón. 2001. Crecimiento de plántulas de *Pinus greggii* Engelm. en respuesta a la fertilización. Ciencia Forestal en México 26: 18-43.
- Rodríguez J. E., J. Castellanos, R. Gasga y R. Mora A. 2006. Programas de Cómputo para Estimación de Parámetros de Regresión no Lineal Útiles en el Análisis de Crecimiento de Cultivos *in* Resúmenes de la 52da Reunión Anual Sociedad Interamericana para la Horticultura Tropical. Septiembre 24-30. San Juan Puerto Rico.
- Salisbury F. and C Ross. 2000. Fisiología de las Plantas. Thomson (ed.) España. pp 305.
- Sánchez E. y A. Larqué. 2000. Respuesta de plantas de maíz y frijol al enriquecimiento de dióxido de carbono. Agrociencia 34: 311-320.

- Sánchez I. y P. Guadarrama. 2000. Influencia de la micorriza arbuscular en el crecimiento de las plántulas de la selva húmeda tropical de los Tuxtlas, Veracruz *in* Ecología, fisiología y Biotecnología de la micorriza arbuscular. Alarcón y R. Ferrera (eds.). INRENAT-Colegio de Posgraduados. Montecillo. Mundi prensa, México. pp 69-77.
- Steel R. y J. Torrie. 1988. Bioestadística principios y procedimientos. McGraw Hill. Impreso en México. México. pp 576-577.
- Thompson B. E. 1985. Proceedings: evaluating quality: principles, procedures, and predictive abilities of major test *in*: Workshop held October 16-18 1984. Duryea (ed.) Forest Research Laboratory. Oregon. pp 59-71.
- Villar P., S. Domínguez, J. Peñuelas, I. Carrasco, N. Herrero, J. Nicolás y L. Ocaña. 2000. Plantas grandes y mejor nutridas de *Pinus pinea* tienen mejor desarrollo en campo *in* Actas del 1er Simposio sobre el pino piñonero. Valladolid. 1: 219-227.

IX ANEXOS

Cuadro A1. Análisis de varianza y parámetros de regresión del modelo logístico de tratamientos de nutrición mineral (N), micorrizas (M), composta (C), dióxido de carbono (CO₂) y sus interacciones para altura de plántula de caoba (*Swietenia macrophylla*).

	T0		CO ₂		C		C*CO ₂		M		M* CO ₂		M* C		M*C*CO ₂		N	
FV	GL	CM	GL	CM	GL	CM	GL	CM	GL	CM	GL	CM	GL	CM	GL	CM	GL	CM
Regresión	3	6766.7	3	68533.4	3	70353.1	3	49603.6	3	76529.7	3	69640.6	3	54937.7	3	80781.4	3	62462.7
Error	6	2.3112	5	1.1537	5	0.4087	3	2.8322	5	0.6945	5	0.7377	4	0.6742	5	13.7363	5	5.3467
Total	9	67669.1	8	38534.6	8	70353.5	6	49606.4	8	76530.4	8	69641.3	7	54938.4	8	80795.1	8	62468.1

Cuadro A1. Continuación

	N*CO ₂		N*C		N*C*CO ₂		N*M		N*M*CO ₂		N*M*C		N*M*C*CO ₂	
	GL	CM	GL	CM	GL	CM	GL	CM	GL	CM	GL	CM	GL	CM
Regresión	3	88990.1	3	67662.6	3	75399.9	3	56584.7	3	70765.7	3	41707.3	3	63605.1
Error	5	17.6840	5	1.5149	4	2.3218	4	1.0431	5	15.2881	3	3.9315	5	11.6144
Total	8	89007.7	8	67664.1	7	75402.2	7	56585.8	8	70781.0	6	41711.2	8	63616.7

Cuadro A1. Continuación

FV	T0	CO ₂	C	C*CO ₂	M	M* CO ₂	M* C	M*C*CO ₂	N	N*CO ₂	N*C	N*C*CO ₂	N*M
r ²	0.99258	0.99735	0.99821	0.98659	0.99462	0.99854	0.99544	0.96979	0.96336	0.96817	0.99277	0.99381	0.98973
A	95.7894	98.434	99.3582	98.3741	103.5	101.4	92.9191	108.6	91.5975	115.3	98.4170	114.7	95.5909
B	0.3658	0.5907	0.3331	0.6797	0.3007	0.9050	0.6216	0.7189	0.6722	0.7045	0.4511	0.5958	0.3266
C	-0.0192	-0.0458	-0.0325	-0.0359	-0.0230	-0.0341	-0.0420	-0.0317	-0.0471	-0.0285	-0.0263	-0.0259	-0.0248

Cuadro A1. Continuación

	N*M*CO ₂	N*M*C	N*M*C*CO ₂
r ²	0.96453	0.97788	0.97487
A	108.1	101	98.8479
B	0.5756	0.5479	0.7423
C	-0.0177	-0.0146	-0.0267

Cuadro A2. Análisis de varianza y parámetros de regresión del modelo logístico de tratamientos de nutrición mineral (N), micorrizas (M), composta (C), dióxido de carbono (CO₂) y sus interacciones para diámetro de plántula de caoba (*Swietenia macrophylla*).

	T0		CO ₂		C		C*CO ₂		M		M* CO ₂		M* C		M*C*CO ₂		N	
FV	GL	CM	GL	CM	GL	CM	GL	CM	GL	CM	GL	CM	GL	CM	GL	CM	GL	CM
Regresión	3	16.7151	3	15.5072	3	12.0781	3	16.4860	3	14.7363	3	8.0780	3	15.5487	3	15.0466	3	13.447
Error	6	0.00298	5	0.00234	5	0.00066	6	0.00337	6	0.00187	2	0.00139	6	0.00627	6	0.0021	5	0.00735
Total	9	16.7181	8	15.5095	8	12.0788	9	16.4894	9	14.7381	5	8.0794	9	15.555	9	15.0488	8	13.4544

Cuadro A2. Continuación

	N*CO ₂		N*C		N*C*CO ₂		N*M		N*M*CO ₂		N*M*C		N*M*C*CO ₂	
FV	GL	CM	GL	CM	GL	CM	GL	CM	GL	CM	GL	CM	GL	CM
Regresión	3	15.3222	3	13.6024	3	16.8406	3	13.9031	3	15.2768	3	14.1230	3	9.7360
Error	5	0.00216	6	0.00508	5	0.00254	6	0.00878	5	0.00446	6	0.0132	2	0.000228
Total	8	15.3244	9	13.6075	8	16.8431	9	13.9119	8	15.2813	9	14.1363	5	9.7363

Cuadro A2. Continuación

FV	T0	CO ₂	C	C*CO ₂	M	M* CO ₂	M* C	M*C*CO ₂	N	N*CO ₂	N*C	N*C*CO ₂	N*M
r ²	0.97354	0.96820	0.99095	0.97815	0.99203	0.98228	0.97078	0.97846	0.94284	0.98347	0.96882	0.97342	0.94516
A	1.4048	1.4803	1.3170	1.4769	1.4396	1.4453	1.4382	1.3674	1.39	1.4915	1.5151	1.5348	1.3645
B	2.7636	0.4317	0.5161	0.6322	0.8850	0.6755	0.8971	0.6193	0.7798	0.6693	0.6706	0.5553	0.7043
C	-0.1404	-0.0374	-0.0383	-0.0331	-0.0324	-0.0404	-0.0403	-0.0462	-0.0494	-0.0427	-0.0151	-0.0471	-0.0337

Cuadro A2. Continuación

	N*M*CO ₂	N*M*C	N*M*C*CO ₂
r ²	0.97149	0.93336	0.99894
A	1.4804	1.3688	1.5672
B	0.8749	0.8808	1.7598
C	-0.0532	-0.0404	-0.0754

Cuadro A3. Análisis de varianza y parámetros de regresión del modelo logístico de tratamientos de nutrición mineral (N), micorrizas (M), composta (C), dióxido de carbono (CO₂) y sus interacciones para volumen de plántula de caoba (*Swietenia macrophylla*).

	T0		CO ₂		C		C*CO ₂		M		M* CO ₂		M* C		M*C*CO ₂		N	
FV	GL	CM	GL	CM	GL	CM	GL	CM	GL	CM	GL	CM	GL	CM	GL	CM	GL	CM
Regresión	3	241163	3	292357	3	161186	3	262831	3	242181	3	258322	3	224399	3	253476	3	216872
Error	5	79.2251	5	931.9	4	23.8462	5	202.4	5	112.6	5	68.6666	5	340.8	5	164.1	5	1265.8
Total	8	241242	8	293289	7	161210	8	263034	8	242294	8	258391	8	224718	8	253640	8	218138

Cuadro A3. Continuación

	N*CO ₂		N*C		N*C*CO ₂		N*M		N*M*CO ₂		N*M*C		N*M*C*CO ₂	
FV	GL	CM	GL	CM	GL	CM	GL	CM	GL	CM	GL	CM	GL	CM
Regresión	3	387315	3	179696	3	374468	3	181372	3	312355	3	172329	3	359076
Error	5	364.5	5	257.5	4	203.1	5	147.2	5	292.7	5	356.4	5	39.4617
Total	8	387679	8	179953	7	374671	8	181519	8	312648	8	172685	8	359116

Cuadro A3. Continuación

FV	T0	CO ₂	C	C*CO ₂	M	M* CO ₂	M* C	M*C*CO ₂	N	N*CO ₂	N*C	N*C*CO ₂	N*M
r ²	0.9291	0.73942	0.99123	0.97646	0.98783	0.99131	0.94281	0.97346	0.80901	0.96791	0.96824	0.97322	0.96527
A	1497.1	205	169.2	208.3	212.2	207	200.4	198.9	185.4	254.5	244	265.9	216.1
B	9.2156	1.6355	2.2321	3.6652	2.8207	3.193	1.8343	3.3189	3.0088	2.7852	2.452	1.9888	1.4501
C	-0.0021	-0.0492	-0.0478	-0.047	-0.0345	-0.0441	-0.0301	-0.051	-0.0476	-0.0412	-0.0162	-0.0397	-0.0147

Cuadro A3. Continuación

	N*M*CO ₂	N*M*C	N*M*C*CO ₂
r ²	0.96718	0.92536	0.99618
A	240.3	1048.8	239.9
B	1.9301	9.9468	3.6583
C	-0.0292	-0.0055	-0.0498

Cuadro A4. Análisis de varianza y parámetros de regresión del modelo exponencial de tratamientos de nutrición mineral (N), micorrizas (M), composta (C), dióxido de carbono (CO₂) y sus interacciones para fotosíntesis de plántula de caoba (*Swietenia macrophylla*).

	T0		CO ₂		C		C*CO ₂		M		M* CO ₂		M* C		M*C*CO ₂		N	
FV	GL	CM	GL	CM	GL	CM	GL	CM	GL	CM	GL	CM	GL	CM	GL	CM	GL	CM
Regresión	2	144	2	144.1	2	195.6	2	168.9	2	154.5	2	139.3	2	173.3	2	101.3	2	101.8
Error	2	1.10	2	1.39	2	2.17	2	0.50	2	0.4615	2	1.4107	2	0.5026	1	2.5537	0	1.62E-16
Total	4	145.1	4	145.5	4	197.8	4	169.4	4	155	4	140.7	4	173.8	3	103.9	2	101.8

Cuadro A4. Continuación

	N*CO ₂		N*C		N*C*CO ₂		N*M		N*M*CO ₂		N*M*C		N*M*C*CO ₂	
FV	GL	CM	GL	CM	GL	CM	GL	CM	GL	CM	GL	CM	GL	CM
Regresión	2	80.0419	2	124.4	2	71.572	2	123.7	2	3.44E-8	2	147.8	2	91.024
Error	1	2.5855	0	4.63E-16	0	5.08E-16	2	0.5841	1	98.5764	2	1.1938	1	0.1171
Total	3	82.6274	2	124.4	2	71.5720	4	124.2	3	98.5764	4	149	3	91.1411

Cuadro A4. Continuación

FV	T0	CO ₂	C	C*CO ₂	M	M* CO ₂	M* C	M*C*CO ₂	N	N*CO ₂	N*C	N*C*CO ₂	N*M
r ²	0.97792	0.97313	0.96669	0.99026	0.99091	0.96833	0.99170	0.91475	1	0.91042	1	1	0.98842
B	0.1154	0.1642	0.1423	0.3359	0.2296	0.1669	0.1823	0.0687	0.1846	0.0298	0.2006	0.6525	0.0905
C	0.0801	0.0735	0.0790	0.0615	0.0678	0.0728	0.0732	0.0864	0.0685	0.0997	0.0689	0.0418	0.0832

Cuadro A4. Continuación

	N*M*CO ₂	N*M*C	N*M*C*CO ₂
r ²	-1.91630	0.97956	0.99629
B	1.649E-6	0.0827	0.3414
C	-0.1382	0.0865	0.0561