

CENTRO AGRONÓMICO TROPICAL DE INVESTIGACIÓN Y ENSEÑANZA

PROGRAMA DE ENSEÑANZA PARA EL DESARROLLO Y LA CONSERVACIÓN

ESCUELA DE POSTGRADO

**Relación suelo-planta, factores de sitio y respuesta a la fertilización, en
plantaciones jóvenes de teca (*Tectona grandis* L. f.), en la zona Oeste,
Cuenca del canal de Panamá.**

POR

Manuel Sabino Mollinedo Garcia

Turrialba, Costa Rica

2003.

Esta tesis ha sido aceptada en su presente forma, por la Jefatura del Área de Postgrado en Ciencias Agrícolas y Recursos Naturales del CATIE y aprobada por el Comité Asesor del estudiante como requisito parcial para optar al grado de:

Magíster Scientiae

FIRMANTES:

Luis A. Ugalde Arias, Ph.D.
Profesor Consejero Principal

Alfredo Alvarado, Ph.D.
Miembro Comité Asesor

Alan González, Ph.D.
Miembro Comité Asesor

Kilmer Von Chong, Ph.D.
Miembro Comité Asesor

Glen Galloway, Ph.D.
Decano Escuela de Postgrado

Pedro Ferreira, Ph.D.
Director General del CATIE

Manuel Sabino Mollinedo García
Candidato

DEDICATORIA

A nuestro DIOS Todopoderoso:

Le daré siempre las gracias porque ha hecho posible que alcance este galardón en mi vida. Por todas y cada una de las bendiciones que me ha dado. Por la salud. Por la oportunidad de tener una maravillosa familia. Por tener una Madre ejemplar. Te alabo y exalto mi **DIOS**, gracias **Jesús**.

A mi Abuelo(+) y mi Papá(+):

Por que aunque no están físicamente, recordaré toda la vida sus sabias enseñanzas. Algún día estaremos juntos.

A mi Querida Madrecita Olga García Cárcamo:

Quien siempre ha creído en mi. Quien siempre me ha apoyado. Te quiero mucho “viejita linda”. Así como a mis hermanos, **Nancy y Luis René**, para que les sirva como ejemplo de superación, todo es posible, mediante la continua oración, confianza y esfuerzo.

A mi esposa Mónica:

Quien no escatimó esfuerzos por acompañarme desde mi segundo mes en CATIE. Quien en compañía de otras esposas, se esforzó por ganarse unos colones para contribuir con la economía familiar, a costa de vender alimentos y cuidar niños. Mi admiración por siempre

A mi hermosa gente “cobanera”; trabajadora y humilde de Guatemala

Nacidos en un rincón llamado Verapaz, rodeada de tierra con aroma a pino, entre sombras de nubes, enclavado entre templadas montañas, mi querido “Cobán”; y en lo lejos el sonido de un “Paa´banc”, cacao y puro café. Tierra del “chipi-chipi”, los tayuyos, los fríjoles, el chile “cahabonero”, el caldo de chunto y los ya internacionales “bachá´s.

AGRADECIMIENTOS

El autor desea otorgar los mas sinceros agradecimientos a las siguientes personas e instituciones:

- ?? Al CATIE, Escuela de Postgrado y autoridades en su momento. Por haberme tomado en cuenta y darme la oportunidad a través de la beca-préstamo, para iniciar mis estudios de maestría.
- ?? Al Dr. Luis A. Ugalde Arias, Profesor Consejero y Asesor Principal. Por su invaluable apoyo, consejos y enseñanzas, desde mi segundo día en CATIE. DIOS me lo bendiga siempre, a su familia y su trabajo.
- ?? Al Dr. Alfredo Alvarado. Miembro Comité Consejero. Por sus acertados consejos y apoyo en todo tiempo.
- ?? Al Dr. Alan Gonzáles y Dr. Kilmer Von Chong. Miembro Comité Consejero. Por su apoyo incondicional.
- ?? A mi primo, Sammy López. Quien apoyó mis primeros esfuerzos para que fuese posible mi venida a CATIE.
- ?? A los Técnicos de la Región II del INAB (Alta y Baja Verapaz). Por cuya amistad llegué a tener un conocimiento más real del campo forestal y de paso, llegar a ser muy buenos amigos.
- ?? A la fundación AVINA, quienes me dieron la oportunidad por medio de una beca de investigación, y hacerme de recursos para hacer mi trabajo de tesis.
- ?? Al personal de Ecoforest (Panamá), S.A., quienes me brindaron todo el apoyo necesario para llevar a cabo la fase de campo
- ?? Al personal destinado a la investigación de Ecoforest(Panamá), S.A, en especial a los hermanos: Nico y José. Porque con su humildad y entrega al trabajo, muestran el lado más humano de gente humilde y trabajadora Panameña. A ellos mis respetos.
- ?? Al programa de becas OEA/LASPAU. Quienes en julio/2003 me notificaron que fui acreedor a una beca que cubrirá mi préstamo con CATIE. Gracias por darme la oportunidad.
- ?? A mis compañeros de promoción y compañeros de maestría 2002/2003. Fue un gusto haber estudiado y compartido con todos y cada uno de ustedes.
- ?? Al Dr. Gilberto Paez. Director Emérito del CATIE. Por mostrar siempre su lado humano ante muchas situaciones vividas.
- ?? A Gustavo López, quien siempre estuvo ahí para darnos una mano con la estadística.
- ?? A la Universidad de San Carlos de Guatemala, por haberme dado la oportunidad de recibir grandes enseñanzas.

BIOGRAFÍA

El autor nació un 6 de abril de 1967 en la ciudad de Cobán, Alta Verapaz, Guatemala. Hijo de Manuel María Mollinedo Beltetón(+) y Olga Eugenia García Cárcamo, segundo de cuatro hijos.

Inicia sus estudios parvularios en “Los Pollitos” en 1973. La educación primaria de 1974 a 1979 la hace en la escuela nacional para varones No. 1 “Victor Chavarría”. La Educación Básica de 1980 a 1982 la cursa en el Instituto Normal Mixto del Norte “Emilio Rosales Ponce”. De 1983 a 1984 hace estudios de Bachillerato en el Instituto Técnico de Bachillerato en Construcción, en Carchá, Alta Verapaz. Seguidamente ingresa en 1986 a la Universidad de San Carlos de Guatemala donde a principios de 1991 se gradúa como Técnico Universitario en Producción Agrícola. Durante este último período es galardonado por la Agencia de Desarrollo Internacional (por sus siglas en inglés USAID) para permanecer por aproximadamente un año en Iowa, USA, estudiando Tecnología de Alimentos e Inglés como segundo idioma. Nuevamente continúa sus estudios universitarios en 1991, para graduarse en septiembre de 1994 como Ingeniero Agrónomo con orientación en Cultivos No Tradicionales.

Es a partir de 1997 y luego de recibir los cursos necesarios para inscribirse ante el Instituto Nacional de Bosques (INAB), se inicia como Regente Forestal para laborar en el sector privado desempeñando actividades de asesoría forestal. Como complemento en sus actividades, a partir de febrero del 2000, laboró como Coordinador de Proyectos en la Asociación para el Desarrollo Integral Comunitario (ASODIC) de la cual fue miembro fundador. Es en este período donde nace el profundo interés en el tema forestal, coadyuvando esfuerzos para promover proyectos forestales con el uso del Programa de Incentivos Forestal (PINFOR) del INAB. De esto, a partir de 1997 al 2001, tuvo la oportunidad de apoyar los esfuerzos de propietarios privados y comunidades organizadas (Cooperativas), trabajo que lo llevaría a interesarse aún más por el tema forestal.

Por lo que en mayo de 2001 es cuando complementa los requisitos y documentación necesaria, para aplicar al Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza (CATIE) siendo admitido en julio de ese mismo año, incorporándose a la promoción 2002-2003 de la maestría en Manejo de Bosques Tropicales y Biodiversidad, con énfasis y sub-especialidad en Manejo Forestal.

Consiente que si DIOS se lo permite, desea incorporarse nuevamente al sector laboral de su país, llevando la invaluable experiencia de haber hecho su tesis en lo que perseveró durante sus dos años de estudios y, buscar vincularse a alguna universidad, de manera de poder coadyuvar en el fortalecimiento de la enseñanza en el sector forestal, siendo la investigación, un aspecto que fuertemente apoyará.

MOLLINEDO GARCIA, M.S. 2003. Relación suelo-planta, factores de sitio y respuesta a la fertilización, en plantaciones jóvenes de teca (*Tectona grandis* L. f.), en la zona oeste, Cuenca del canal de Panamá. Tesis Mag. Sc., Turrialba, Costa Rica. CATIE.

Palabras claves: *Tectona grandis*, L.f., teca, índice de sitio, crecimiento, productividad, análisis de suelo y foliar, fertilización.

RESUMEN

El estudio se realizó en un área de aproximadamente 3000 ha de teca, ubicadas en la zona Oeste del Canal de Panamá, para el cual se utilizó un diseño de muestreo estratificado factorial para el análisis del crecimiento de los árboles y por aparte la evaluación de ensayos de fertilización. Primeramente, el diseño de muestreo permitió encontrar que un 29% de las plantaciones se ubican en la clase de crecimiento bajo (2.9 a 4.3 m³/ha/año), mientras un 59% se ubican en la clase de crecimiento medio (6.3 a 8.3 m³/ha/año) y un 12% (10.3 a 13.3 m³/ha/año) en crecimiento alto. El porcentaje de saturación de acidez y del porcentaje de saturación de calcio, resultaron ser los que limitan en mayor parte, el crecimiento y productividad de la teca, contribuyendo a explicar, la condición en torno a las diferentes clases de crecimientos. Las mejores condiciones de crecimiento se dieron cuando la saturación de acidez es <8%, y cuando la saturación de calcio es >40%. En suelos con pH <5.5, esta situación es mucho más evidente. En relación al estado nutricional foliar, de los 36 sitios analizados, los contenidos de los elementos estudiados en promedio se encuentran en el rango nutricional foliar medio. Los modelos seleccionados para la estimación del índice de sitio, considerando variables de sitio y suelo, a la primera profundidad (0-20 cm), fueron: $IS_{10}=19.874-0.192*(Sat.Acidez)-0.150*(Sat.Calcio)+3.238*(Ca/Mg)$; $r^2=0.46$; y el otro, $IS_{10}=20.507-0.138*(Sat.Acidez)-0.081*(Sat.Calcio)$; $r^2=0.54$.

En relación a los ensayos de fertilización con edades hasta 42 meses se encontró que el uso de 2 kg/árbol de gallinaza produjo la mayor respuesta en las variables evaluadas, habiendo alcanzado diferencias estadísticas altamente significativas hasta un 1% ($p=0.000$) entre tratamientos, con las mayores diferencias en volumen de 8.12, 1.84 y 10.84 m³/ha, respectivamente, superando en un 68%, 84% y 93% al testigo. En otro ensayo, la aplicación de NPK10-30-10(100g)+Roca fosfórica(100g) con la mayor diferencia en volumen de 7.3 m³/ha, superó en un 60% al testigo. En otro ensayo la

aplicación de NPK10-30-10(100g)+Magnesamon(100g), con una diferencia en volumen de 24.85 m³/ha, superó en un 10% al testigo.

En tres de los cuatro ensayos de fertilización más jóvenes, medidos a los 7 meses de edad, la aplicación de NPK10-30-10(100g)+Magnesamon(100g), fue el tratamiento con el cual la teca alcanzó los mayores valores en altura total de 0.77, 2.01 y 1.90 m, superando en un 143%, 74% y 67%, respectivamente, al testigo. Únicamente en uno de estos tres ensayos, se alcanzaron diferencias significativas entre tratamientos, siendo la aplicación de NPK10-30-10(100g)+Magnesamon(100g), la que alcanzó el mayor valor en altura total. En relación a la sobrevivencia, tanto en los ensayos con edades mayores, como en los más jóvenes, ésta fue alta y no se encontraron diferencias significativas, con un rango alto de entre 83 al 100%.

SUMMARY

The study was carried out in approximate 3000 ha of teak, located in the Western zone of Panama Canal, using a stratified factorial sampling design for the analysis of tree growth and also an evaluation of fertilization trials. First, the sampling design allowed finding that 29% of the plantation is located in the lower growth class (2.9 to 3 m³/ha/year), while 59% is located in the middle growth class (6.3 to 8.3 m³/ha/year) and 12% (10.3 to 13.3 m³/ha/year) belongs in the high growth class. The acidity saturation percentage and the calcium saturation percentage proved to be the most limiting factor for each yield and growth, which contributes to explain the condition related to the different growth classes. Optimal conditions were given when acidity saturation was <8%, and when calcium saturation was >40%. This situation was more evident with soils pH<5.5. Related with the nutritional foliar condition, from the 36 analyzed sites, in general, the contents of the studied elements are located in a middle nutritional foliar class. Models selected for the on-site valuation index, obtained from the first soil depth (0-20 cm), considering on-site variables and soil were: $IS_{10}=19.874-0.192*(Sat.Acidity)-0.150*(Sat.Ca)+3.238*(Ca/Mg)$; $r^2=0.46$; and, $IS_{10}=20.507-0.138*(Sat.Acidity)-0.081*(Sat. Ca)$; $r^2=0.54$.

Related with fertilization trials with ages up to 42 months, the use of 2 kg/tree of compost produced a higher response in the evaluated variables, reaching highly significant differences up to 1% ($p=0.000$) between treatments, with the highest differences in volume of 8.12, 1.84 and 10.84 m³/ha, respectively, overcoming the control in 68%, 84% and 93%. In another trial the application of NPK10-30-10(100g)+Phosphorus Rock(100g), showed the highest difference in volume of 7.3 m³/ha, overcame the control in 60%. Another trial with the application of NPK10-30-10(100g)+Magnesium(100g), with a difference in volume of 24.85 m³/ha, overcame the control in 10%.

In three of the four youngest fertilization trials, measured at 7 months, the application of NPK10-30-10(100g)+Magnesium(100g) was the best treatment which teak reached major values in total height of 0.77, 2.01 and 1.90 m, overcoming the control in 143%, 74% and 67%, respectively. Only in one of these three trials, significant statistical differences were achieved between treatments to 1% ($p=0.000$), being the NPK10-30-10(100g)+Magnesium(100g) application reaching the highest value in total height. Related with survival, in the older aged trials, as well as in younger ones, no significant differences were found, and was light with values, between 83 and 100%.

Índice de contenido

1. Introducción	12
2. Objetivos	14
2.1. Objetivo general	14
2.2. Objetivos específicos	14
3. Hipótesis de trabajo	14
4. Revisión de literatura	15
4.1. El cultivo de la teca.....	15
4.1.1. Consideraciones Generales	15
4.1.2. Distribución natural y en plantaciones	15
4.1.3. Requerimientos como especie y como cultivo.....	16
4.1.4. El cultivo de teca en Panamá.....	18
4.2. Índice de sitio.....	19
4.2.1. Necesidad de estudios en plantaciones forestales	19
4.2.2. Calidad de sitio e índice de sitio.....	20
4.2.3. Métodos de evaluación de la calidad de sitios	21
4.2.4. Resumen de las características sitio-suelo	23
4.2.5. Resultados y su aplicabilidad	24
4.3. Análisis foliar.....	24
4.4. Crecimiento y productividad	26
4.5. Fertilización en teca.....	27
5. Materiales y Métodos	32
5.1. Localización del área de estudio.....	32
5.2. Materiales	33
5.3. Métodos	34
5.3.1. Trabajo de campo.....	34
5.3.1.1. Diseño experimental de muestreo	34
5.3.1.2. Clasificación por rango de IMAAltTot (m/año) y pendiente (%)	34
5.3.1.3. Diseño experimental en los Ensayos de fertilización	35
5.3.1.3.1. Establecimiento de los ensayos.....	36
5.3.1.3.2. Medición de ensayos.....	38
5.3.1.3.3. Análisis e interpretación de los datos	38
5.3.1.4. Análisis de suelos.....	39
5.3.1.5. Análisis del follaje.....	39
5.3.1.6. Variables consideradas en el estudio	40
5.3.1.6.1. Variables de los árboles	40
5.3.1.6.2. Variables fisiográficas	40
5.3.1.6.3. Variables del suelo	41
5.3.1.6.4. Variables del follaje	41
5.3.2. Labores de oficina	42
5.3.2.1. Generación y depuración de base de datos	42
5.3.2.2. Caracterización de la productividad	42
5.3.2.3. Relación del índice de sitio y variables de sitio, edáficas y foliares	42
6. Resultados y Discusión	44
6.1. Análisis estadístico del diseño de muestreo.....	44
6.2. Variaciones en la acidez de los suelos en todos lo sitios.....	45
6.2.1. Variación en los niveles de pH.....	46
6.2.2. Variación en concentración de acidez extraíble	47
6.2.3. El porcentaje de saturación de acidez extraíble	48
6.3. Variaciones en las Bases intercambiables de los suelos.....	50

6.3.1.	Variaciones en las concentraciones de calcio (Ca).....	50
6.3.2.	Variaciones en el porcentaje de saturación de calcio	50
6.3.4.	Variaciones en las concentraciones de magnesio (Mg).....	52
6.3.5.	Variación del potasio (K)	53
6.4.	Situación del cobre (Cu), manganeso (Mn), zinc (Zn) y hierro (Fe).....	53
6.5.	Variación de otras variables	54
6.6.	Correlación entre variables a la primera profundidad 0-20 cm	56
6.7.	Crecimiento y productividad	57
6.8.	Caracterización nutricional foliar de las plantaciones.....	58
6.9.	Relación de los nutrientes del suelo con los nutrientes foliares.....	61
6.10.	Construcción de modelos para la predicción del índice de sitio	63
6.10.1.	Índice de sitio estimado versus índice de sitio predictivo	65
6.11.	Necesidades de encalado	65
6.12.	Resultados de los ensayos de fertilización.....	66
6.12.1.	Ensayo 039.....	66
6.12.2.	Ensayo 040.....	68
6.12.3.	Ensayo 041	70
6.12.4.	Ensayo 042.....	71
6.12.5.	Ensayo 043.....	72
6.12.6.	Ensayo 044.....	74
6.12.7.	Ensayo 075.....	75
6.12.8.	Ensayo 076.....	76
6.12.9.	Ensayo 077.....	78
6.12.10.	Ensayo 078.....	79
7.	Conclusiones y recomendaciones.....	81
7.1.	Relación de crecimiento de teca con variables del suelo y foliares	81
7.2.	Ensayos de fertilización:.....	88
8.	Literatura citada.....	93

Índice de cuadros

Cuadro 1.	Desempeño de la Teca en Panamá	18
Cuadro 2.	Resumen de las características sitio y suelo en ecuaciones desarrolladas para <i>Tectona grandis</i> L.f.	24
Cuadro 3.	Consolidado de los rendimientos para teca, reportados para Costa Rica.....	26
Cuadro 4.	Resumen de datos importantes en los ensayos de fertilización.....	36
Cuadro 5.	Descripción de los ensayos y tratamientos utilizados.....	37
Cuadro 6.	Resumen de significancia estadística alcanzada por el IS, la pendiente y las variables de crecimiento.	44
Cuadro 7.	Resumen de los tratamientos con relación a los promedios de crecimiento y productividad.....	45
Cuadro 8.	Promedios de valores de crecimiento por escenario de <i>Tectona grandis</i> L.f.	57
Cuadro 9.	Promedios generales de nutrimentos foliares encontrados en teca.....	61
Cuadro 10.	Promedios de las concentraciones de los elementos foliares.....	63

Índice de figuras

Figura 1. Relación IMAAltTot y concentración de acidez extraíble (cmol+/l), a la primera profundidad (0-20 cm).....	47
Figura 2. Relación del IMAVol y concentración de acidez extraíble (cmol+/l), a la primera profundidad (0-20 cm).....	48
Figura 3. Relación IMAAltTot y el % de saturación de acidez extraíble, a la primera profundidad (0-20 cm).....	49
Figura 4. Relación IMAVol y el % de saturación de acidez extraíble, a la primera profundidad (0-20 cm).....	49
Figura 5. Relación IMAAltTot y saturación de calcio, a la primera profundidad (0-20 cm).	51
Figura 6. Relación IMAVol y saturación de calcio, a la primera profundidad (0-20 cm)....	51
Figura 7. Promedios de IMA en volumen (m ³ /ha/año) para las clases de crecimiento consideradas	57
Figura 8. Promedios de IMA en volumen (m ³ /ha/año), para los escenarios de crecimiento considerados.....	58
Figura 9. Estado nutricional foliar en rangos, del calcio, magnesio, potasio y fósforo, en plantaciones de teca, hasta los 42 meses de edad.....	58
Figura 10. Estado nutricional foliar en rangos, para el cobre, zinc, manganeso y hierro, en plantaciones de teca, hasta los 42 meses de edad.....	59
Figura 11. Relación calcio foliar con pH a la primera profundidad del suelo (0-20 cm).....	62
Figura 12. Relación calcio foliar y pH a la segunda (20-40 cm) y tercera (>40 cm) profundidad.....	62

1. Introducción

La teca es oriunda de la India y del Asia sudoriental (Birmania, Tailandia, Laos) se conoce desde hace mucho por las propiedades excelentes de su madera, una de las más valiosas del mundo. En América tropical, la teca parece ser una especie ideal para plantaciones en zonas idóneas tropicales y subtropicales por la buena calidad de la madera, su rusticidad, sus características silvícolas agresivas, su facilidad de regeneración, la relativa facilidad de manejo de las plantaciones y en particular el hecho de que haya semejanza entre algunos sitios de América Latina y los lugares de origen (Keogh s/f). Este mismo autor sugiere que antes de responder si la teca tiene potencial en la región, deben ser considerados puntos importantes como la profundidad, buen drenaje, tipo de suelos y consideraciones de tipo político.

De esta manera, la teca es el nombre más familiar en el mercado de maderas, además que se ha ganado una buena reputación y popularidad, comparada con otras maderas de altos estándares de calidad debido a que la hace superior a otras, entre otros por la alta durabilidad natural contra insectos especialmente termitas y hongos, además de su moderada resistencia a usos marinos y últimamente como materia prima de construcción. (Bhat, 1991).

En el caso de Panamá, las estadísticas según la FAO-Unión Europea (Proyecto GCP/RLA/133/EC) indican que de la cubierta forestal en 1999, existían 38,217 ha de plantaciones de diferentes especies, de las cuales aproximadamente más de la mitad, unas 20,000 eran de teca (Centeno, 1999).

Sin embargo, a pesar del interés en el desarrollo de plantaciones de teca en América Central durante los últimos 15 años, la implementación de ciertos proyectos de reforestación continúan teniendo algunos problemas, cuando luego de elaborar excelentes procesos previos a la inversión y posterior establecimiento, la capacidad productiva potencial de los sitios, las condiciones de suelo y otros aspectos, se tornan en la principal discusión y preocupación. Para evitar fracasos técnicos y la consiguiente pérdida económica, se requeriría hacer otras inversiones, que deberían preverse y/o planificarse mejor. Por ejemplo, de acuerdo con Ugalde (2003b), en los últimos años se

han detectado nuevos problemas de plagas y enfermedades, así como limitaciones en el crecimiento de las plantaciones de teca, especialmente en zonas con alta humedad, sin un período seguido de estación seca, en suelos ácidos y con desbalances nutricionales. Estos aspectos tienen alta prioridad e importancia al momento de seleccionar sitios a ser plantados con teca.

Es así como el interés se centra en determinar la calidad de los sitios donde se planea establecer o en las que se ubican plantaciones, para conocer el estado actual de las mismas y poder inferir en las futuras, de manera de poder orientar su establecimiento y manejo. Esto es precisamente lo que debería hacerse a priori, actividad que por supuesto necesita de una inversión y prefactibilidad.

En Panamá el establecimiento de plantaciones de teca se prevé crezca en un 15% (de Camino *et al.* 2002), para lo cual es necesario no solo preparar mejor la prefactibilidad de los proyectos y considerar un componente de investigación. Sino además debe considerar el seguimiento a todas y cada una de las actividades por medio de planes operativos, anuales y monitoreo constante y/o permanente del crecimiento de las plantaciones.

Para el presente estudio se utilizó como soporte la base de datos generada a través de una red de Parcelas Permanentes de Monitoreo (PPM) utilizando el sistema Mirasilv (Ugalde 2003), que proporciona información básica para la toma de decisiones posteriores y concernientes al manejo cultural y silvícola. De esta manera, también se evaluó la productividad y las relaciones del índice de sitio con las variables edáficas y foliares, esperando que esto contribuya a que, disponiendo de información, pueda ser mejorado el manejo de las plantaciones establecidas. Además en una base de datos (del sistema Mirasilv (Ugalde 2003) de ensayos de fertilización, se incorporaron las mediciones correspondientes a diez ensayos de fertilización montados para tal efecto, con la finalidad de estudiar el comportamiento y respuesta de la teca a los distintos tratamientos, dosis y tipo de fertilizante (químico y orgánico). Todo esto, para mejorar el conocimiento, la técnica y utilización como guía para el personal técnico con el fin de contribuir al éxito del proyecto forestal.

2. Objetivos

2.1. Objetivo general

Determinar las calidades de sitio para plantaciones jóvenes (2-4 años) de teca, utilizando el método indirecto del índice de sitio, para identificar las variables edáficas y de follaje que más estrechamente se relacionan con el crecimiento; además comprobar la respuesta a la fertilización, de acuerdo a diferentes ensayos y tratamientos ya establecidos.

2.2. Objetivos específicos

- ?? Analizar los factores de sitio más importantes que influyen en la selección de los sitios para plantar teca, y los rangos de crecimiento y productividad.
- ?? Evaluar y ajustar el modelo de índice de sitio para teca, mediante el método indirecto, para determinar la relación suelo-planta, mediante el análisis del contenido nutricional del suelo y el follaje.
- ?? Evaluar la respuesta de las plantaciones jóvenes a diferentes dosis de fertilización (química y orgánica).

3. Hipótesis de trabajo

En la presente investigación se plantean las siguientes hipótesis:

- ?? No existen diferencias estadísticamente significativas, en cuanto a la productividad en las plantaciones jóvenes de teca, para las diferentes clases de sitio y clases de crecimiento analizadas.
- ?? No existen relaciones estadísticamente significativas entre el contenido nutricional del suelo y del follaje de los árboles de teca en las condiciones estudiadas.
- ?? No se presentan diferencias estadísticamente significativas entre los tratamientos y cantidades de fertilizantes en los experimentos establecidos para demostrar la respuesta de la teca a la fertilización.

4. Revisión de literatura

4.1. El cultivo de la teca

4.1.1. Consideraciones Generales

Diversos conflictos de uso de la tierra aquejan y agudizan la sostenibilidad de los recursos presentes en un área determinada, mucho más si ésta es la unidad óptima de manejo, como lo es la cuenca. En el presente caso, la Cuenca del Canal de Panamá no es la excepción, y los estudios llevados a cabo, entre estos, Jonson (1989) y Coronado (2001), han indicado, que debe considerarse como posibilidades compatibles con el medio natural y socioeconómico, dentro de otras, las alternativas de conservación y forestales, orientadas al mejoramiento de la producción, mismas que son ampliamente aceptadas, no solo por agricultores y ganaderos de la zona de influencia del canal, sino apoyadas también por estudios sobre la capacidad de uso de la tierra, como el realizado por Vásquez (1999), en el que se determinó que dichas áreas, dentro de las que se encuentran las estudiadas, son recomendadas para la reforestación comercial. De ahí la importancia de estudios como el que se propone en la presente investigación, para conocer y evaluar el comportamiento de las plantaciones jóvenes de teca dentro de una parte geográfica de la Cuenca del Canal de Panamá, respecto a la orientación para conocer su estado actual de manejo y expectativas de producción.

4.1.2. Distribución natural y en plantaciones

La distribución natural de la teca se localiza en India, Birmania (actualmente Myanmar), Tailandia e Indochina. También se encuentra en la región Indonesa, principalmente en Java y en las Islas Filipinas donde probablemente fue introducida (Kadambi 1972, citado por Keogh 1981a).

Según Rao (1991) apropiadamente llamada *Tectona grandis*, la teca brilla y danza como una gran joya en la diadema de especies de árboles que se desempeñan en los bosques tropicales del mundo, que de forma natural se extiende desde los 25° latitud Norte hasta 9° latitud Sur. En general, su distribución preferida es la Norte. (Lamprecht 1990, citado por Vallejos 1996) menciona también la longitud 104° a 73° Este, definiéndola como una

especie heliófita, muy susceptible a la competencia ínter específica en su fase inicial de su crecimiento.

La especie ha sido sembrada extensamente fuera de su distribución natural y en al menos en cada país de América Central, en varias islas del Caribe, en México y en muchos países de Sur América. Ugalde (2003b) estima que actualmente en América Latina, hay aproximadamente entre 150,000 a 200,000 ha de teca. (ver anexo 01, mapa actualizado de América Latina sobre la distribución de áreas plantadas con Teca).

4.1.3. Requerimientos como especie y como cultivo

En relación a la temperatura, en Centro América se tienen reportados los siguientes rangos en grados centígrados (°C), cuyos valores son de 13°C a 35°C, y una media de 25°C (Rodríguez 1963), aunque el ámbito puede ser entre 12.5°C a 40°C (Mahaphol 1954, Flinta 1960 y Rodríguez 1963, citados por Chávez *et al.* 1991). Otros reportes sugieren sin embargo considerar dos límites térmicos observados en Honduras por (Salazar 1973 citado por Chávez *et al.* 1991), el primero entre 25°C y 28°C clasificado como bueno y el segundo entre 20° y 25°C clasificado como menos apropiado, considerando que fuera de estas condiciones no prospera adecuadamente (Salazar 1973 citado por Chávez *et al.* 1991). Sobre la descripción de rangos en el caso de Costa Rica, debe tenerse en cuenta que éstos son específicos para el ámbito climático de dicho país, para lo cual se dispone de estudios de crecimiento y productividad, reportado en las investigaciones de Vázquez y Ugalde (1994), Vallejos (1996) y Montero (1999).

En cuanto a la precipitación en el lugar de origen de la teca es desde 760 mm/año y un rango superior de 3800 a 5000 mm/año. Al parecer prospera mejor en áreas lluviosas monzónicas en el orden de 1300-3800 mm/año (Rao 1991). Al respecto (CATIE 1986, Webb 1980, Bauer 1982, FAO 1975 y Bell 1973, citados por Chávez *et al.* 1991), según experiencias en América Central indican que el rango de precipitación varía entre 1250 y 2500 mm/año con una estación seca bien definida de tres a cinco meses. Este mismo autor indica que en Centro América se ha plantado en sitios cuya precipitación varia de 889 hasta 3689 mm/año; aunque se indica que sitios con una precipitación mayor a 3500 mm/año no son adecuados para el desarrollo de la teca (Chávez *et al.* 1991). En tanto la altitud óptima es por debajo de los 600 msnm (Trivedi Babu 1991).

En cuanto a los requerimientos fisiográficos y edáficos, la mayoría de las plantaciones de teca están situadas en topografías onduladas y pequeñas colinas, en suelos bien drenados y planos a lo largo de depósitos aluviales, limitando su desarrollo en suelos poco profundos y lomas o aristas (Chávez *et al.* 1991). Posee un requerimiento esencial de sub-suelos bien drenados, previniendo áreas pobremente drenadas. Prospera mejor en suelos con un pH entre 6.5-7.5; por debajo de un pH de 6.0 se crecimiento puede verse limitado, al igual que con pH mayores a 8.5. El pH del suelo es uno de los factores más importantes que limitan su distribución. La teca ha desarrollado en varias formaciones geológicas y su calidad radica en la factibilidad de encontrar suelos profundos, drenaje adecuado, humedad y fertilidad de suelo. En su lugar de origen crece bien en suelos típicos de las colinas de Myanmar, arenosos suaves de buena profundidad y drenaje. (Rao 1991, Chávez *et al.* 1991). Como regla general en cuanto a requerimientos edáficos, la teca no prefiere suelos lateríticos. El calcio intercambiable del suelo parece estar positivamente asociado con su desarrollo; buenos suelos para teca, por ejemplo son los ubicados en las praderas de Madhya en la India, que poseen mas de 0.3% de calcio intercambiable. La teca es una especie “calciorosa” y requiere una cantidad relativamente grande de calcio en los suelos para su crecimiento y desarrollo (Chávez *et al.* 1991).

En cuando a su preferencia ecológica, en Centro América la teca se ha plantado en áreas de bosques húmedos subtropicales, bosques secos subtropicales, bosques húmedos subtropicales (cálidos), bosque muy seco subtropical, bosque húmedo tropical, bosque muy húmedo premontano tropical y bosque seco tropical, según la clasificación de Holdridge con diversos resultados (CATIE 1986, citado por Chávez *et al.* 1991).

En cuando al período de floración, en Centro América de acuerdo con Chávez *et al.* (1991), ésta se inicia entre los cinco y ocho años; a partir de esta fecha comienza a producir semilla fértil, la cual generalmente presenta latencia, por lo que requiere de tratamientos de escarificación. Dicho período requiere de climas con una estación seca bien definida (3 a 5 meses), que significa un mes seco como aquel en el cual menos de 100 mm de precipitación debe darse, pero no medido como el período durante el cual la teca bota sus hojas. En el futuro será importante estudiar el comportamiento de la teca tanto en período seco como en invierno, dada la otra especial condición de requerir una adecuada cantidad de horas luz, pues es también reconocida como especie demandante

de luz solar en el rango de 75-95% de días completos, aparentemente como una de las condiciones adecuadas para su crecimiento y desarrollo (Rao 1991), así como la influencia de la variable viento y pedregocidad, muy poco estudiados y/o analizados al presente.

4.1.4. El cultivo de teca en Panamá

Según menciona CATIE (1997) la primera importación de semillas a Panamá se hizo de Tailandia en marzo de 1967, para propósitos experimentales, misma que fue recolectada en 1965 en Lampang en el Norte del mencionado país.

El proyecto Madeleña estableció entre los años 1988 y 1992 dos rodales semilleros de teca, uno en Quebrada Culebra, Panamá y el otro en Macaracas, Los Santos, aunque se detectaron otras áreas con potencial en Chiriquí, Veraguas y Colón Panamá, con el objetivo de evaluar su crecimiento (CATIE 1997).

La madera de teca es usada en construcciones navales, puentes, muebles y carpintería, por lo que en Panamá, desde que se comenzó a utilizarse (en la década de los 80's) en la elaboración de muebles de acabados finos, ha llamado la atención de países como Japón y Estados Unidos, por la teca producida en sitios como: Arco Seco, San Carlos, Coclé, Herrera, Los Santos y Veraguas. El cuadro siguiente informa de los primeros resultados obtenidos de evaluaciones a plantaciones de teca en Panamá. Según la Anam (2003), a diciembre 2002, habían establecidas 33,013 ha, equivalente a un 64% del total de plantaciones forestales.

Cuadro 1. Desempeño de la Teca en Panamá

Sobrevivencia	90% (Alta) en los primeros dos años y solamente un 10% (Baja), en los sitios: Chupampa, Macaracas y Los Santos.
IMA Altura total (m/año)	Mínimo 0,18 m/año y Máximos de 3,4 m/año.
IMADap (cm/año)	Mínimo 1,00 cm/año y Máximos de 3,22 cm/año.

Fuente: CATIE (1997)

4.2. Índice de sitio

4.2.1. Necesidad de estudios en plantaciones forestales

En las ciencias forestales, el término “calidad de sitio” se utiliza para denotar la productividad relativa de un sitio para una especie forestal. En Centro América los estudios se iniciaron en la década de los 50’s –que se basó únicamente en técnicas cualitativas para clasificar los sitios-; mientras que ya en los años 70’s se utilizaron técnicas univariadas y en los 80’s técnicas de regresión múltiple, habiendo a la fecha citada 18 estudios concentrados en 13 especies (FAO 1985, Vincent 1980, Clutter *et al.* 1983, Alder 1980, Goitia 1954, Isolán 1972, Gutiérrez y Mize 1993, Vallejos Barra 1996, citados por Herrera *et al.* 1998)

Barros (1981) define que el crecimiento de árboles y la productividad del bosque son el resultado de las respuestas fisiológicas a la interacción de factores bióticos y abióticos del ambiente. Las características climáticas, fisiográficas y del suelo, son usualmente los factores más importantes del ambiente que afectan la calidad del sitio, la capacidad de la tierra para producir los productos forestales deseables. La evaluación de la calidad de sitio es esencial en el sistema de predicciones de rendimiento para estimar crecimiento y rendimiento y tomar decisiones sobre adquisición de tierra, inversiones industriales e insumos silviculturales.

La información mas reciente generada por Vallejos (1996) y Montero (1999), ha permitido el desarrollo de modelos de índices de sitio y productividad, producto que está dirigido hacia la búsqueda de recomendaciones prácticas para el manejo silvicultural de las plantaciones de teca y otras especies, pretendiendo desarrollar una herramienta que facilite la clasificación de áreas para programas de reforestación y de esta manera orientar mejor los programas existentes como los incentivos, para disminuir fracasos generados a partir de una falta de información en la selección del sitio.

Los estudios para la predicción de la productividad de un determinado sitio a partir de factores ambientales, han sido utilizados en los Estados Unidos y Europa desde los años 30 (Haig, 1929, Coile 1935, Kilian 1981, citados por Herrera y Alvarado 1998).

De acuerdo con Vázquez y Ugalde (1995), el rendimiento de una plantación depende en gran parte, de la capacidad productiva del sitio seleccionado, así como de la preparación y del manejo que se dé al mismo, indicando que en algunos sitios los árboles crecerán rápidamente alcanzando grandes volúmenes en poco tiempo, en tanto que en otros sitios, el crecimiento probablemente será menor.

Vázquez (1995), indica que si se desea seleccionar bien el sitio para establecer una plantación o sistema agroforestal, es necesario conocer los requerimientos ecológicos de las especies que se desean establecer, además de conocer la capacidad de uso del suelo, es decir, el potencial biológico de producción que tiene ese suelo (agrícola, forestal o ganadero), siendo necesario hacer un análisis de los diferentes factores que pueden afectar el desarrollo de las especies a plantar. Este mismo autor denota que, en el caso de plantaciones forestales a nivel industrial donde se requieren de grandes extensiones de tierra, es doblemente importante conocer la disponibilidad y calidad de los suelos, en cuyas áreas donde se establezcan es posible encontrar que una misma especie o procedencia no responda de la misma forma a diferencias mediambientales, es decir, la existencia de la interacción genotipo por ambiente.

En este mismo sentido, Evans citado por Vázquez (1995), revela que en la etapa donde se aparea la especie con el sitio, debe tenerse claro que a nivel de procedencia o variedad, las interacciones son principalmente con los parámetros climáticos, mientras que a nivel de familias o clones, puede esperarse una mayor influencia con los factores edáficos.

4.2.2. Calidad de sitio e índice de sitio

Según Herrera y Alvarado (1998), la información sobre la estimación de la calidad de sitio a partir de factores ambientales en Centro América ha presentado una importante mejoría en cuanto a las metodologías empleadas, siendo la variable más utilizada el índice de sitio (IS) la cual parte de la relación altura-edad, bajo el concepto de altura dominante, definido como “el promedio de los 100 árboles más altos por hectárea”.

Vázquez y Ugalde (1995), definen que la capacidad productiva de un determinado lugar se conoce como calidad de sitio, donde “sitio” está definido por un complejo de factores

bióticos y abióticos, y su “calidad” es el resultado de la interacción de los factores ambientales (suelo, clima, etc) y la vegetación existente.

Alfaro (1983) hizo una recopilación de las diferentes definiciones expresadas en la literatura, las cuales coinciden con las presentadas, además de Barros (1991), por (Daniel *et al.* 1982 y Vásquez y Ugalde 1995, citados por Vallejos 1996), las cuales se resumen a continuación:

☞ Se entiende por sitio a “un área considerada en términos de sus factores, con referencia a la capacidad de producir bosques u otra vegetación; lo que es la combinación de las condiciones bióticas, climáticas y edáficas de un área”. Es decir, al complejo de factores bióticos y abióticos.

☞ Se entiende por calidad de sitio a “la combinación e interacción de los factores bióticos y abióticos con la vegetación existente”. En el caso forestal, dicha calidad se estima como la máxima cosecha de madera o biomasa, que el bosque produce en un tiempo determinado, es decir, la productividad de dicho bosque.

☞ Se entiende por índice de sitio a “la estimación de la altura dominante (H_{dom}) que los árboles dominantes (100 árboles más altos por hectárea) de una plantación coetánea alcanzan a una edad en particular, conocida como edad base”. El índice de sitio es la expresión de la calidad de sitio, basada en la H_{dom} , -expuesto también por Herrera *et al.* (1998).

4.2.3. Métodos de evaluación de la calidad de sitios

(Carmean, 1975 y Cutter *et al.* 1983 citados por Vásquez y Ugalde 1995), dividen los métodos para clasificar la calidad de sitio en métodos directos y métodos indirectos. En los primeros, la calidad del sitio es estimada en función de datos históricos de rendimiento en volumen, crecimiento en altura dominante (índice de sitio), o de crecimiento entre nudos, es decir, estos métodos se utilizan para clasificar sitios con plantaciones ya establecidas. Cuando se desean clasificar sitios donde aún no hay plantaciones, se utilizan los métodos indirectos, los cuales utilizan relaciones entre especies,

características de la vegetación inferior (sotobosque) o factores edáficos, topográficas y climáticos.

Daniel (1982) afirma que el criterio fundamental para la elección de un método indirecto, se basa en su efectividad para traducir una estimación precisa de la calidad de sitio; y que para el caso de zonas tropicales, Von Christen (1966) afirma que la utilización de métodos directos se complican, debiendo optar por uno que asegure la obtención de datos precisos. En este sentido, Phillips citado por Jadán (1972) indica que una de las maneras de establecer la relación entre características del suelo y el índice de sitio es relacionando el índice de sitio con factores mensurables del suelo y topografía, tales como textura, pendiente, materia orgánica y otros. Aunque la vegetación tiene marcada influencia en la formación de suelo, y si se pretende traducir resultados observados en un sitio poblado de árboles para predecir la productividad en terrenos de vocación forestal pero sin árboles sobre su superficie, una de las alternativas para reducir un posible error sería tomar el estudio de plantaciones jóvenes, partiendo del supuesto de que con menor tiempo de estar la vegetación sobre el suelo, posiblemente serán menores los cambios provocados por la misma.

Chávez (1991) indica que existen trabajos sobre la clasificación (estimación directa) de sitios para teca, (citando a FAO 1977; Keogh 1980b; Luke 1981; Torres 1982; Umaña 1983; Stearns s/f,) entre los que destaca el de Henao (1982), desarrollado en Colombia, el cual se podría utilizar para calificar los sitios de América Central, utilizando la altura promedio de los árboles y no de los árboles dominantes, que es la información que comúnmente se utiliza en estos modelos, además que el ámbito de los datos utilizados abarca hasta los 25 años de edad.

La técnica descrita Vásquez y Ugalde (1995) es conocida como Índice de Sitio (IS), el cual se define como la altura dominante que pueden alcanzar los árboles de un rodal a una edad determinada, la cual se toma como base. Así por ejemplo, si se tienen que comparar dos plantaciones con diferente edad, utilizando el (IS), es decir, la altura dominante a la edad base, es posible decidir cuál de los dos sitios es mejor para esa determinada especie. Para lograr dicha estimación, Vásquez y Ugalde (1995), utilizaron las ecuaciones de IS que ya existían, generadas por el Sistema de Manejo de Información sobre Recursos Arbóreos (MIRA) (Ugalde 2003) o por otros autores (Keogh 1981b), y otros

mencionados por dichos autores, que una vez estimado el IS para cada parcela, se realizan análisis Figuras, análisis de correlación y análisis de regresión múltiple para identificar las variables de sitio que más determinan el crecimiento de cada especie.

De esta forma, para clasificar plantaciones desde el punto de vista práctico, las mismas se estratifican en “clases de sitio”, para facilitar su manejo posterior. Estas clases de sitio no deberían ser tantas en número, tal como argumentan Vásquez y Ugalde (1995), debido a la gran cantidad de unidades que saldrían y para que sea más fácil y práctico de manejar. Por lo que considerando esto último, se definieron tres clases de sitio: **Alto**, que significa que agrupa plantaciones con el mejor crecimiento, superior al promedio, sitios con mayor potencial económico. **Medio**, sitios buenos, alrededor del promedio, con manejo apropiado tendrían buenas posibilidades de ser rentables y **Bajo**, sitios por debajo del promedio, considerados como marginales, difícilmente rentables que no deberían ser recomendados para la especie en atención, a menos que puedan implementarse mejorar que produzcan efectos positivos sustentables y factibles económicamente.

4.2.4. Resumen de las características sitio-suelo

Herrera y Alvarado (1998), analizan dos estudios que relacionan la calidad de sitio con factores ambientales, desarrollados en el pacífico seco de Costa Rica, donde se encontró como principales limitantes, la precipitación media anual y la temperatura media anual. Así mismo, también encontraron que la profundidad del suelo y la posición topográfica (las partes bajas de la pendiente favorecen el crecimiento) afectan el desarrollo de la especie. Mientras tanto, la resistencia a la penetración del suelo y la concentración de Calcio han sido los principales factores edáficos señalados como limitantes. A continuación en detalle dicho resumen:

Cuadro 2. Resumen de las características sitio y suelo en ecuaciones desarrolladas para *Tectona grandis* L.f.

Sitio de estudio	Tipo de suelo	Factores limitantes			Modelo	Fuente
		Climáticos	Fisiográficas	Edáficos		
Guanacaste, CR	Inceptisol Alfisol	Precipitación media anual (pma) (+)	Posición topográfica (-) Profundidad del suelo (+)	Déficit hídrico (-) Ca, Fe (-)	IS= 2.206 + 0.007 pma + 0.176 Ca R ² = 0.44	Vásquez y Ugalde (1994)
	n.r.	Temperatura media anual (tma) (-) Déficit hídrico (-)		Ca Resistencia a la penetración (-)	IS= 119.00 - 3.99 tma -0.34 resistencia a la penetración + 0.264 Ca R ² = 0.67	Vallejos (1996)

4.2.5. Resultados y su aplicabilidad

De acuerdo a (Ugalde 2003, citado por FAO 2002), con la experiencia generada en Centro América, deben ser considerados los siguientes aspectos:

- ?? Temperatura: Los límites están entre un promedio de 25 y 28 grados Celsius, clasificado como bueno. Fuera de esta temperatura, la especie no crece bien.
- ?? Precipitación: La teca crece bien entre 1,250 y 2,500 mm/año. La especie requiere de 3 a 5 meses de período seco por año.
- ?? Elevación: En Centro América, los mejores rendimientos han sido obtenidos abajo de los 600 metros sobre el nivel del mar.
- ?? Suelos: La teca se desempeña bien en suelos arenosos y medianamente arcillosos, fértiles, profundos, bien drenados, con un pH neutro o medianamente ácido.
- ?? Factores limitantes: No es recomendable plantar la teca en terrazas o pequeñas Colinas con pendientes, ni suelos compactos o sombreados y texturas pesadas.

4.3. Análisis foliar

Según Bertsch (1995), es posible utilizar el análisis foliar como una técnica de diagnóstico del estado nutricional de las plantas, puesto que es en las hojas donde se lleva a cabo la síntesis de las sustancias esenciales para el crecimiento y la fructificación y por ende, debiera representar de mejor manera, el estado nutricional de los demás órganos.

Vallejos (1996) informa que se han encontrado relaciones entre contenido nutricional de las hojas con el índice de sitio, citando los trabajos de Bockheim, Leide y Frelich (1989), quienes reportan que índice de sitio de *Pinus resinosa* Ait. creciendo en Wisconsin, se relacionó con el contenido de nitrógeno foliar ($r=0.86$) y con el contenido de Calcio foliar ($r=0.58$). El mismo autor cita lo reportado por Drechsel y Zech (1991) que la nutrición foliar y el muestreo de suelos tratan de entender el ciclaje de nutrientes, mencionado por ejemplo las posibles relaciones entre el contenido de Zinc foliar y el Calcio y, el magnesio en el suelo, argumentando que debido al medio-alto pH del suelo, se presentaba mayor disponibilidad tanto en el suelo como en la planta de Zinc, así como en las bases del suelo.

Drechsel y Zech (1991), en un esfuerzo para sistematizar la falta de información disponible para especies tropicales, lograron recopilar información, sirviendo ésta como guía para la interpretación del análisis foliar, la que puede ser usada para orientar el tema objeto de discusión, a partir de la cual, es posible apreciar la gran variabilidad de los resultados generados y que el contenido de nutrientes foliares es afectado por múltiples factores, entre otros, por: las condiciones del rodal, la edad del árbol y de la hoja, la estación y el procedimiento de muestreo. Es importante que al utilizar esta información como referencia, se tenga el cuidado de hacer comparaciones con edades más o menos similares, porque de otra manera, no se estaría haciendo una buena y adecuada comparación.

Para el caso específico de la teca, Vallejos (1996), recopiló información sobre las técnicas de muestreo, siendo la metodología en resumen la siguiente desarrollado en el Oeste de África y basado en (Drechsel y Zech 1994 y Van der Driessche 1974):

Posición de la copa: dominante y codominante; Posición en la copa: hojas de la parte superior; Edad del follaje: Maduras; Número de árboles por parcela: 10 árboles como mínimo por 0.05 a 0.1 ha , siendo lo recomendable de 5 a 10 árboles; Número de hojas por árbol: 6 a 8 y época de muestreo: Antes de la floración, en períodos de crecimiento vegetativo.

4.4. Crecimiento y productividad

Los rangos de productividad encontrados por varios autores para Costa Rica, se resumen en el siguiente cuadro, observando los distintos valores de acuerdo a las clases y rangos utilizados, provenientes de plantaciones en un rango amplio de edades.

Cuadro 3. Consolidado de los rendimientos para teca, reportados para Costa Rica.

Variable	Unidad	Marginal	Bajo	Medio	Alto	Excelente	Fuente
IMA-dap	cm/año	1.90 menos	ó 1.91 - 2.49	2.50 – 3.01	3.02 - 3.8	3.81 ó más	Vallejos (1996)
			1.5 ó menos	1.6 - 1.9	2.0 ó más	Vázquez y Ugalde	
IMA-H	m/año	1.63 menos	ó 1.64 - 2.32	2.33 – 3.14	3.15 - 4.05	4.06 ó más	Vallejos (1996)
			1.5 ó menos	1.6 - 1.9	2.0 ó más	Vázquez y Ugalde (1995)	
IMA-G	m ² /año	0.97 menos	ó 0.97 - 2.04	2.05 – 2.77	2.78 - 3.73	3.74 ó más	Vallejos (1996)
			1.5 ó menos	1.6 - 2.4	2.5 ó más	Vázquez y Ugalde (1995)	
IMA-Vol	m ³ /año	3.20 menos	3.4	12.1	17.5	19.1	Montero (1999) *
			ó 3.21 - 11.83	11.84 – 18.00	18.01 - 26.57	26.58 ó más	Vallejos (1999)
			12 ó menos	12.1 - 17.9	18 ó más	Vázquez y Ugalde (1995)	
			5.0 ó menos	5.0 - 10.9	11.1 - 18.0	18.0 ó más	Montero (1999)

Observaciones: * valores promedio.

De acuerdo a Chávez *et al.* (1991), el crecimiento de la teca puede resumirse en una etapa inicial de rápido desarrollo, luego una etapa media y finalmente una etapa lenta después de 8 o 10 años. Esto último es posible apreciarlo en los análisis fustales elaborados por Pérez (1998), en el cual es posible observar como en relación al Dap (cm) los anillos del fuste de un árbol de 46 años, son más espaciados en los primeros 22 cm y seguidamente la separación entre los mismos se hace más angosta, observando alguna otra separación notoria entre los 40 y 60 cm, para luego volver a ser más angosta dicha separación. En Costa Rica, algunas plantaciones de cinco años presentan un IMA en altura que varía desde 2.62 a 3.06 y, a los nueve años, un IMA de 1.83 a 2.24 m. Estas diferencias son marcadas entre sitios, debido supuestamente a la cantidad de calcio, capacidad de intercambio catiónico, profundidad y textura del suelo (Chávez 1989, citado por Chávez *et al.* 1991).

4.5. Fertilización en teca

(Pritchett citado por Alfaro 1983) denota que la intensificación del manejo forestal y el incremento en áreas de plantaciones forestales ha hecho que se preste más atención a las propiedades químicas del suelo para el crecimiento de los árboles. Alfaro (1983) también cita lo indicado por McCants (1967), en el sentido que a pesar que la fertilidad de un suelo no puede ser medida de manera absoluta, a través del desarrollo progresivo de técnicas y procedimientos para análisis de suelos e interpretación de resultados, es posible predecir con considerable exactitud la respuesta a la aplicación de cal, fósforo y potasio, cuyo establecimiento comprende el nivel crítico para cada elemento.

En este mismo sentido, Zambrana (1987) indica que para hacer un programa de fertilización es importante conocer el ciclo de nutrientes dentro de la plantación, cuyos aportes por lo general proceden de: la aportación de la lluvia, la actividad de microorganismos, de la descomposición de la materia orgánica y del material geológico.

Barros (1981), señala que para plantaciones forestales en general, los resultados de crecimiento de árboles dentro de una clase topográfica homogénea frecuentemente se asocian con diferencias en suministros de agua disponible, o atmósfera de suelo, o nutrientes de suelo (Ralston 1964 citado por Barros 1981) Por ende, las propiedades de suelo que afectan la humedad, aireación y nutrientes en la zona de raíces, usualmente se relacionan con la calidad del sitio.

Se sabe que hay 16 elementos conocidos como esenciales para el crecimiento de árboles forestales, de los cuales, 4 se originan en la atmósfera y 12 en el suelo. Estos se dividen en dos grupos, los cuales se denominan macro nutrientes y micro nutrientes, división que se basa en la necesidad relativa de estos nutrientes que tienen los árboles. De todos estos, hay 9 macro nutrientes que se necesitan en el follaje a niveles generalmente de 1000 partes por millón (ppm) o más y 7 micro nutrientes que se requieren a generalmente 100 ppm o menos (Salisbury y Ross 1978, citados por Davey 1983)

Barros (1981) describe de manera específica las condiciones por variables del suelo, dentro de otros:

Prof. del suelo	Es particularmente importante en sitios donde el crecimiento de raíces se limita por capas restrictivas tales como tosca arcillosa, tosca, pedregosa, u otros horizontes de permeabilidad baja que definen la profundidad efectiva del perfil. Además la profundidad efectiva puede definirse por niveles freáticos o presencia de sustancias tóxicas. (Barros 1981)
Textura de suelo	El aumento en fracciones finas de un suelo dominado por fracciones gruesas, como gravilla y arena, puede estar relacionado a crecimiento de árboles debido a condiciones mejoradas de retención de humedad; por otro lado el aumento de fracciones gruesas en un suelo dominado por fracciones finas puede influenciar el crecimiento por razón de mejor aireación. Este patrón general puede modificarse por estructura de suelo, presencia de capas permeables y topografía.
Nivel freático	El nivel freático llano fluctuante es un factor de suelo importante que afecta el crecimiento forestal. Las grandes variaciones cíclicas en nivel freático son indeseables porque raíces penetrando partes del perfil que se airean durante sequías, éstas retroceden muertas cuando el nivel freático se eleva en el perfil del suelo, durante épocas húmedas. (Barros 1981)
Impedimento físico de suelo	En la mayoría de los casos, la impedancia física del suelo al crecimiento de raíces está íntimamente correlacionada a la aireación de suelo y drenaje de suelo. (Barros 1981)
Nutrientes en el suelo	Plantaciones forestales que envuelven especies exóticas y hasta especies nativas, proveen un medio excelente para indicar la dependencia de la productividad forestal en los nutrientes del suelo. Por ejemplo, especies de eucalipto han respondido a fertilización en su país nativo (Cremer <i>et al.</i> 1978) tanto como en países donde son exóticas (Anónimo 1976). Se ha logrado respuesta más frecuente a fertilización N y P (Barros 1977, Cremer <i>et al.</i> 1978 y Schutz 1976 citados por Barros 1981) pero en ciertos suelos es necesario añadir otros elementos como K, Ca y B también, para buena producción de madera.
Aluminio en el suelo y reacción del suelo	En suelos ácidos con valores $pH < 5.0$ la solubilidad de Al aumenta grandemente y gran parte de los sitios de intercambio de cationes pueden ocuparse por Al. El aluminio puede tomarse por las plantas de modo que los efectos detrimentes en el crecimiento de plantas a menudo se debe a niveles altamente solubles de Al, en vez de concentraciones altas de pH. Las especies y variedades de plantas varían mucho en tolerancia a excesos de pH, en el medio de crecimiento. El aluminio no es considerado generalmente un elemento esencial para el crecimiento de las plantas, pero en algunas especies parece que aumenta el crecimiento (Foy <i>et al.</i> 1978 citado por Barros 1981). Muchos de los efectos directos aparentes de la acidez del suelo sobre el crecimiento de los árboles podrían resultar de su efecto indirecto sobre condiciones del suelo como actividad microbial y disponibilidad de nutrientes (Pritchett 1979 citado por Barros 1981). Por lo general, la disponibilidad de B, Cu, Mn y Fe aumenta según aumenta la acidez del suelo.

De ahí que la localización de un sitio no sea un rasgo incambiable del paisaje, el cual puede ser mejorado o degradado como resultado de prácticas de manejo y explotación forestal que pueden modificar el agua, aireación y regímenes de nutrientes (Barros 1981).

Para Costa Rica, en sitios infértiles la teca puede responder a la fertilización, especialmente con fósforo, pero en ciertos casos se han reportado pocas ventajas económicas. La aplicación de calcio es probablemente beneficiosa en lugares donde el contenido de la capa superficial del Calcio intercambiable es menor al 0.3%, o en donde el pH es inferior a 6 (Kaosa-ard 1981, citado por Briscoe 1995). (Vásquez y Ugalde 1995 citados por Briscoe 1995) encontraron que tener más de 10 meq. de Calcio en el suelo,

fue importante para el crecimiento de teca en Guanacaste. Para Briscoe (1995) cualquier fertilizante debe ser probado en una escala experimental antes de ser utilizado como un procedimiento estándar, porque han habido casos en que demasiado nitrógeno puede provocar la extensión de brotes, que no son lo suficientemente fuertes para permanecer rectos. Mucho azufre o cal pueden afectar desfavorablemente el pH del suelo. Si el pH natural está cerca de los límites óptimos algo ácido o alcalino respectivamente empeora la condición del suelo.

Otros experimentos llevados a cabo en teca, sobre la aplicación de fertilizantes después de plantar, han proporcionado resultados contradictorios, esto se debe, quizá, a la variedad de suelos y procedencias utilizadas, lo cual hace difícil formular recomendaciones generales en cuanto a sitios y fertilizantes (Chávez *et al.* 1991). Algunos estudios demuestran que el nitrógeno cuando se aplica acompañado de fósforo provoca a menudo un aumento en el crecimiento, pero en algunas ocasiones parece reducirlo. En general se consideran estos dos elementos como los más importantes para el crecimiento de la especie (Qhureshi y Yadav 1967; Ojo y Jackson 1974; Laurie 1975 y Rodríguez *et al.* 1985, citados por Chávez *et al.* 1991).

Patel (1991) en un experimento llevado a cabo con teca en Jivrajbhai, India, sobre técnicas de desarrollo para incrementar la tasa de crecimiento en una plantación joven bajo una densidad de 4800 árboles por acre y con aplicaciones de irrigación, pesticidas y fertilizantes; encontró que a muchos suelos trabajados deben ser aplicados una cantidad de 0.5 ton de urea por acre, para enriquecer los suelos de contenido orgánico y alcanzar altos crecimientos en las etapas tempranas, condición que debe ser mantenida con suficiente humedad en las zonas de raíces a través de irrigación.

Otras experiencias como la de Singh (1991), quien en plantaciones de un año de edad establecidas en Kerala, India, encontró que la dosis de NPK, 30g N + 6g P + 3g K, resultó ser la óptima, dando los suelos como resultado un incremento de entre un 60% y 80% que en los bloques testigo, equivalentes a un incremento anual en Dap máximo de 78.4 cm/año, aplicado a radios de 30, 45 y 60 cm, alrededor de las plantas.

Uno de los experimentos más útiles y sencillos en Costa Rica, fue le implementado por Raigosa *et al.* (1995), quienes en 1994 establecieron un ensayo de fertilización en la finca San Bernardo del Viento, situada en el caserío de la Palma, en Colorado de Abangares,

Guanacaste, Costa Rica. El objetivo de este ensayo fue determinar si el crecimiento inicial de teca y observar el efecto con la adición de diferentes dosis y combinaciones de estiércol, ceniza, cloruro de potasio y NPK-10-30-10. En total se estudiaron 8 tratamientos de fertilización aplicados al fondo del hoyo en el momento de la plantación. El diseño de ensayo fue de bloques completos al azar con 3 replicaciones. Siete meses después del establecimiento se midió la altura total de los árboles y se encontraron diferencias significativas entre los tratamientos al nivel del 5 por ciento. Los mejores tratamientos fueron en primer lugar 1.2 kg/árbol de ceniza más 100 gr/árbol de NPK-10-30-10 y en segundo lugar el tratamiento de 1.2 kg/árbol de estiércol con 1.2 kg/árbol de ceniza. La sobrevivencia no mostró diferencias significativas al realizar la aplicación del fertilizante. Se recomendó en su momento investigar más detalladamente el tratamiento con estiércol, ceniza y fertilizante, tanto las cantidades, como la posible respuesta a fertilizaciones posteriores en plantaciones de teca.

En ensayos realizados en El Salvador, Hernández y colegas (1990) reportan que hubieron diferencias altamente significativas entre los 44 y 60 meses para plantaciones de teca, solamente entre repeticiones, no así entre tratamientos, donde se utilizaron diferentes dosis de la fórmula 20-20-0 (NPK) aplicado a la plantación de 5 años de edad. También hubo diferencia significativa sobre el peso verde del fuste, pero no en la Sobrevivencia, altura y dap. El mismo autor recomienda otros ensayos con dosis y métodos diferentes de aplicación.

En otro ensayo, en plantaciones de teca establecidas en los llanos Occidentales y Orientales en Venezuela, Torres y colegas (1997), con espaciamiento inicial en teca de 3 x 3 m, incluyendo tres edades (2, 7 y 12 años) y dos sitios (dique y napa) para cada edad, con excepción de la plantación de siete años, establecida sólo en sitios de napa. Se probaron tres niveles de P_2O_5 : (1), sin fertilización (control) (2) 100 kg ha⁻¹, y (3) 200 kg ha⁻¹ en una sola aplicación. El incremento medio anual del volumen sin corteza en las plantaciones de 12 años fue de 8,1 (± 0.6) m³ ha⁻¹/año en el "dique" y 6.1 (± 0.5) m³ ha⁻¹/año en la napa. Estos valores son bastantes inferiores a los obtenidos en sitios bien drenados de Caparo, Venezuela (Hase y Folster, 1983) y ligeramente menores a los encontrados en Trinidad (Keogh, 1983); aunque aquí se trata de suelos y terrenos de colinas y penillanuras, bien drenados, pero muy ácidos (pH 4.0 a 5.5). Los factores que parecen estar limitando el crecimiento de la teca en Ticoporo son el drenaje, el status

nutricional del suelo, y el mantenimiento y manipulación de la densidad de las plantaciones.

En Panamá, Montero (1995) encontró que en un experimento montado por CATIE a través del Proyecto Madeleña en septiembre de 1988 (con una edad de 5 años) en El Limón de Chupampa, Herrera, se instalaron 4 tratamientos en parcelas de 16 árboles cada uno con espaciamiento de 3mX3m, utilizando fertilizante químico NPK 12-24-12, en dosis: 84.9 gramos, 169.8 gramos, 254.7 gramos por árbol, y el testigo sin fertilización. Se midieron las variables: altura, diámetro, sobrevivencia, incremento medio en altura e incremento corriente anual. Se demostró que la mejor respuesta a la fertilización se obtuvo con una dosis de 254.7 gr/árbol. Las otras dosis no presentaron diferencias estadísticamente significativas.

5. Materiales y Métodos

5.1. Localización del área de estudio

El área de estudio se ubica dentro de las áreas revertidas en la zona Oeste de la Cuenca del Canal de Panamá, otorgadas en concesión por parte del Gobierno de Panamá, con una extensión total de 7,370 ha, para fines de reforestación, por un período de 40 años y con una prórroga inicial hasta por 20 años adicionales. Esta concesión incluye un 50% aproximadamente de cobertura de bosque natural y el restante 50% con por paja canalera (*Saccharum spontaneum*), y dentro de último porcentaje, se encuentran establecidas aproximadamente 2000 ha de plantaciones hasta de 32 meses de teca (Calderón 2001). La edad actual de dichas plantaciones es de un máximo de 42 meses y un mínimo de 7 meses. El manejo que se ha hecho a las plantaciones desde la siembra, han sido las limpiezas anuales, poda de ramas y ningún raleo, hasta la fecha (julio 2003) en que se permaneció durante al fase de campo de la presente investigación.

Los lotes de plantaciones donde se desarrolló la investigación corresponden a plantaciones de teca establecidas desde 1999. Las plantaciones se encuentran localizadas en la región central del Canal de Panamá, también parte central de la cuenca hidrográfica, específicamente al Oeste del Canal. Según la regionalización propuesta en el Plan Regional para el Desarrollo de la Región Interoceánica, el área se ubica en la Sub-región Gatún Sur y de acuerdo a la zonificación administrativa, forma parte de los corrimientos Amador, Mendoza, Santa Clara, Nuevo Emperador y Ancón, de la provincia de Panamá.

El área posee una topografía caracterizada por bajas elevaciones, no mayores de 200 msnm, mientras que las cotas relativas al nivel de base local (Lago de Gatún) ligeramente superan los 100 msnm. El área esta conformada por colinas orientadas con rumbo NW que refleja las direcciones tectónicas predominantes, con pendientes relativamente suaves, estando separadas por pequeños valles aluviales, que forman parte de los nacimientos de quebradas importantes, pudiéndose apreciar tres tipos de paisajes: llanuras, colinas y cerros bajos, con pendientes de ligera a moderadamente inclinadas y con cimas con pendientes fuertemente abruptas e inclinadas (Vásquez 1999).

Con relación al clima predominante, el área está influenciada por una zona de convergencia intertropical y por la presencia de grandes masas de agua, que le dan la característica de un clima húmedo con dos estaciones marcadas: de mayo a diciembre hasta 2500 mm de precipitación y, de diciembre a abril, una fuerte estación seca, con rangos anuales de precipitación que varían desde 2000 a 2500 mm, la temperatura media anual oscila entre 25 y 28 °C, con vientos moderados, con una media que llega a los 10 km/hora, que aumenta en los meses de febrero a abril, con dirección norte-sur. Algunas áreas poseen un moderado contenido de pedregosidad o rocosidad, pero que no se considera una seria limitante. Dichas áreas tienen un relieve plano cóncavo con riesgos de inundación, en las cuales se recomienda la profundización de cauces de drenaje para facilitar el escurrimiento superficial. (Vázquez 1999)

Según Vázquez (1999) de acuerdo al sistema de clasificación de zonas de vida, el proyecto se ubica dentro de la porción denominada Bosque Húmedo Tropical.

En cuanto a los suelos según, de acuerdo con Vázquez (1999), predominan los órdenes Alfisol (53.2%), Inceptisol (29.2%) y Ultisol (17.6%), habiendo algunas inclusiones de Ultisoles dentro de Inceptisoles, derivado de áreas con menos lixiviación de bases formados a partir de rocas sedimentarias. Además el mismo autor afirma que no existen suelos Oxisoles, como otros reportes mencionan.

En relación a la fertilidad de los suelos en el área estudiada, Vázquez (1999) indica que los suelos se encontraron bajos en fósforo (P) y potasio (K), desbalanceados en relación al calcio (Ca) y magnesio (Mg). Además son necesarias enmiendas calcáreas para neutralizar el aluminio (Al) ó acidez extraíble, encontrado en altas proporciones y en la mayor parte del área.

5.2. Materiales

El equipo y materiales utilizados en las mediciones de campo fueron, clinómetro, vara métrica medidora de alturas, cinta diamétrica, brújula, altímetro, marcadores indelebles, tijeras podadoras, barreno para muestreo de suelos, machete, pala, piocha, bolsas plásticas y rotuladores

5.3. Métodos

La metodología desarrollada estuvo comprendida tanto por labores de gabinete previo, de campo y de gabinete posterior en oficina, además de reuniones individuales con el Asesor Principal y Miembros de comité de tesis.

5.3.1. Trabajo de campo

5.3.1.1. Diseño experimental de muestreo

La Empresa posee una red de Parcelas Permanentes de Monitoreo (PPM) de acuerdo a la metodología recomendada por Ugalde (2003), instaladas inicialmente a través de un muestreo exploratorio, considerando las diferentes condiciones de sitio como, tipo de suelo, pendiente, drenaje y crecimiento, entre otros. La red disponía a la fecha en que se inicio la investigación, con un total de 188 PPM, de un área promedio de 1000 m², que se encuentran distribuidas en toda el área plantada, de las cuales se consideraron 84 PPM cuyas edades oscilan entre 21 y 42 meses (2-4 años); mientras que las otras 104 PPM no sé consideraron por su corta edad (hasta 12 meses. En las PPM se hacen mediciones anuales considerando las variables que se describen más adelante, como lo indica la metodología del sistema Mirasilv (Ugalde 2003).

5.3.1.2. Clasificación por rango de IMAAltTot (m/año) y pendiente (%)

Una vez que la teca fué establecida en lotes de plantación y como se explicó en el párrafo anterior, se ubicaron las PPM considerando las diferentes condiciones de sitio, y utilizando la base de datos generadas a través de mediciones anuales, se definieron los factores identificando las variables, de crecimiento utilizando el incremento medio anual en altura total (IMAAltTot) y el porcentaje de pendiente (%), habiendose considerado tres niveles en cada variable, que combinándolas obtenemos nuevas unidades denominadas escenarios o tratamientos, según su uso en el análisis de la información, de acuerdo a lo recomendado por Vásquez y Ugalde (1995).

Factor: Crecimiento (IMAAltTot en m/año):	Factor: Pendiente (en porcentaje)
Bajo: hasta 2,25 m/año 2. Medio: desde 2,26 hasta 3,25 m/año 3. Alto: mayor a 3,26 m/año	Bajo: hasta 15 % Medio: desde 16 hasta 30 % Alta: mayor a 31 %

De la combinación del arreglo factorial 3X3, tuvimos 9 diferentes unidades y considerando un mínimo de 4 repeticiones, tuvimos un total de 36 sitios como el número total de muestras, escogidas al azar del total de la población disponible. Las repeticiones fueron escogidas completamente al azar dentro de la disponibilidad de parcelas y dentro de las diferentes condiciones de crecimiento y pendiente encontradas. La variable que consideró la edad para cada edad propiamente dicha de las plantaciones, fue el incremento medio anual, sea en altura total, Dap, área basal o de volumen, misma que es calculada automáticamente por el sistema Mirasilv (Ugalde 2003). A continuación se observa la descripción de cada nueva unidad para el análisis de la información.

Código	Descripción	Rangos numéricos
CBPB	Crecimiento bajo y pendiente baja	IMA altura total hasta 2,25 m/año y pendiente hasta 15%.
CBPM	Crecimiento bajo y pendiente media	IMA altura total entre 2.26 – 3.25 m/año y pendiente 16 – 30 %.
CBPA	Crecimiento bajo y pendiente alta	IMA altura total mayor a 3.26 m/año y pendiente mayor a 31 %.
CMPB	Crecimiento medio y pendiente baja	IMA altura total hasta 2,25 m/año y pendiente hasta 15%.
CMPM	Crecimiento medio y pendiente media	IMA altura total entre 2.26 – 3.25 m/año y pendiente de 16 – 30 %.
CMPA	Crecimiento medio y pendiente alta	IMA altura total mayor a 3.26 m/año y pendiente mayor a 31 %.
CAPB	Crecimiento alto y pendiente baja	IMA altura total hasta 2,25 m/año y pendiente hasta 15%.
CAPM	Crecimiento alto y pendiente media	IMA altura total entre 2.26 – 3.25 m/año y pendiente 16 – 30 %.
CAPA	Crecimiento alto y pendiente alta	IMA altura total mayor a 3.26 m/año y pendiente mayor a 31 %.

5.3.1.3. Diseño experimental en los Ensayos de fertilización

La empresa tiene varios experimentos establecidos para averiguar la respuesta a la fertilización. Estos fueron instalados de acuerdo a un diseño de bloques completamente al azar con 4 repeticiones. Durante el año 2001 se instalaron 6 experimentos con diferentes fuentes y dosis de fertilización, con 4 repeticiones, y durante el presente año se instalaron 7 experimentos con 4 repeticiones. La presente investigación utilizó la base de datos

generada de las diferentes mediciones anteriores y la que se efectuó entre febrero y marzo del 2003, las cuales se encuentran almacenadas en el Sistema Mirasilv (Ugalde 2003). De los experimentos identificados como 039, 040, 041, 042, 043 y 044, tenían al momento de la última medición 42, 31 y 20 meses, respectivamente, de haber sido plantados y los otros identificados como 075, 076, 077 y 078, 7 meses, de haber sido plantados. En el cuadro 4, se observa el resumen de datos respecto a las procedencias en cada ensayo, así como una bitácora de fechas. El modelo estadístico para el diseño utilizado fué el siguiente

$$Y_{ij} = \mu + \beta_i + T_j + ?_{ij} \quad \text{donde:}$$

Y_{ij} = observaciones individuales;
 μ = media poblacional;
 β_i = efecto del bloque i;
 T_j = efecto del tratamiento;
 $?_{ij}$ = error experimental.

Cuadro 4. Resumen de datos importantes en los ensayos de fertilización.

Operación	Identificación del ensayo	Lote	Procedencia	Fecha establecimiento	1/ Fecha fertilización	1ra. Med.	Edad (mes después aplic.)	2da. Med.	Edad (mes después aplic.)	3ra. Med.	Edad (mes después aplic.)	4ta. Med.	Edad (mes después aplic.)	5ta. Med.	Edad (mes) después aplic.)
Las Pavas	Exp. 039	201	T&T	25/08/1999	26/06/2001	26/06/2001	23	13/02/2002	30 (7)	13/08/2002	36 (13)	07/02/2003	42 (19)		
Las Pavas	Exp. 040	201	T&T	25/08/1999	26/06/2001	26/06/2001	23	13/02/2002	30 (7)	07/08/2002	36 (13)	05/02/2003	42 (19)		
Las Pavas	Exp. 041	20	T&T	20/06/2001	27/06/2001	07/11/2001	5	13/02/2002	8 (3)	27/08/2002	15 (10)	06/02/2003	20 (15)		
Las Pavas	Exp. 042	18	T&T	18/07/2000	28/06/2001	07/11/2001	5	13/02/2002	8 (3)	27/08/2002	15 (10)	06/02/2003	20 (15)		
La Represa	Exp. 043	159	T&T	18/07/2000	28/06/2001	28/06/2001	12	07/11/2001	16 (4)	13/02/2002	19 (7)	01/8/2002	25 (13)	10/02/2003	31 (19)
Santa Clara	Exp. 044	104	T&T	18/07/2000	29/96/2001	29/06/2001	12	07/11/2001	16 (4)	13/02/2002	19 (7)	01/8/2002	25 (13)	11/02/2003	31 (19)
Santa Clara	Exp. 075	166	T&T	15/07/2002	15/07/2002	01/08/2002	1	12/02/2003	7 (6)						
Las Pavas	Exp. 076	28	CV	01/08/2002	01/08/2002	01/08/2002	1	05/02/2003	7 (6)						
Santa Clara	Exp. 077	114	T&T	15/06/2002	15/06/2002	01/08/2002	2	12/02/2003	8 (6)						
Santa Clara	Exp. 078	112	CV	15/07/2002	15/07/2002	01/08/2002	1	07/02/2003	7 (6)						

Observaciones: n=24; T&T=Procedencia Trinidad y Tobago. CV=Carta Vieja.

1/. Fecha de aplicación de la fertilización al momento de la siembra.

Números entre paréntesis significan las diferencias en meses, entre la edad en meses de la segunda, tercera y última edad de medición, respecto a la primera edad de la primera medición.

5.3.1.3.1. Establecimiento de los ensayos

Cada ensayo, dependiendo de los bloques(repeticiones) y tratamientos, tuvo una parcela neta de 9 árboles y un sentido de medición en campo de los árboles, que se encuentra descrito en los detalles de cada ensayo.

Inicialmente al momento de la siembra de las plantaciones se les aplicó dos onzas por árbol del fertilizante químico (15-3-24) + dos onzas de Roca fosfórica, para un total de 4 onzas (aproximadamente 140 gramos). Aproximadamente al año de estas establecidas las plantaciones, se establecieron los ensayos de fertilización, para lo cual fueron seleccionados los sitios. En el cuadro 5, se resumen los diferentes tratamientos establecidos, indicando las fórmulas químicas y orgánicas, así como las dosis empleadas. A los ensayos (039 y 040) se les hizo una aplicación denominada “nivelación”, la cual consistió en aproximadamente 70 gramos de una mezcla de NPK10-30-10+Magnesamon, para que los suelos tuvieran las mismas condiciones para recibir las aplicaciones de los otros tratamientos. En éstos mismos ensayos se establecieron dos tratamientos donde se hizo manejo de rebrotes. En los otros ensayos se decidió dejar el tratamiento testigo sin aplicación alguna. La información de cada ensayo y tratamientos incluidos se muestran a continuación.

Cuadro 5. Descripción de los ensayos y tratamientos utilizados.

Ensayos 039, 040
Tratamientos Testigo con Nivelación (15-3-24+Roca Fosfórica=70g) Rebrote+Nivelación(70g)+NPK10-30-10(100g) Rebrote+Nivelación(70g) Nivelación(70g)+NPK10-30-10(100g)+Magnesamon(100g) Nivelacion(70g)+NPK(100g) Compost(2kg/árbol)
Ensayos 041, 042, 043 y 044
Tratamientos Testigo sin fertilizacion NPK-Abotec(100g)+Roca Fosfórica(100g) Compost (2kg/árbol) NPK10-30-10(100g)+Magnesamón(100g) Roca Fosfórica(100g)+Magnesampon(100g)
Ensayos 075, 076, 077 y 078
Tratamientos Testigo sin fertilización NPK-Abotec(100g)+Roca Fosfórica(100g) Magnesamón(200g) NPK10-30-10(100g)+Magnesamón(100g) Roca Fosfórica(100g)+Magnesamón(100g) Compost(2kg/árbol) Cal agrícola (500g)

5.3.1.3.2. Medición de ensayos

En cada ensayo a todos los árboles vivos, se les midió la altura total en metros, el diámetro a la altura del pecho, en centímetros y la respectiva observación (anotación) de su estado fitosanitario y de forma, anotando los respectivos valores e información en el formulario para tal propósito contenidos dentro de la metodología del sistema Mirasilv recomendada por (Ugalde 2003). Luego de realizadas todas las mediciones con equipo y personal capacitado, los valores se ingresaron al programa Mirasilv (Ugalde 2003), el cual generó los promedios de las variables que éste procesa.

5.3.1.3.3. Análisis e interpretación de los datos

Para el análisis estadístico para los experimentos de fertilización, se exportaron los valores promedio por parcela generados por Mirasilv (Ugalde 2003) hacia Excel, con el propósito de disponer de toda la información para poder seguir con el trabajo de gabinete. El paso siguiente fue seleccionar los valores de las variables altura total promedio (m), Dap(cm), área basal (m^2/ha), Volumen (m^3/ha) y sobrevivencia(%) y ordenarlos según la edad, es decir, las edades a las cuales fueron efectuadas las distintas mediciones. Seguidamente y utilizando las herramientas de Excel se ordenaron los datos restando los valores de cada tratamiento (identificados por el nombre del color) y haciendo columnas mostrando la diferencia entre segunda edad respecto a la edad de la primera medición. Luego la edad de la tercera medición menos la edad de la primera medición, y así la cuarta medición se restó de la primera medición. De esta forma se obtuvieron las diferencias promedio entre las diferentes edades de las mediciones efectuadas. Es decir, se obtuvieron los valores de los incrementos periódicos delimitados por las edades obtenidas en cada diferencia. Para el caso del tratamiento que incluyó "rebrotos", se consideraron los valores netos de las variables medidas, restando la última medición de la primera medición, procediendo a hacer con éstos también los respectivos análisis de varianza.

Luego las columnas identificadas por un nombre abreviando la variable, el ensayo y la diferencia en número de meses, se copiaron en una hoja Excel y fueron importados en el programa Systat versión 10, con el cual, utilizando los comandos del Modelo Lineal General (procedimiento GLM) se obtuvieron las salidas del análisis de varianza, prueba de hipótesis y comparación de medias y probabilidad Tukey. Con la misma información

contenida en Excel, se procedió a considerar el valor del tratamiento testigo como el 100% (porcentaje), con el objetivo de visualizar en que porcentaje se vieron incrementados los árboles de determinado tratamiento.

Para una interpretación estándar se tomó como referencia la edad de la plantación desde la cual se obtuvo la diferencia, es decir por ejemplo: la edad a la cual en Mirasilv se registraron las diferentes mediciones. En el cuadro 4, se aprecian las edades (puestas entre paréntesis) con las cuales se utilizará como referencia en la discusión, toda vez éstas indican el período al cual se obtuvieron las diferencias de las variables evaluadas.

5.3.1.4. Análisis de suelos

El muestreo de suelos se hizo en las 36 PPM resultantes del diseño de muestreo ya identificado y ubicadas en los lotes de plantaciones, en las cuales se hizo una calicata. Esta se hizo en el centro de cada parcela con las dimensiones, 1.00 m de ancho, 1.00 m de largo y 1.00 m de profundidad, aproximadamente. Se tomaron muestras en las paredes, considerando las siguientes profundidades: la primera de 0–20 cm, la segunda de 20–40 cm y, una tercera de 40,0 cm en adelante. Se hace notar que otros estudios como el de Vásquez y Ugalde (1994) consideraron solamente una profundidad de 0-20 cm., mientras que Vallejos (1996) consideró dos profundidades: de 0-20 cm. , y de 20-40 cm. De la muestra se obtuvo exactamente de las paredes de cada calicata a la mitad del rango de la profundidad, es decir, en la primera profundidad a los 10 cm., en la segunda profundidad a los 30 cm y en la tercera profundidad a los 50 cm, mezclando cada muestra y colocándola dentro de una bolsa de plástico debidamente rotulada. De esta se tomó una submuestra de suelo, de la cual se obtuvieron valores provenientes de otro laboratorio, para verificar si los valores proveerían gráficamente una similar tendencia.

5.3.1.5. Análisis del follaje

El muestreo foliar provino también de cada PPM considerada para el muestreo de los suelos. Dicha muestra estuvo conformada por hojas de 5 a 10 árboles caracterizados como los dominantes y codominantes, ubicados cercanos al centro de la parcela. La muestra en cada árbol se tomó del tercio superior de la copa viva, iluminadas por completo y libres de daños o enfermedades. Ambas muestras (suelo y follaje) se enviaron al laboratorio del CATIE en Costa Rica, para su análisis químico y físico completo.

5.3.1.6. Variables consideradas en el estudio

5.3.1.6.1. Variables de los árboles

Estas se tomaron directamente de los árboles en cada parcela y se registraron en los formularios que posteriormente se ingresaron al sistema Mirasilv (Ugalde 2003). Estas fueron:

- ☒☒ Altura total en metros
- ☒☒ Diámetro a la altura del pecho en centímetros

A partir de éstas y a la obtención de información adicional de cada parcela, se estimaron y obtuvieron las siguientes variables:

- ☒☒ Edad de la plantación en meses
- ☒☒ Número inicial de árboles plantados por hectárea (N1)
- ☒☒ Número actual de árboles plantados por hectárea (N2)
- ☒☒ Índice de Sitio (IS) a una edad base de 10 años (según Vallejos y Ugalde 1996)
- ☒☒ Altura dominante (AltDom) m.
- ☒☒ Área basal en metros cuadrados por hectárea (AB) en m^2/ha
- ☒☒ Diámetro a la altura del pecho (Dap) en cm.
- ☒☒ Altura total promedio (AltTotPr) m.
- ☒☒ Incremento medio anual en altura dominante (IMAAltDom) m/año.
- ☒☒ Incremento medio anual en altura total (IMAAltTot) en m/año
- ☒☒ Incremento medio anual en área basal (IMAAAB) expresado en $m^2/ha/año$.
- ☒☒ Incremento medio anual en volumen (IMAVol) expresado en $m^3/ha/año$.
- ☒☒ Incremento medio anual en diámetro a la altura del pecho (IMADap) expresado en cm/año.
- ☒☒ Porcentaje de Supervivencia (Supervivencia)
- ☒☒ Incremento medio anual en altura total "relativo" (% , IMAAltTot_Relativo) calculada una vez se dispuso de su variable original.
- ☒☒ Volumen total con corteza, cuya fórmula está en la base de datos del Sistema Mirasilv (Ugalde 2003), utilizando un factor de forma 0.45.

5.3.1.6.2. Variables fisiográficas

- ☒☒ Posición topográfica (PTOP)
1 = cima, 2=pendiente media, 3=pendiente inferior y 4= fondo plano
- ☒☒ Drenaje (DREN)
1= libre y 2= impedido
- ☒☒ Pedregocidad (PEDRE): 0= No hay información; 1=Poca (1-10%); 2=Media (10-30 %) y 3=Alta (> 30%)
- ☒☒ Erosión (ERO)

- 1=ninguna, 2=moderada, 3=severa y 4= muy severa
- ☒☒ Pendiente en porcentaje (PEND)
 - ☒☒ Aspecto (ASPEC), 1=Norte, 2=Este, 3=Sur, 4=Oeste, 5=Llano, 6=Noreste, 7=Noroeste, 8=Sureste, 9=Suroeste.
 - ☒☒ Viento (VIENTO), 1=Poco viento, no afecta el crecimiento, 2=Moderado, afecta poco el crecimiento y 3= Muy severo, afecta el crecimiento
 - ☒☒ Profundidad efectiva del suelo, en cm (uso del barreno).

5.3.1.6.3. Variables del suelo

El análisis en laboratorio fue implementado en cada una de las variables de la siguiente manera: La extracción en Olsen Modificada pH8.5, para la determinación de K, P, Cu, Zn, Mn y Fe. La extracción en Cloruro de Potasio 1N para la determinación de Ca, Mg y Acidez Extraíble (o Aluminio Al). El pH en agua y la materia orgánica a través del método de Walkley y Black. Así mismo la textura por medio de la Granulometría por el método de Bouyucos, con lecturas iniciales a los 40 segundos y finales a las 2 horas. Las otras variables se derivaron de las fórmulas contenidas en la Guía para la interpretación de análisis de suelo utilizada por CATIE.

Las variables analizadas fueron: pH, acidez extraíble, en $\text{cmol}(+)/\text{l}$ (o aluminio "Al"), textura en porcentajes, materia orgánica (MO) en %, contenido de calcio(Ca) en $\text{cmol}+/\text{l}$, contenido de magnesio (Mg) $\text{cmol}(+)/\text{l}$, contenido de potasio (K) en $\text{cmol}(+)/\text{l}$, adición de bases, es decir, la suma del contenido de calcio, magnesio y potasio, contenido de fósforo (P) en mg/l , hierro (Fe) en mg/l , manganeso (Mn), en mg/l , cobre (Cu) en mg/l , zinc (Zn) en mg/l , compactación por medio de un penetrómetro (libras/pulgada cuadrada).

A partir de las anteriores variables se generaron las otras necesarias para apoyar el análisis e interpretación de los datos. Tal es el caso de las nuevas variables, el porcentaje de saturación del acidez extraíble y porcentaje de saturación de calcio, calculados en base a la fórmula: $(\text{Acidez extraíble} / \text{CICE}) \times 100$ y $(\text{Calcio} / \text{CICE}) \times 100$.

5.3.1.6.4. Variables del follaje

Para lograr el análisis de estas variables el laboratorio de CATIE utilizó la metodología de digestión húmeda con mezcla de ácidos nítrico-perclórico 5:1. Por lo que para la determinación de calcio, magnesio, potasio, cobre, manganeso y el hierro se utilizó la absorción atómica, mientras que para la obtención del Fósforo fue por medio del método calorimétrico del extracto de digestión nítrico-perclórica.

5.3.2. Labores de oficina

La etapa de gabinete posterior u oficina consideró las siguientes actividades:

5.3.2.1. Generación y depuración de base de datos

La base de datos de mediciones silviculturales y de sitio, se ingresó al sistema Mirasilv (Ugalde 2003) de la información contenida en los formularios del mismo sistema, obtenida de las mediciones de campo.

En el caso de las mediciones de los ensayos de fertilización, se hizo una comprobación de campo, luego de verificar que no hubieran errores en relación a la última medición. Para lo cual se volvió al campo y se verificaron solamente aquellos ensayos en los cuales se detectó anomalías, las cuales se corrigieron.

La depuración consistió en base al análisis Figura y observación de valores fuera de la tendencia en las salidas del software Systat versión 10.

5.3.2.2. Caracterización de la productividad

Se caracterizó la productividad para la especie, en base al diseño de muestreo y los escenarios producidos por éste, clasificando en base a las variables generadas por el Mirasilv (Ugalde 2003), cuyos valores se contemplan en el informe de promedios de crecimiento por parcela.

5.3.2.3. Relación del índice de sitio y variables de sitio, edáficas y foliares

Considerando el diseño de muestreo propuesto, el cual permitió disponer de nueve diferentes escenarios de desarrollo de la especie, se utilizó toda la información disponible de las variables consideradas.

Con toda esa base de datos se procedió a generar las matrices de correlación entre el Índice de Sitio (IS) y el grupo de variables de sitio, edáficas y foliares a cada profundidad muestreada. Solamente para el caso de las variables edáficas, se identificaron por ésta

seguido de un número correlativo que identifica a la profundidad, desde la primera (0-20 cm), segunda (20-40 cm) y tercera (>40 cm). La meta de tener la matriz fue para poder definir las variables que presentan una mejor correlación lineal, con un valor $-p$ -aceptable estadísticamente y que tuvieran una relación causal entre las mismas.

Los modelos que se generaron se obtuvieron proveniente de los valores de las variables de sitio y suelo a la primera profundidad del suelo (0-20 cm) y a esta misma profundidad, pero filtrando por medio de la variable pH, de aquellos sitios hasta un nivel de pH=5.5. Una vez seleccionadas las variables a través de la regresión lineal múltiple con el procedimiento estadístico "stepwise", se procedió a obtener las estimaciones de los coeficientes obtenidos con otras tendencias como la logarítmica, cuadrática y otras, para averiguar si se mejoraban los indicadores estadísticos.

6. Resultados y Discusión

6.1. Análisis estadístico del diseño de muestreo

A continuación se presentan los resultados de los análisis de la relación de crecimiento de teca con variables de sitio, suelo y follaje.

De acuerdo al diseño experimental utilizado y a la metodología descrita por Vásquez y Ugalde (1995), las variables-factores se agruparon y se relacionaron entre si, de manera que se pudieron obtener nuevas unidades denominadas escenarios, constituidos por los valores promedio de las cuatro repeticiones.

De los análisis de varianza considerando el índice de sitio (IS), porcentaje de pendiente, incremento medio anual en altura total (IMAAItTot), incremento medio anual en altura dominante (IMAAItDom), incremento medio anual en diámetro a la altura del pecho (IMADap), incremento medio anual en área basal (IMAAB), e incremento medio anual en volumen (IMAVol) como variables dependientes en cada caso específico y, los tratamientos y repeticiones como variables independientes, se obtuvieron los resultados que se resumen en el siguiente cuadro.

Cuadro 6. Resumen de significancia estadística alcanzada por el IS, la pendiente y las variables de crecimiento.

Variable de respuesta	Significancia alcanzada, valor $-p-$	
	Tratamientos	Repeticiones
Índice de sitio	0.003 **, $r^2=0.56$	NS
Pendiente	0.000 **, $r^2=0.81$	NS
IMA Altura Total	0.001 **, $r^2=0.86$	NS
IMA Altura Dominante	0.000 **, $r^2=0.81$	NS
IMA Dap	0.000 **, $r^2=0.81$	NS
IMA Área basal	0.002 **, $r^2=0.57$	NS
IMA Volumen	0.000 **, $r^2=0.69$	NS

Entre el IS y las variables independientes, así como considerando como variable dependiente cada una de los incrementos medios anuales, se alcanzaron diferencias

estadísticas altamente significativas al 1% entre tratamientos. El mismo resultado se obtuvo cuando la pendiente fue considerada como variable dependiente. Cuando se consideraron las clases de crecimiento como variables independientes y el IMA en volumen como dependiente, se halló que existen altas diferencias estadísticas significativas entre tales clases, al 1%. De la muestra (n=36), todas las variables (IS, pendiente e incrementos medios anuales) se observa que entre un 56% a un 81%, los valores se adaptan al modelo, o en otras palabras, explican la variable respuesta, que existen diferencias estadísticamente significativas entre los tratamientos.

Cuadro 7. Resumen de los tratamientos con relación a los promedios de crecimiento y productividad.

ESCENARIO	EDAD	IS	IMAItDom	IMAItTot	IMADap	IMAAB	IMAVol	Sobrev
	(meses)	m	(m/año)	(m/año)	(cm/año)	(m2/ha/año)	(m3/ha/año)	(%)
CBPB	39	12.90	2.33	1.73	1.98	0.43	3.16	97
CBPM	40	12.35	2.29	1.71	1.94	0.44	2.90	94
CBPA	42	15.05	2.79	2.00	2.07	0.53	4.26	97
CMPB	36	15.15	3.41	2.63	2.72	0.65	6.53	96
CMPM	36	15.83	3.63	2.90	2.95	0.79	8.34	93
CMPA	36	15.18	3.44	2.67	2.65	0.66	6.33	89
CAPB	29	16.45	4.55	3.96	3.90	1.03	13.33	86
CAPM	31	16.78	4.43	3.62	3.56	0.87	10.28	86
CAPA	33	18.20	4.34	3.58	3.56	0.94	12.18	94

Nomenclatura: CBPB, Crecimientos Bajos y Pendientes Bajas; CBPM, Crecimientos Bajos y Pendientes Medias; CBPA, Crecimientos Bajos y Pendientes Altas; CMPB, Crecimientos Medios y Pendientes Bajas; CMPM, Crecimientos Medios y Pendientes Medias; CMPA, Crecimientos Medios y Pendientes Altas; CAPB, Crecimientos Altos y Pendientes Bajas; CAPM, Crecimientos Altos y Pendientes Medias; CAPA, Crecimientos Altos y Pendientes Altas.

El cuadro 7, se muestra que partiendo de la variable incremento medio anual en altura total, fue posible estratificar las plantaciones de una n=36, observando que dicho procedimiento permite identificar claramente las diferencias entre los valores promedio, apoyado por las diferencias estadísticas vistas en el cuadro 6.

6.2. Variaciones en la acidez de los suelos en todos lo sitios

La guía de interpretación de suelos que utiliza el CATIE, elaborada para diagnosticar los requerimientos nutricionales para cultivos agrícolas, requiere ser ajustado para este fin con especies forestales, cuyos requerimientos son diferentes y la información es escasa. En la presente investigación el diseño de muestreo permitió obtener valores de nutrimentos individuales para cada sitio, considerando oportuno interpretar en base, a las condiciones observadas a nivel de campo en cada sitio en primera instancia a la primera

profundidad del suelo (0-20 cm), debido a que en la tendencia general es que las concentraciones disminuyen conforme se profundiza en el perfil del suelo.

Para complementar la interpretación de la variación de las propiedades del suelo, se hace necesario considerar la variación de los elementos foliares en las hojas de la teca, ya que en este tipo de tejido, existe mayor información sobre las concentraciones y estado nutricional (Bertsch 1995, Drechsel y Zech 1991).

6.2.1. Variación en los niveles de pH

Con relación al pH presente en el suelo, a la primera profundidad (0-20 cm), los valores oscilan desde 5.23 hasta 5.95; es decir, si se considera un pH superior a 5.5 como aquel en el cual la disponibilidad de elementos esenciales es adecuada (Bertsch 1995), hay problemas en los escenarios CBPB, CBPM y CMPB (con promedios, 5.33, 5.23 y 5.35), mientras que a la segunda y tercera profundidad, presuntamente habrían problemas en los escenarios CBPB, CBPM, CBPA, CMPB, CMPM, CMPA y CAPA, por encontrarse por debajo de dicho nivel ($pH < 5.5$). En el anexo 07, se observan los promedios de pH respecto a su variación en las profundidades consideradas, en las cuales debe ponerse atención, cuando los valores promedios son mayores o menores a $pH 5.5$.

De los sitios analizados, a la primera profundidad del suelo (0-20 cm), un 44% de los sitios se ubican por debajo de un $pH=5.5$, en una tendencia positiva que a mayor nivel de pH, la población de sitios se ubica en la clase de crecimiento medio a alto. El rango reportado por Alvarado¹, $pH 5.9$ a 6.37 , indica que los sitios estudiados se ubican en clases de crecimiento medio a alto. La situación general es que, conforme el pH del suelo disminuye con la profundidad, la otra variable, el porcentaje de saturación de acidez (que se discute mas adelante) tiende a incrementar con la profundidad es de esperar que conforme el crecimiento radical de los árboles alcance mayor profundidad, los problemas de crecimiento (IMAAItTot e IMAVol), se presenten en los sitios con suelos más ácidos.

A la primera profundidad (0-20 cm), se encontró que aún con niveles menores $pH 5.5$, se puede obtener incrementos anuales en IMAVol hasta aproximadamente $14 m^3/ha/año$, sin embargo con niveles de mayores $pH 5.5$, los incrementos pueden ser mayores a 20

¹ Comunicación personal Dr. Alfredo Alvarado. Centro de Investigaciones Agropecuarias (CIA), Universidad de Costa Rica.

tendencia es negativa y contundente sobre el papel que dicha variable tiene respecto a definir las clases de crecimiento.

Figura 3. Relación IMAItTot y el % de saturación de acidez extraíble, a la primera profundidad (0-20 cm).

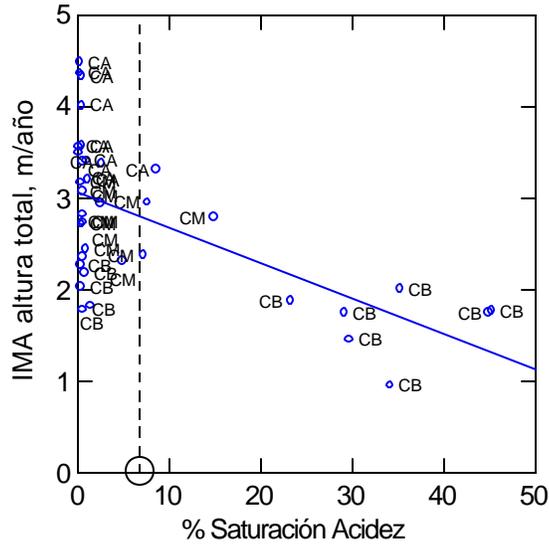
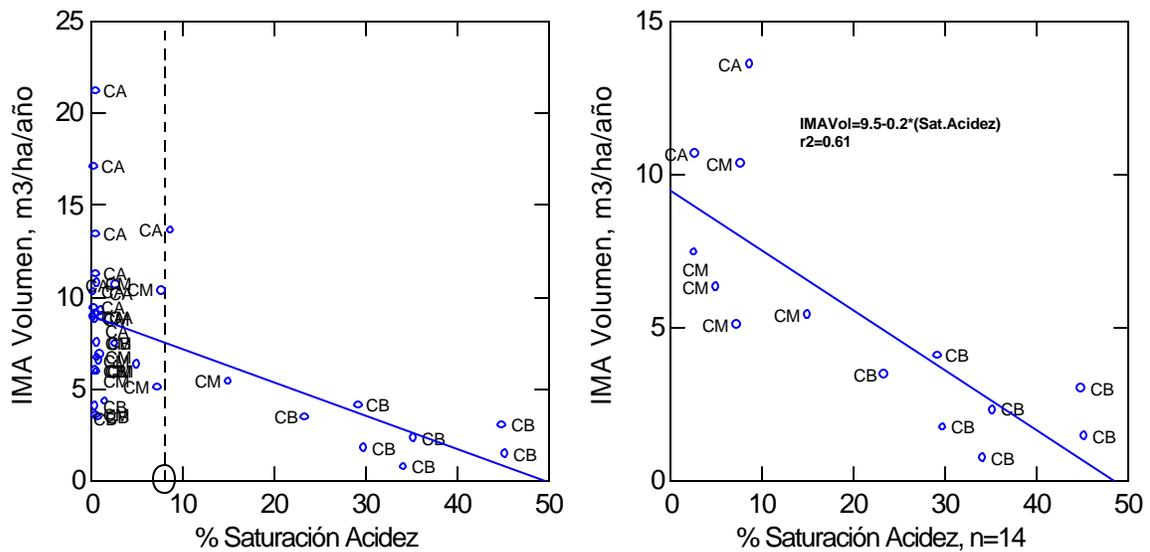


Figura 4. Relación IMAVol y el % de saturación de acidez extraíble, a la primera profundidad (0-20 cm).



Es importante resaltar el coeficiente de determinación (r^2) cuando se plotean valores de IMA en volumen como variable dependiente con todos los sitios estudiados y solamente con sitio con pH menores que 5.5, puede alcanzar valores de $r^2=0.61$, con una muestra

n=14, lo cual podría convencer aún más que dicha variable puede explicar los crecimientos bajos en suelos ácidos.

6.3. Variaciones en las Bases intercambiables de los suelos

6.3.1. Variaciones en las concentraciones de calcio (Ca)

La teca es una especie con altos requerimientos de calcio en el suelo, para satisfacer sus necesidades fisiológicas. En Guanacaste Costa Rica, donde los contenidos de éste nutrimento superan los 20 cmol+/l (Berstch 1995, Vázquez y Ugalde 1994) encontraron que cuando estos valores fueron menores a 10 cmol+/l se vio afectado el crecimiento de la teca. Otros autores, Vallejos (1996) y Montero (1999), al correlacionar el IS con dicho nutrimento, encontraron que a mayor calcio mayor era el IS, bajo condiciones de Guanacaste, por lo que los requerimientos mínimos de calcio para el caso de la teca son bastante importantes.

En los sitios estudiados, cuando el crecimiento de la teca es medio y alto, el contenido de calcio en el suelo es suficiente y dependiente inversamente proporcional a la pendiente. Considerando las variables IMA altura total e IMA en volumen como variables dependientes, se encontró que aproximadamente entre 8-10 cmol+/l como mínimo se requieren para lograr que los crecimientos sean de medio a altos. La variación de las concentraciones se puede apreciar en el anexo 09, donde se observa la dependencia de la pendiente, a las profundidades estudiadas.

6.3.2. Variaciones en el porcentaje de saturación de calcio

A la primera profundidad, 0-20 cm, (Figuras 5 y 6), un 58% de los sitios estudiados se ubican en la clase de crecimiento alto y algunos medios, a partir de un límite aproximado de un 40% de saturación de calcio, habiendo considerado el IMA en volumen como variable dependiente. Alvarado y Fallas (2003), encontraron que éste valor debía partir de un 67.5%, para el caso de suelos ácidos para el norte de Costa Rica, utilizando como variable de respuesta el incremento medio anual en altura.

Figura 5. Relación IMAItTot y saturación de calcio, a la primera profundidad (0-20 cm).

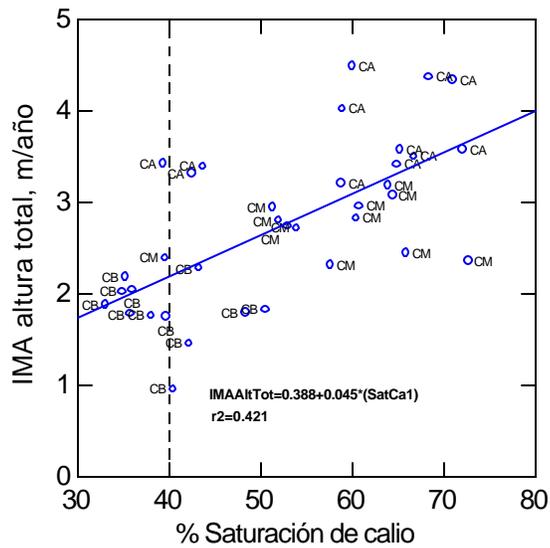
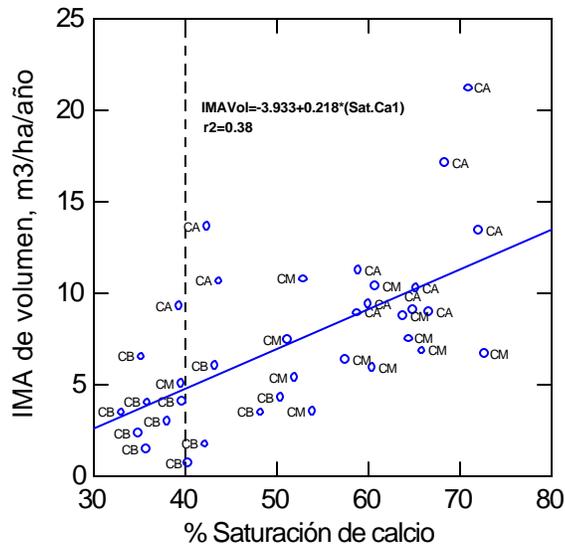


Figura 6. Relación IMAVol y saturación de calcio, a la primera profundidad (0-20 cm).



A una segunda (20-40 cm) y tercera profundidad del suelo (?40 cm), las variaciones en las concentraciones de calcio (Anexo 11), en las profundidades estudiadas, considerando los sitios en los escenarios identificados como CAPB, CAPM y CMPM (a segunda profundidad 20-40 cm) y, en los sitios de los escenarios CAPM y CMPM (a tercera profundidad ?40 cm), podrán continuar suministrando adecuadas cantidades de calcio. En el anexo 10 se puede apreciar como es la situación actual cuando relacionamos la saturación de calcio como variable dependiente y la saturación de acidez como variable

independiente, mostrando una clara tendencia negativa que mientras menor sea ésta última, se tendrá una amplia variación de sitios con saturación de calcio.

Hasta aquí nótese que con solamente los valores de pH y Acidez extraíble y el porcentaje de saturación de acidez y calcio, es posible observar como los escenarios se delimitan y marcan la diferencia respecto a las clases de crecimiento previamente definidas. En especial y en este mismo sentido, también en el anexo 11, se aprecia como se ubican gráficamente los valores del índice de sitio como variable dependiente, respecto al % de saturación de acidez, como variable independiente, en los cuales se aprecia que mientras menor sea el % de saturación de acidez, existe un amplio rango para valores de índice de sitio.

De acuerdo con Alvarado y Fallas (2003), los síntomas en los árboles de teca causados por altas concentraciones de acidez extraíble (o aluminio –Al-), se evidencian en una reducción del crecimiento ortotrópico (segmentos de crecimiento muy cortos y entre nudos muy cercanos en la sección apical), así como un amarillamiento generalizado de los ápices. También, es posible observar en la parte inferior del follaje hay hojas necrosadas en los bordes, debido a la baja fertilidad del suelo. Aunque en casos extremos pueden prosperar con mayor facilidad microorganismos oportunistas, causales de la muerte descendente de los mismos. La mayor incidencia del problema ocurre en las laderas erosionadas.

6.3.4. Variaciones en las concentraciones de magnesio (Mg)

Para el caso del magnesio (Mg), los sitios muestran que los promedios no tienen una tendencia definida, es decir, existen crecimientos bajos, medio y altos en similares condiciones de concentración del nutrimento presente en el suelo. En forma gráfica no muestran tendencia del nutrimento respecto a las clases de crecimiento establecidas. La situación es interesante cuando se compara el valor de la saturación de acidez (%) y los contenidos de magnesio a la primera profundidad (0-20 cm), en la cual encontramos que, los contenidos de magnesio están condicionados a la saturación de acidez, cuya tendencia es que mientras menor sea la saturación de acidez, mayores serán las concentraciones de magnesio, para que los suelos logren rendimientos de medios a altos. Mientras que los crecimientos bajos son característicos de saturaciones mayores al 10% y

concentraciones de magnesio menores al mencionado. La variación de este nutriente a esta profundidad se muestra en el anexo 12.

A segunda (20-40 cm) y tercera profundidad del suelo (?40 cm), a pesar de que también no se observa una tendencia bien definida, sino un confinamiento de los escenarios en concentraciones mayores a 10 cmol+/l, la distribución de los sitios y clases de crecimiento continua siendo homogénea, es decir, tanto escenarios de crecimiento bajo, medio y alto, se localizan dispersos con relación a la productividad.

6.3.5. Variación del potasio (K)

El nutrimento potasio (K) había sido reportado por Vásquez (1999), quien encontró que el fósforo era bajo, vinculándolo con la situación que el potasio encontrado estaba en contenidos de medio a bajo, estando el fósforo desequilibrado con respecto al calcio y magnesio, por lo que éste autor consideró importante indicar que debe agregarse fósforo en forma de fertilizante. Ambos nutrimentos de acuerdo con Diaz Romeu y Hunter (1978) aparecen desde un 89 hasta un 100% de un nivel crítico a deficiente. Por lo que, considerando los promedios en los sitios estudiados, no existe razón para deducir que los crecimientos y los escenarios sean diferentes dados los niveles encontrados, solamente que la tendencia en cuanto al contenido es que disminuyen conforme se profundiza en el horizonte del suelo. De nuestro análisis se puede concordar con lo concluido y recomendado por Vásquez (1999), que ambos elementos, potasio y fósforo, se encuentran por debajo del nivel crítico y siendo los niveles críticos aproximados de 4.5 mg/l y 0.5 mg/l, respectivamente, (Anexo 13 y 14), y que por lo tanto es necesario incorporarlos al suelo en forma de fertilizante.

6.4. Situación del cobre (Cu), manganeso (Mn), zinc (Zn) y hierro (Fe)

En cuanto a los elementos: cobre (Cu), las variaciones en las concentraciones (anexo 15) son altas, es decir, los contenidos son lo suficientemente aceptables, siendo el nivel crítico estimado en forma aproximado equivalente a 2 mg/l. En el caso del zinc (Zn), hasta un 89% los niveles se consideran en nivel crítico y hasta un 14% en nivel óptimo, cuyas variaciones se aprecian en el anexo 16, con un nivel crítico aproximado de 7 mg/l. Con relación al manganeso (Mn), los niveles se consideran altos hasta en un 67% a la primera profundidad, siendo posiblemente el nivel crítico de 3 mg/, con sus variaciones por

escenarios estudiados (anexo 17). En tanto que el hierro (Fe), hasta en un 67% a tercera profundidad se encuentran también en niveles altos, de acuerdo a la variación en las concentraciones (anexo 18). Tales concentraciones disminuyen (Mn y Fe) y aumentan (Cu, Zn) conforme se profundiza en el horizonte del suelo. Lo importante es saber por ejemplo, que en suelos muy ácidos con un pH 3.5 a 5.0 las concentraciones de Mn^{+2} son cantidades de iones tóxicas muy desfavorables para la absorción (Kass 1996) y en general hemos encontrado que las concentraciones de acidez extraíble y su correspondiente porcentaje de saturación delimitan los crecimientos en cada uno de los escenarios y sitios.

6.5. Variación de otras variables

En cuestión de materia orgánica (MO), los contenidos disminuyen considerablemente conforme se pasa de la primera profundidad del suelo, (0-20 cm, pudiendo apreciar las variaciones a esta profundidad en el anexo 19, en tanto a la segunda (20-40 cm) y hasta la tercera profundidad (>40 cm), disminuye significativamente, con 4.03%, 1.68% y 0.94%, respectivamente. Esto afecta enormemente la disponibilidad de fauna microbiana en los procesos intrínsecos dentro del subsuelo.

Con relación a la capacidad de intercambio catiónico efectiva (CICE), los valores encontrados muestran que a una primera profundidad (0-20 cm) éstos son bajos en clases de crecimiento bajo y aumentan conforme se ubican en crecimiento medio y alto, con excepción del escenario CAPA donde el valor es menor comparado a los otros escenarios de crecimiento alto. A una segunda y tercera profundidad la tendencia continúa siendo la misma y los valores aumentan conforme se profundiza en el suelo. En promedio los valores vienen desde 16.6 hasta 37.17 en la primera profundidad (0-20 cm), de 19.70 a 42.94 en la segunda (20-40 cm) y desde 19.58 a 45.01 en la tercera profundidad (>40 cm). En general dichos valores no pasan de 50%, lo que significa empobrecimiento en bases intercambiables, confirmando que estos suelos pertenecen a suelos catalogados como Dystro o Distrandepts, dentro del orden Inceptisol, éste último encontrado en un 29.2% del total del área donde se encuentra establecida la teca. Es decir que parte de los suelos en condiciones de CICE >50% pertenecen a esta clase de suelos.

En seguida analizando la saturación de bases, los valores encontrados a primera profundidad (0-20 cm) comienzan siendo bajos en los escenarios de crecimiento bajo, y suben hasta un 99% en condición de suelos con crecimientos altos. A segunda y tercera profundidad, 20-40 y >40 cm, respectivamente, tales porcentajes disminuyen, visualizando que dicha disminución concuerda con la condición encontrada respecto a los valores de la CICE. Los valores relativamente altos de saturación de bases (mayores a 70%), se mantienen en los escenarios de crecimiento medio a alto, concordando esto con un porcentaje bajo de saturación de acidez (menor a 10% e inclusive del 15% de sitios con crecimientos medios a altos) respecto a valores de entre 30 y 50 de CICE.

En cuanto a la textura, a la primera y segunda profundidad, 0-20 y 20-40 cm, respectivamente, los suelos con pocas excepciones, un 87% son arcillosos y un 13% franco-arcilloso. A la tercera profundidad, >40 cm, baja a un 80% suelos considerados como arcillosos y suben a 20% los franco-arcillosos. Algunos perfiles sufren la transformación de su estructura, de arcilloso a franco-arcilloso, tal es el caso en algunas repeticiones de los escenarios CBPB, CBPA, CMPA, CAPB, CAPA.

Se tuvo en cuenta la variable conductividad eléctrica (CE) la cual de acuerdo a experiencias de IDIAP³, en el uso de dicha variable y su interpretación, que en nuestro caso, a una primera profundidad (0-20 cm) solamente en el escenario CBPA no existe peligro de salinidad. Sin embargo los otros escenarios cuyos valores superaron el mínimo (0.80 Mmhos/cm), deben considerarse levemente salinos, es decir, propensos a que se tengan en el futuro problemas por salinidad. A una segunda y tercera profundidad, 20-40 y >40 cm, respectivamente, los escenarios CBPA y CMPM son los que quedan fuera de peligro, mientras que los otros continuarán siendo propensos.

Para el caso de la interpretación de los valores de la densidad aparente (DANAPAR) éstos comprueban que los valores encontrados indican que esta variable se encuentra normal en todas las parcelas que se muestrearon.

³ Comunicación personal con el Lic. José Villareal, laboratorio del IDIAP; Divisa, Panamá.

6.6. Correlación entre variables a la primera profundidad 0-20 cm

De la matriz correspondiente se observa que las variables silvícolas altura dominante (AltDom), diámetro a la altura del pecho (Dap), área basal (AB), volumen (Vol), incremento medio anual en volumen (IMAVol) y edad en meses, lograron una probabilidad estadística altamente significativa al 1% ($p=0.000$), correlacionando con otras variables como el incremento medio anual en altura total (IMAAItTot), incremento medio anual en altura dominante (IMAAItDom), Dap, incremento medio anual en Dap (IMADap), AB e incremento medio anual en área basal (IMAAB).

De las variables seleccionadas por el procedimiento modelo general lineal, las variables concentración de acidez extraíble, saturación de acidez y saturación de calcio y el hierro, alcanzan una probabilidad estadística altamente significativa, al 1%, 4%, 5%, 6%, 7%, 8% y 9% (Ver anexo 03). En general se encontró que la acidez extraíble correlacionó negativamente con todas las variables silvícolas.

En relación a las correlaciones a la segunda profundidad del suelo (20-40 cm), solo el pH correlacionó con una probabilidad estadística altamente significativa al 1% ($p=0.000$) con el IMAAItDom (0.66), con el IMAAItTot (0.68) y con el IMADap (0.71). En tanto que solamente alcanzó una probabilidad estadísticamente significativa al 5% ($p=0.048$) con el IMAVol (0.42). Por otro lado, el hierro correlacionó negativamente con la AltDom (-0.64) alcanzando una probabilidad estadísticamente significativa al 5% ($p=0.044$). Mientras que la probabilidad estadística fue de 7% ($p=0.065$), cuando el hierro correlacionó con el IMAAItDom (-0.60) y con la AltTotPr (-0.60).

La materia orgánica también correlacionó con una probabilidad altamente significativa al 1% ($p=0.000$) con la pedregocidad (0.23). En tanto que el magnesio correlacionó con el calcio (0.63) con una probabilidad significativa al 5% ($p=0.044$).

En tanto a la tercera profundidad del suelos (mayor 40 cm) el pH que correlacionó con el IMADap (0.52) estadísticamente significativa al 5% ($p=0.044$). Mientras que la materia orgánica lo hizo con la pedregocidad (0.23) estadísticamente significativa al 5% ($p=0.048$). El zinc también lo hizo con la Pendiente (0.62), estadísticamente significativa al 5% ($p=0.044$).

6.7. Crecimiento y productividad

Los promedios utilizando el incremento medio anual (IMA) de la altura total para mostrar el crecimiento y la productividad de las plantaciones, se visualizan en el cuadro siguiente.

Cuadro 8. Promedios de valores de crecimiento por escenario de *Tectona grandis* L.f.

ESCENARIO	IS m	PEND %	EDAD Meses	IMA ALTTOT	IMA ALTDON	IMA DAP	IMA AB	IMA VOL	Referido a % IMAVOL
CBPB	12.90	10	39	1.73	2.33	1.98	0.43	3.16	24
CBPM	12.35	17	40	1.71	2.29	1.94	0.44	2.90	22
CBPA	15.05	35	42	1.98	2.79	2.07	0.53	4.26	32
Prom.Crec. Bajos	13.43	21	40	1.81	2.47	1.99	0.47	3.44	29
CMPB	15.15	9	36	2.63	3.41	2.72	0.65	6.53	49
CMPM	15.83	20	36	2.90	3.63	2.95	0.79	8.34	63
CMPA	15.18	38	36	2.67	3.44	2.65	0.66	6.33	47
Prom. Crec. Medios	15.38	22	36	2.73	3.49	2.77	0.70	7.06	59
CAPB	16.45	12	29	3.96	4.55	3.90	1.03	13.33	100
CAPM	16.78	28	31	3.62	4.43	3.56	0.87	10.28	77
CAPA	18.20	39	33	3.58	4.34	3.56	0.94	12.18	91
Prom. Crec. Altos	17.14	27	31	3.72	4.44	3.67	0.95	11.93	12

Nomenclatura: CBPB, Crecimientos Bajos y Pendientes Bajas; CBPM, Crecimientos Bajos y Pendientes Medias; CBPA, Crecimientos Bajos y Pendientes Altas; CMPB, Crecimientos Medios y Pendientes Bajas; CMPM, Crecimientos Medios y Pendientes Medias; CMPA, Crecimientos Medios y Pendientes Altas; CAPB, Crecimientos Altos y Pendientes Bajas; CAPM, Crecimientos Altos y Pendientes Medias; CAPA, Crecimientos Altos y Pendientes Altas.

La estratificación permitió clasificar a los sitios estudiados de manera que es posible identificar en valores numéricos las diferencias significativas entre los tratamientos (escenarios) analizados. En general, considerando solamente clases de crecimiento, un 12% se aglutina en crecimientos altos, mientras que un 59% en crecimientos medio y un 29% en crecimientos bajos.

Figura 7. Promedios de IMA en volumen ($m^3/ha/año$) para las clases de crecimiento consideradas

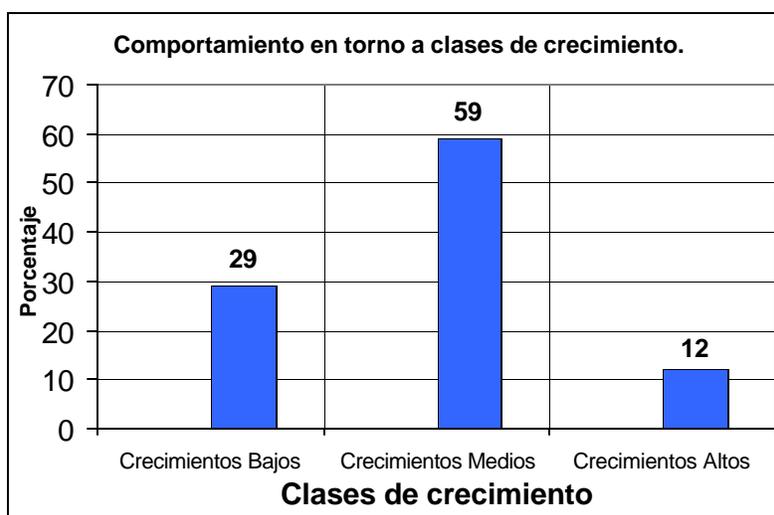
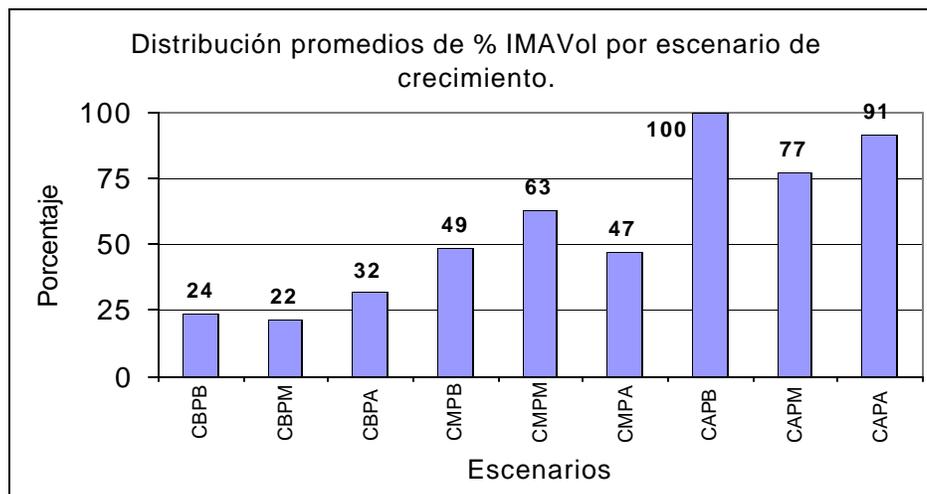


Figura 8. Promedios de IMA en volumen ($m^3/ha/año$), para los escenarios de crecimiento considerados.



El escenario que reúne los promedios más altos y posee la edad más joven (29 meses) es el CAPB, cuya plantación se ubica en una pendiente promedio del 12%, pero que en su extremo posee uno de los valores más bajos de sobrevivencia.

6.8. Caracterización nutricional foliar de las plantaciones

Por medio de una guía para la interpretación de análisis foliar compilada por Alvarado (2002) de las publicaciones hechas por Drechsel y Zech (1991) y Boardman *et al.* (1997) (Anexo 05 y 06), en términos porcentuales fue posible caracterizar el estado nutricional foliar de las plantaciones de teca el cual se presenta a continuación.

Figura 9. Estado nutricional foliar en rangos, del calcio, magnesio, potasio y fósforo, en plantaciones de teca, hasta los 42 meses de edad.

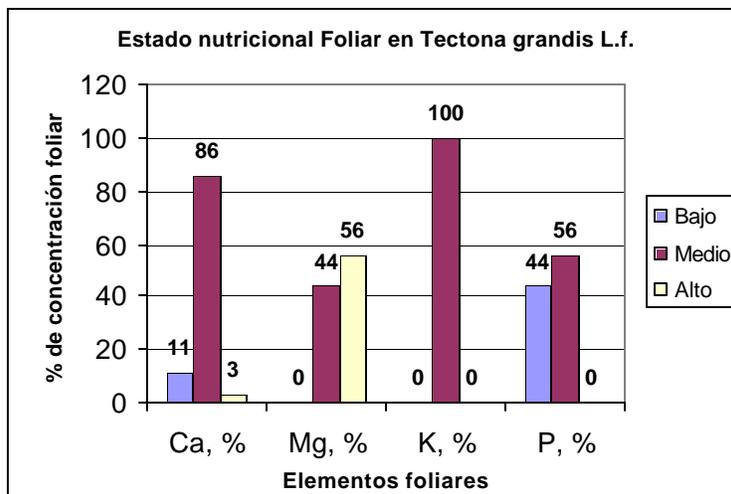
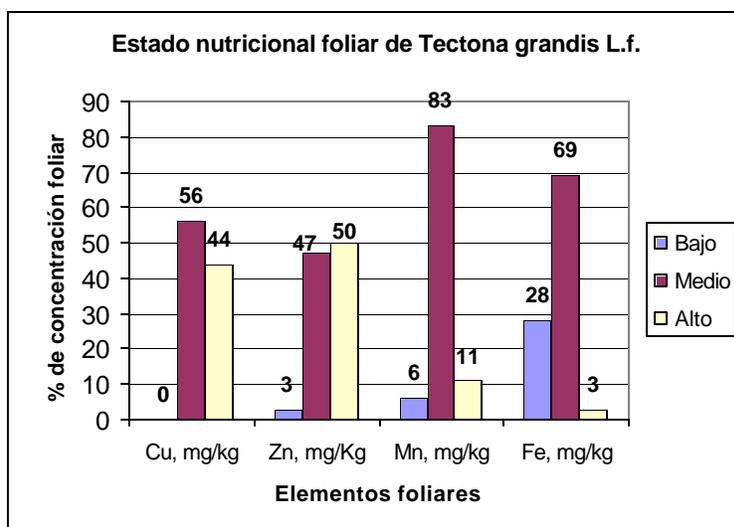


Figura 10. Estado nutricional foliar en rangos, para el cobre, zinc, manganeso y hierro, en plantaciones de teca, hasta los 42 meses de edad.



La distribución en porcentajes del total de parcelas consideradas con relación al estado nutricional, muestra que la mayoría de elementos se encuentran presentes en contenidos considerados como medios con un mínimo de 44% de magnesio hasta a un máximo de 100% de potasio, que incluyen el magnesio (44%), fósforo (56%), cobre (56%), zinc (47%), manganeso (83%) y hierro (69%). Contenidos considerados como bajos, se encuentran el elemento fósforo con un 44% y el hierro con un 28%, mientras que con contenidos altos sobresalen el manganeso (56%), el cobre (44%) y el zinc con un 50%.

En el Cuadro 10, se muestran los promedios y desviación estándar de cada tratamiento (escenario), con valores de concentraciones foliares definidas en categorías desde bajo a medio y alto en porcentaje, del cual se puede deducir de acuerdo a cada escenario que con relación al calcio foliar, las concentraciones son medianas en la mayoría de los escenarios con excepción del CBPM con baja concentración, probablemente debido a que son sitios con un $\text{pH} < 5.5$, (en promedio 5.23, 5.05, 4.95), disminuyen conforme se profundiza en el horizonte del suelo, además que las concentraciones de calcio en el suelo (en promedio 8.78, 4.06, 3.49 cmol/l), también disminuyen en cada profundidad del suelo. Aún con este argumento hay otros escenarios es similares condiciones, considerando también que tienen que ver las concentraciones de acidez (en promedio, 5.73, 15.76, 20.19 cmol/l) mismas que aumentan considerablemente cuando se profundiza en el horizonte del suelo.

En cuanto al magnesio foliar, en promedio las concentraciones son medianas en los escenarios CBPB, CBPM, CBPA, CMPB, CMPM y CAPA, en cambio son altas en CMPA, CAPB y CAPM.

Las concentraciones medias en los escenarios indicados podrían tener relación directa con las concentraciones de acidez que se incrementan conforme se profundiza en el suelo y las concentraciones de pH disminuyen.

Respecto al potasio foliar, éste se encuentra en concentraciones medias, toda vez la disponibilidad de fósforo en el suelo sean suficientes.

En el caso del fósforo foliar, los escenarios con concentraciones bajas se ubicaron en los escenarios: CBPB, CBPM y CMPA, mientras que los escenarios CBPA, CMPB, CMPM, CAPB, CAPM y CAPA tienen altas concentraciones. En este sentido se sabe de hecho que las deficiencias de este elemento ya habían sido observadas por Vásquez (1999), corroboradas en el presente estudio. Los escenarios en condición baja, es bastante probable deber su situación a que las concentraciones de bajo pH tanto a la segunda y tercera profundidad, 20-40 y >40 cm, respectivamente, disminuyen y que, al mismo tiempo las concentraciones de acidez se incrementan a las mismas profundidades.

En relación al cobre foliar, los escenarios prácticamente no tienen problemas de deficiencias, pues los escenarios tienen concentraciones consideradas como medias (CBPB, CBPM, CBPA, CMPM Y CMPA), mientras que son altas en: CMPB, CAPB, CAPM Y CAPA.

La situación con el zinc foliar, es similar al anterior, donde los escenarios no tienen problemas de concentraciones bajas. Además no hay indicativo de preferencia alguna de parte de los escenarios para las concentraciones encontradas.

Respecto al manganeso foliar, todos los escenarios poseen concentraciones medianas. Mientras que respecto al hierro foliar, solamente el escenario CAPA, es considerada baja mientras que el resto tiene mediana concentración del elemento.

En general, los promedios generales se observan en el cuadro siguiente.

Cuadro 9. Promedios generales de nutrimentos foliares encontrados en teca

	CaFoliar	MgFoliar	Kfoliar	Pfoliar	CuFoliar	ZnFoliar	MnFoliar	FeFoliar
Prom.	0.99	0.34	1.33	0.15	12.20	28.15	62.00	112.78
Des.Stand.	0.30	0.11	0.26	0.04	2.00	8.51	25.70	50.08

Comparando el anterior cuadro con los valores reportados por Montero (1999), coinciden nuestros valores dentro de los ahí mencionados. Es decir, en general dichos valores ubican a la teca a las edades consideradas, en un rango medio en cuanto a sus concentraciones foliares.

6.9. Relación de los nutrientes del suelo con los nutrientes foliares

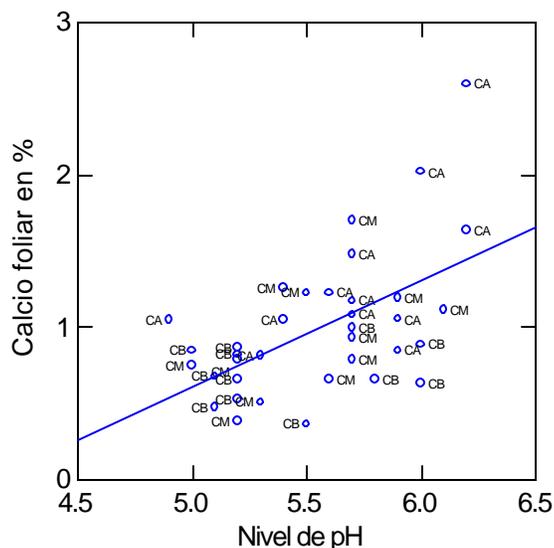
Se construyó una matriz (Anexo 04) de correlación para visualizar las interacciones entre nutrientes del suelo y foliares. De ésta se encontró que solamente el calcio foliar correlacionó positivamente con el pH a la primera, segunda y tercera profundidad (0-20 cm) (20-40 cm) y (? a 40 cm) respectivamente, con valores de 0.66, 0.62 y 0.67, con una probabilidad estadísticamente significativa al 1% ($p=0.000$), en las tres profundidades. También el calcio foliar correlacionó con la variable suma de bases (0.679), a la primera profundidad del suelo, con una probabilidad estadísticamente significativa al 1% ($p=0.000$). Además correlacionó con la relación calcio y magnesio (0.699) con una probabilidad estadísticamente significativa al 1% ($p=0.015$) y con la relación magnesio y potasio (0.512) a la tercera profundidad, con una probabilidad estadística altamente significativa al 8% ($p=0.079$).

En general existen correlaciones definidas como aceptables (a partir de 0.40), sin embargo ninguna alcanza una probabilidad estadísticamente significativa.

El hecho de encontrar al pH correlacionado positivamente con el calcio foliar, muestra que mientras mayor sea el nivel de pH en el suelo, mayores serán las concentraciones de calcio en las hojas. Bertsch (1995) nos indica que químicamente el pH afecta la solubilización, disponibilidad y adsorción de algunos nutrimentos en el suelo (calcio, magnesio, potasio y fósforo y los nutrimentos menores). En este mismo sentido, afecta también el porcentaje de saturación de bases y de saturación de acidez, así como generando cambios de carga variable afectando la capacidad de intercambio catiónico. En

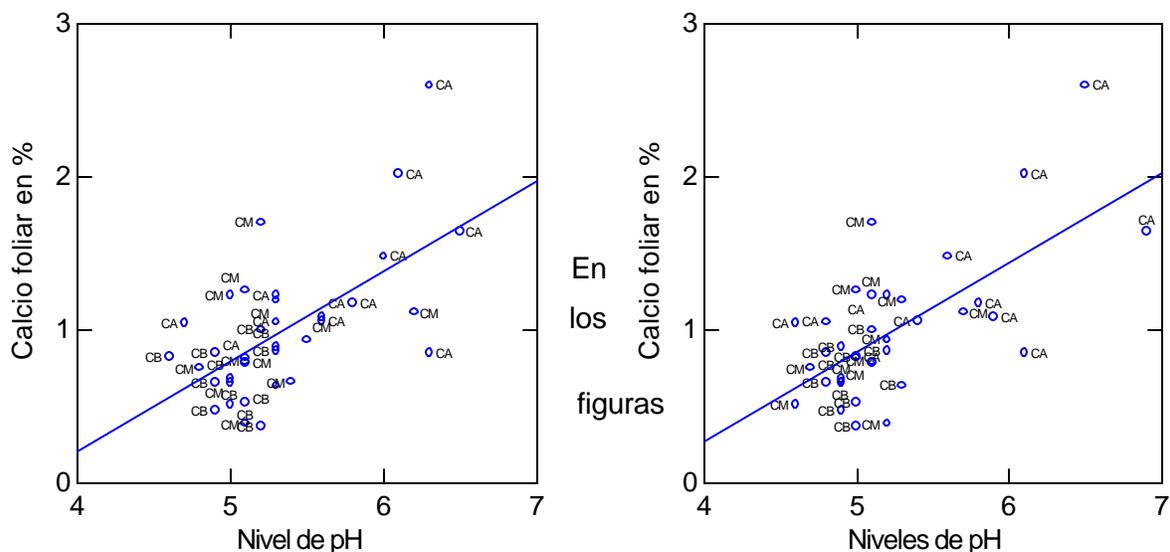
tanto que biológicamente afecta a los tipos de organismos presentes, haciendo baja la actividad de bacterias y actinomicetes, a valores por debajo de 5.5.

Figura 11. Relación calcio foliar con pH a la primera profundidad del suelo (0-20 cm)



La figura anterior muestra que un 58% de los escenarios y sitios muestreados que se ubican en suelos con $\text{pH} < 5.5$, son los que tienen problemas para proporcionar calcio de forma adecuada. Tales sitios se ubican en suelos con concentraciones bajas de calcio ($< 10 \text{ cmol}^+/\text{l}$) y concentraciones de acidez extraíble mayores al nivel de $2.25 \text{ cmol}^+/\text{l}$. Es decir la acidez o el pH, ambas provocarían que no se de un aprovechamiento normal del nutrimento.

Figura 12. Relación calcio foliar y pH a la segunda (20-40 cm) y tercera ($> 40 \text{ cm}$) profundidad.



anteriores (izquierda), se nota que considerando los límites indicados de pH (5.5), a la segunda profundidad, la ubicación de escenarios por debajo de esta condición sube a un 69%. En tanto la figura (derecha), sube a 78% de sitios los cuales evidenciarán problemas por ser suelos ácidos, menores el límite indicado.

Cuadro 10. Promedios de las concentraciones de los elementos foliares.

	CaFoliar, %	MgFoliar, %	KFoliar, %	Pfoliar, %	CuFoliar, Mg/kg	ZnFoliar, Mg/kg	MnFoliar, Mg/kg	FeFoliar, Mg/kg
CBPB	0.84	0.33	1.24	0.12	12	34	124	95
Desv.Stand.	0.14	0.12	0.19	0.03	1.48	21.81	56.82	36.95
CBPM	0.51	0.21	1.64	0.10	10	20	35	83
Desv.Stand.	0.13	0.02	0.25	0.02	1.38	2.29	7.96	11.98
CBPA	0.76	0.29	1.44	0.14	12	38	45	112
Desv.Stand.	0.13	0.11	0.27	0.04	2.73	9.41	16.51	25.25
CMPB	0.95	0.34	1.28	0.18	14	35	85	229
Desv.Stand.	0.36	0.09	0.26	0.06	2.57	6.77	32.13	196.86
CMPM	1.09	0.30	1.47	0.17	10	21	58	96
Desv.Stand.	0.44	0.10	0.33	0.08	0.26	4.78	31.93	26.49
CMPA	0.79	0.38	1.44	0.13	11	26	62	119
Desv.Stand.	0.35	0.19	0.46	0.04	3.43	12.11	33.95	75.52
CAPB	1.69	0.46	1.10	0.18	14	28	65	108
Desv.Stand.	0.75	0.10	0.20	0.02	1.43	4.05	28.39	55.94
CAPM	1.35	0.45	1.11	0.19	13	23	54	99
Desv.Stand.	0.26	0.12	0.28	0.04	1.96	5.48	5.13	7.23
CAPA	0.97	0.33	1.22	0.14	14	28	31	75
Desv.Stand.	0.17	0.16	0.14	0.03	2.79	9.92	18.51	14.52

6.10. Construcción de modelos para la predicción del índice de sitio

Teniendo disponibles los valores por grupos de variables de sitio y de suelo, incluyendo las variables derivadas de la relación entre dos o más variables (Ej. Ca/Mg, CICE, saturación de bases, saturación de acidez, entre otras), se elaboraron las matrices correspondientes por profundidad respecto al índice de sitio. Al obtener las salidas de regresión lineal múltiple a través del procedimiento stepwise, en los diferentes escenarios, ejemplo, todas las variables a las profundidades indicadas, los coeficientes estadísticos no fueron aceptables, por lo cual se desearon.

Considerando todas las variables de sitio y suelo, a la primera profundidad del suelo, fueron seleccionadas tres variables, con las cuales el siguiente modelo:

$$IS_{10} = 19.874 - 0.192 * (\text{Sat.Acidez}) - 0.150 * (\text{Sat.Calcio}) + 3.238 * (\text{Ca/Mg}); r^2 = 0.46; n = 36$$

Donde:

Sat.Acidez= % saturación de acidez, a la primera profundidad del suelo, 0-20 cm

Sat.Ca= % saturación de calcio, a la primera profundidad del suelo, 0-20 cm

Mg/Ca= Relación del magnesio y el calcio, a la primera profundidad del suelo 0-20 cm

Al hacer el mismo procedimiento, pero considerando valores de sitios filtrados con pH menores a 5.5, se obtuvo el siguiente modelo.

$$IS_{10} = 20.507 - 0.138 * (\text{Sat.Acidez}) - 0.081 * (\text{Sat.Calcio}); r^2 = 0.54, n = 17.$$

Donde:

Sat.Acidez= % saturación de acidez, a la primera profundidad del suelo, 0-20 cm

Sat.Ca= % saturación de calcio, a la primera profundidad del suelo, 0-20 cm

Por otro lado al correr los valores de las variables de elementos foliares con el índice de sitio, se encontró que el calcio foliar, con una probabilidad estadística altamente significativa al 4% ($p=0.037$) fue seleccionada en un modelo con bajos coeficientes estadísticos de correlación (0.50) y determinación (0.26), los cuales se consideran muy bajos no aceptables por que explican apenas un 25% de la correlación.

El modelo es puramente una herramienta que brindará la mejor estimación posible de la productividad, que puedan tener sitios desprovistos de teca, es decir, donde se pretenda plantar teca. Los valores de los parámetros que usualmente le dan validez a un modelo, indican en este caso el más alto, en este caso el modelo a una primera profundidad donde se consideraron sitios ácidos y con un pH menor a 5.5. Los usuarios que lo utilicen tendrán la responsabilidad y el criterio de utilizarlas, así como la interpretación, solventando cualquier implicación técnica hacia el autor del presente estudio, toda vez la investigación se realizó en un área geográfica definida.

La variable % de saturación de calcio, alcanzó un $r^2=0.41$, valor que indica que hasta un 41% es posible explicarse mediante el efecto de esta variable en el crecimiento de teca. Sin embargo aunque no haya alcanzado coeficientes estadísticamente aceptables, se sabe por reportes de Vásquez y Ugalde (1994), Vallejos (1996) y Montero Mata (1999), que en nuestra investigación las concentraciones de calcio y su % de saturación, re-validan y re-confirman la condición "basófila" de la teca.

Para efectos técnicos de interpretación, la importancia que a partir de variables de sitio y suelo pueda estimarse de mejor manera la productividad de un sitio, es respaldada por la correlación entre las mismas variables. Ejemplo de ello es como la acidez extraíble, el IMADap y el pH a la primera profundidad (0-20 cm), tienen mucho en común. Por lo que considerando la situación en los sitios con niveles de $\text{pH} < 5.5$, debajo del cual, de acuerdo con Alvarado y Fallas (2003 *en prensa*), en suelos minerales el Aluminio (Al^{+3}) es el causante de producir el H_3O^+ , el cual no puede coexistir por encima de nivel de pH mencionado, pudiéndose considerar éste como el “neutro” debajo del cual también las concentraciones de Al aumenta exponencialmente.

6.10.1. Índice de sitio estimado versus índice de sitio predictivo

De los modelos obtenidos, analizando solamente el confeccionado con valores provenientes de la primera profundidad (0-20 cm) y una muestra $n=16$, del cual gráficamente las diferencias entre ambas variables (el IS estimado mediante los valores de suelo para predecir el IS estimado por Mirasilv), con una diferencia en un 13%. (Ver anexo 20 y 21, Relación entre las variables IS_{10} estimado por el sistema Mirasilv (Ugalde 2003) como variable dependiente y el IS estimado por el modelo confeccionado en la presente investigación, así como la dispersión de las diferentes entre ambas).

6.11. Necesidades de encalado

De acuerdo con Alvarado⁴ se pueden utilizar varias fórmulas como la Berstch (1995) para el cálculo de las necesidades de cal, sin embargo con ésta se subestima tal necesidad, por lo que se sugiere la utilización de las fórmulas citadas por (Soil Management C.R.S.P. 2002), en las que la necesidad de cal necesaria para neutralizar la acidez del suelo hasta el nivel de tolerancia de la especie a plantar, obedece a dos ecuaciones, una para neutralizar la acidez cuando los niveles son altos ($\geq 20\%$ de saturación de acidez (ó aluminio)) y otra cuando los niveles son bajos ($< 20\%$ de saturación de acidez), las cuales sumadas permiten calcular la cantidad de cal a aplicar.

⁴ Comunicación personal con el Dr. Alfredo Alvarado, Centro de Investigaciones Agropecuarias (CIA), Universidad de Costa Rica (UCR).

De las estimaciones efectuadas, seis (6) de los treinta y seis (36) sitios considerados tienen un porcentaje de saturación de acidez mayor al 20%, mientras los demás tienen un valor menor al indicado. Los resultados muestran que solamente estos los 6 sitios necesitan aplicaciones de cal de hasta 6.40 ton/ha, algo que contradice lo señalado por Berstch (1995) que aplicaciones 23 mayores a lo que 1.0 ton/CaCO₃ necesita para neutralizar 0.5 cmol+/l de acidez, provocaría problemas de sobre-encalado. Sin embargo no debe olvidarse que tales aplicaciones pueden ser espaciadas, por lo tanto es técnicamente factible realizar 2-3 aplicaciones, dependiendo también de la forma de aplicar en el suelo. En el caso de sitios con pH hasta 5.5, se sugiere la aplicación de lo que comúnmente se sugiere, es decir, una cantidad no mayor a 3.0 ton/ha de CaCO₃.

Alvarado y Fallas (2003) afirman que el causante de la acidez en suelos minerales es el aluminio⁺³ (ó acidez extraíble) y que, el contenido de éste en suelos no pueden coexistir a un pH >5.5, considerando éste como el neutro, ya que a valores inferiores, el porcentaje de saturación aumenta exponencialmente, haciéndose tóxico para las raíces de la teca. Estos mismos autores también denotan que la respuesta de la teca al encalado se dará principalmente cuando, el Al intercambiable oscile entre 2.55 y 6.55 cmol+/l y el % de saturación de Al en el suelo sea mayor al 8 % ó cuando el los valores de calcio intercambiable sean bajos. Ambos autores reportan también que la adición de cal agrícola seguido de una aplicación de fertilizante químico, elevó en un 216% el IMA en altura total de árboles de teca en la zona norte de Costa Rica. Es decir, es necesario considerar la aplicación de un fertilizante junto a la cal para esperar mejores resultados. Esto es en principio una sugerencia lógica, a lo cual debe sumársele una sugerencia técnica, la cual consiste en recomendar la instalación de ensayos de aplicación en dosis, épocas y frecuencias, de acuerdo a otras experiencias.

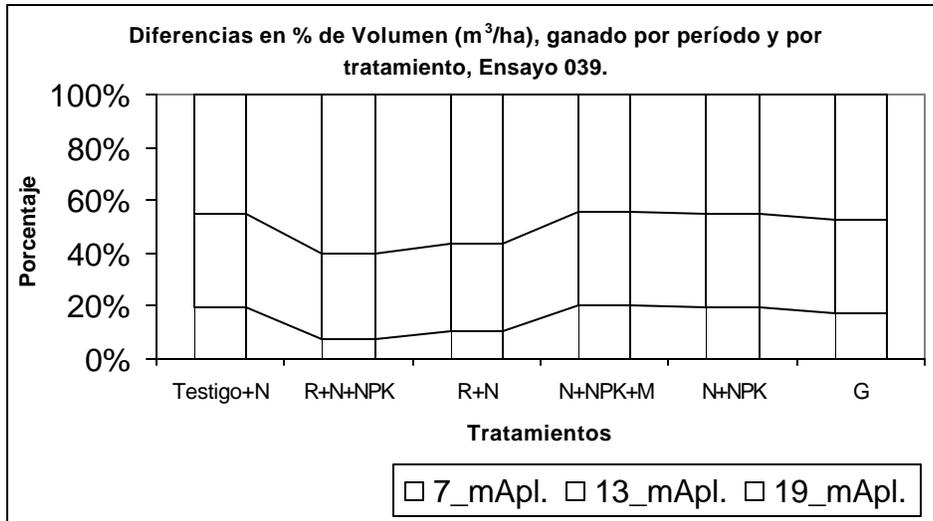
6.12. Resultados de los ensayos de fertilización

6.12.1. Ensayo 039

En este ensayo, tanto entre tratamientos y entre repeticiones, se alcanzó una alta diferencia estadística significativa al 1% ($p=0.000$). En tanto individualmente, a los 7, 13 y 19 meses, fue con la aplicación de compost (2 kg/árbol), que se alcanzó diferencia estadística altamente significativa al 1% ($p=0.000$), a los 7 y 13 meses, y al 5% (0.049), a

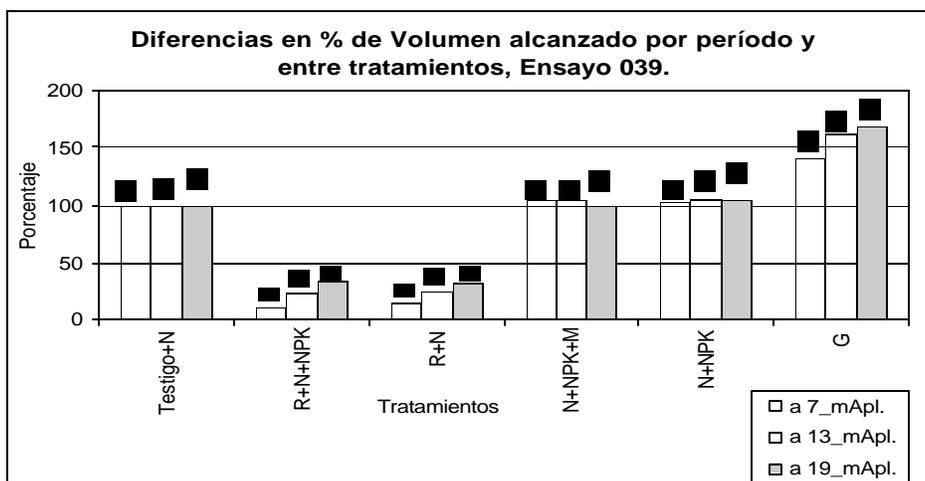
los 19 meses, respectivamente, con un valor máximo de 8.12 m³/ha, cuya efectividad es posible hasta 19 meses después de aplicado el tratamiento.

La figura a continuación muestra que el % del volumen ganado por cada tratamiento fue arriba de un 50% en el último período indicado (19 meses), en tanto en los períodos anteriores, lo ganado en volumen fue inferior en promedio a un 40%.



- Testigo+N=** Testigo+Nivelación(70g, 15-3-24+Roca Fosfórica)
- R+N+BPK=** Rebrote+ Nivelación(70g, 15-3-24+Roca Fosfórica)+NPK10-30-10(100g)
- R+N=** Rebrote+ Nivelación(70g, 15-3-24+Roca Fosfórica)
- N+NPK+M=** Nivelación(70g, 15-3-24+Roca Fosfórica)
+ NPK10-30-10(100g)+Magnesamon(100g)
- N+NPK=** Nivelación(70g, 15-3-24+Roca Fosfórica)
- G=** Compost(2kg/árbol)

En relación a los tratamientos que incluyeron manejo de rebrotes, las mayores diferencias se dieron en el período de los 19 meses después de la aplicación, donde se ganó aproximadamente un 50%, comparado a las diferencias alcanzadas en los períodos anteriores. Sin embargo en términos de valores netos, los rebrotes apenas ganaron 1.64 y 1.54 m³/ha, contra 8.12 m³/ha del compost. En la figura siguiente, en términos porcentuales, el compost alcanzó un 68% comparado con el tratamiento testigo. Ambos tratamientos de rebrotes apenas lograron un 24 y 34% en el mismo período.

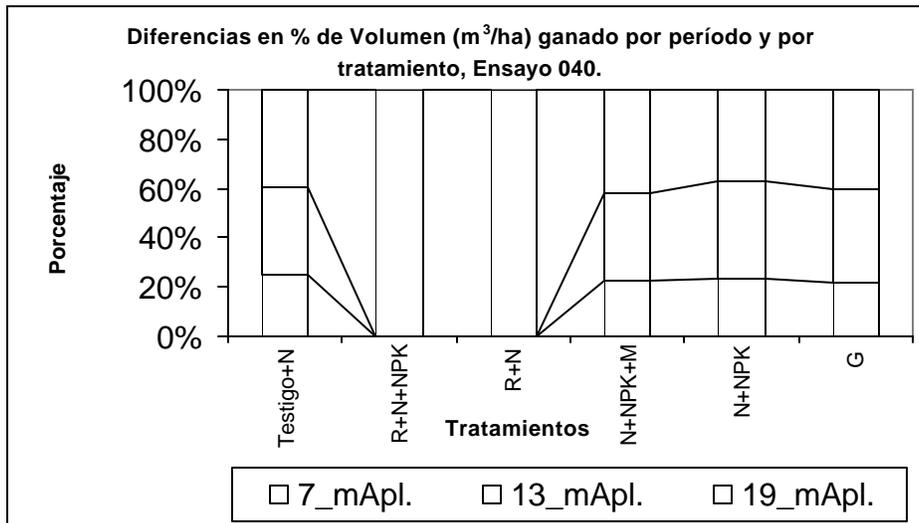


En relación a la sobrevivencia, el tratamiento que incluyó el manejo de rebrotes, fue el único que reportó una reducción promedio de 2.75% de mortalidad, mientras los otros tratamientos no tuvieron variaciones en los valores de dicha variable. Situación referida al último período evaluado (19 meses después de la aplicación) de cada tratamiento.

6.12.2. Ensayo 040

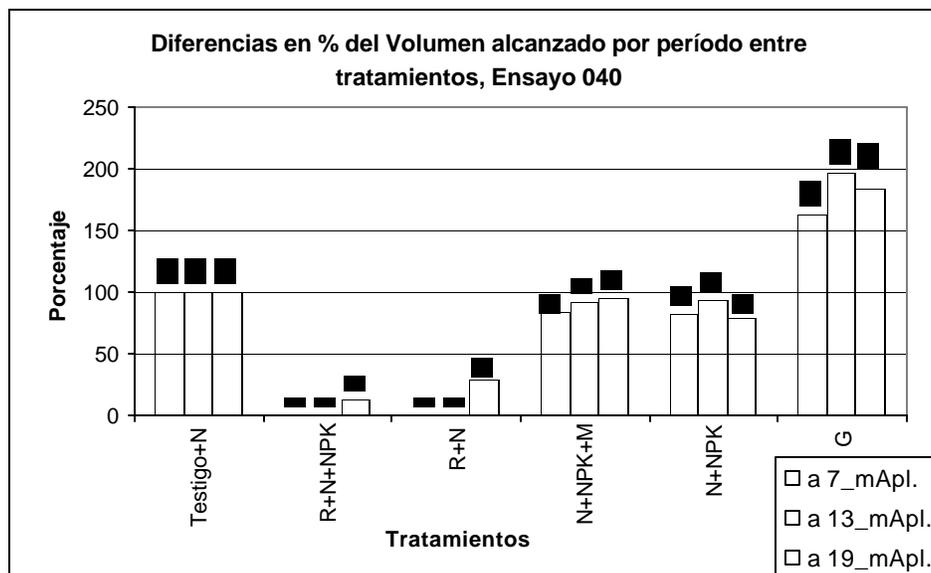
En este ensayo, se alcanzó una alta diferencia estadística significativa al 1% ($p=0.000$) entre tratamientos y al 6% ($p=0.056$) entre repeticiones. En este caso, la aplicación de compost (2kg/árbol) también logró alcanzar una diferencia estadística altamente significativa al 1% ($p=0.009$), con un valor máximo de 1.84 m³/ha equivalente a 84% por sobre el testigo (T_c/N(70g), cuya efectividad es estadísticamente aceptable hasta 19 meses después de aplicado el mismo.

En la figura a continuación, se observa que aproximadamente un 40% del volumen fue ganado por cada tratamiento en el último período evaluado (19 meses después de la aplicación de cada tratamiento. Solo en el caso de los tratamientos con manejo de rebrotes, ambos ganaron el 10% de su volumen en dicho período. Sin embargo en términos de valores netos en volumen, el compost alcanzó un valor máximo de 1.84 m³/ha, en tanto los rebrotes solamente alcanzaron 0.13 y 0.29 m³/ha.



- Testigo+N=** Testigo+Nivelación(70g, 15-3-24+Roca Fosfórica)
- R+N+BPK=** Rebrote+ Nivelación(70g, 15-3-24+Roca Fosfórica)+NPK10-30-10(100g)
- R+N=** Rebrote+ Nivelación(70g, 15-3-24+Roca Fosfórica)
- N+NPK+M=** Nivelación(70g, 15-3-24+Roca Fosfórica)
+ NPK10-30-10(100g)+Magnesamon(100g)
- N+NPK=** Nivelación(70g, 15-3-24+Roca Fosfórica)
- G=** Compost(2kg/árbol)

En términos porcentuales de las diferencias alcanzadas entre tratamientos, se observa la figura a continuación, que el compost logra la diferencias más alta con 96% por sobre el tratamiento testigo a los 13 meses, después de la aplicación. En general a los períodos evaluados, el compost logra un mínimo de 63%.

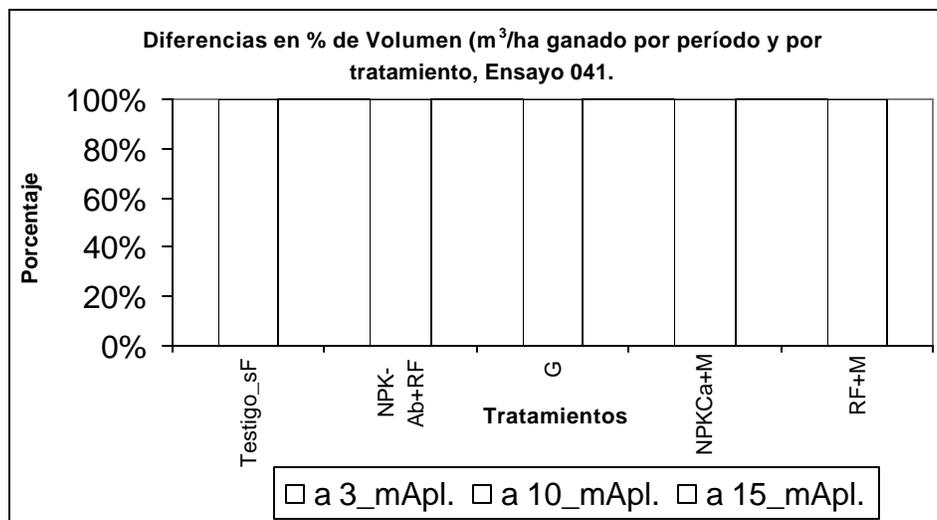


En relación a la variable sobrevivencia, todos los tratamientos reportaron reducciones de 16.5%, caso del tratamiento Nivelación(70g)+NPK10-30-10(100g). El tratamiento compost reportó una reducción promedio de 2.75%, mientras que los tratamientos que incluyeron

manejo de rebrotes alcanzaron reducciones de 16.75%, de mortalidad. En tanto el tratamiento testigo+Nivelación(70g) reportó una reducción promedio de 8.25%, todos referidos al último período evaluado (19 meses después de la aplicación de cada tratamiento).

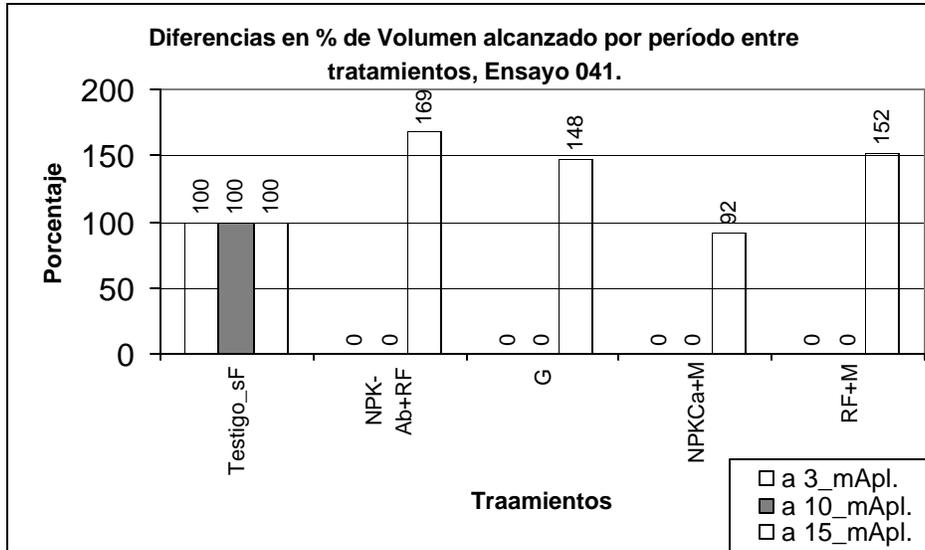
6.12.3. Ensayo 041

En este ensayo no hubieron variaciones en las primeras mediciones, sino hasta la última (15 meses después de la aplicación de los tratamientos), donde no se alcanzaron diferencias estadísticas tanto entre tratamientos como entre repeticiones. Individualmente la aplicación NPK-Abotec(100g)+Roca Fosfórica(100g) alcanza el valor máximo de 7.30 m³/ha pero sin haber logrado alcanzar la significancia estadística aceptable entre tratamientos. La figura a continuación muestra que el 100% del volumen expresado en porcentaje se ganó en éste período por todos los tratamientos, incluido el mencionado.



Testigo sF= Testigo sin fertilización
NPK-Ab+RF= NPK10-10-30(100g)+Roca Fosfórica(100g)
G= Compost (2kg/árbol)
NPKCa+M= NPK10-10-10Calcio+Magnesamon(100g)
RF+M= Roca Fosfórica(100g)+Magnesamon(100g)

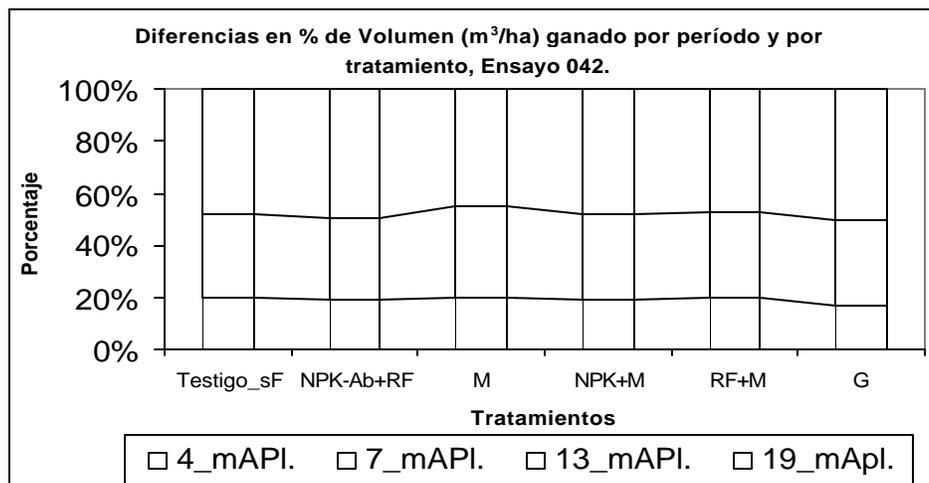
En términos porcentuales de las diferencias alcanzadas, la aplicación de NPK-Abotec(100g)+Roca Fosfórica(100g), logra 69% por sobre el tratamiento testigo. En tanto el tratamiento de compost (2 kg/árbol) y Roca Fosfórica(100g)+Magnesamon(100g) , logran también un 48 y 52% por sobre el tratamiento testigo.



Respecto a la variable sobrevivencia, solamente la aplicación de compost (2kg/árbol) y NPK10-30-10(100g)+Magnesamon(100g), reportaron reducciones promedios de 2.75% y 5.5% de mortalidad, en tanto los otros tratamientos no tuvieron variaciones.

6.12.4. Ensayo 042

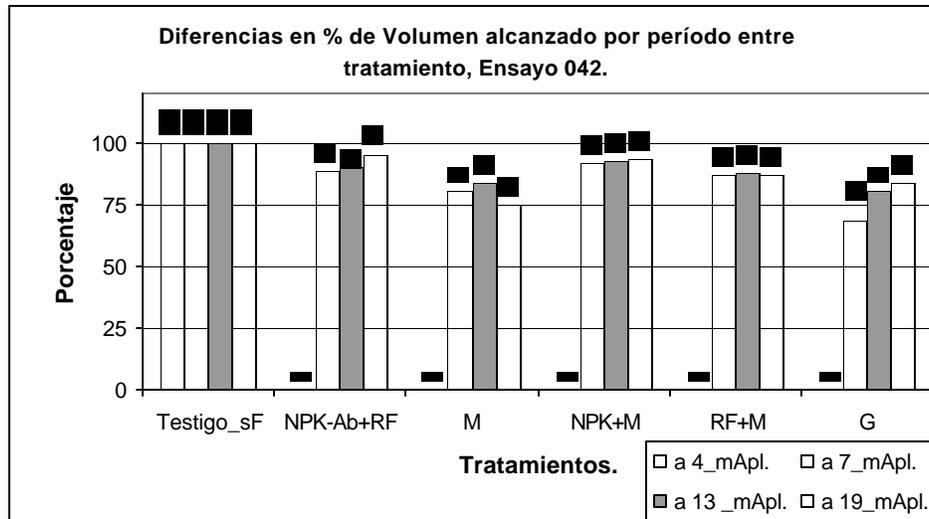
En este ensayo no se alcanzaron diferencias estadísticas tanto entre tratamientos como entre repeticiones. Individualmente tampoco tratamiento alguno logró la significancia estadística. El tratamiento testigo sin fertilización fue el que alcanzó el valor máximo de 15.09 m³/ha a los 19 meses después de la aplicación. En la figura siguiente se observa que todos los tratamientos ganan arriba de un 55% de su volumen en dicho período.



Testigo_sF= Testigo sin fertilización
NPK-Ab+RF= NPK-Abotec(100g)+Roca Fosfórica(100g)

M= Magnesamon(100g)
NPK+M= NPK10-30-10(100g)+Magnesamón(100g)
RF+M= Roca Fosfórica(100g)+ Magnesamón(100g)
G= Compost(2kg/árbol)

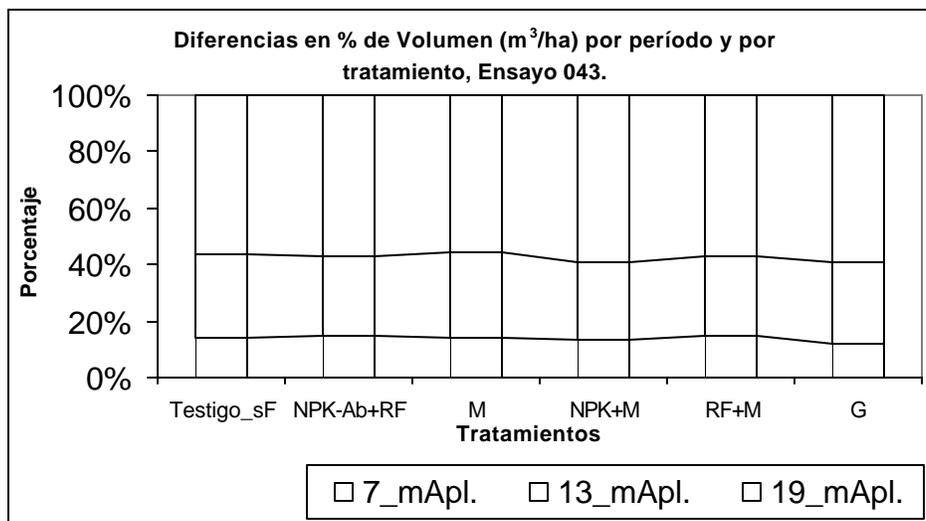
En términos porcentuales, en la figura siguiente, es posible observar que ninguno de los tratamientos los cuales incluyeron dosis y fuentes diferentes, supero al tratamiento testigo, en el último de las mediciones efectuadas.



Refiriéndonos al último período evaluado y en relación a la variable sobrevivencia, el tratamiento testigo reporto reducciones de promedio de 2.75% de mortalidad, mientras que el tratamiento que más alta variación alcanzó fue la aplicación de NPK10-30-10(100g)+Magnesamon(100g) con una reducción promedio de 16.5%. Tratamientos como la aplicación de Roca Fosfórica(100g)+Magnesamon(100g) y Compost(2kg/árbol), poseen variaciones positivas, que presuntamente pueden deberse a rebrotes sin manejar o sustitución de individuos.

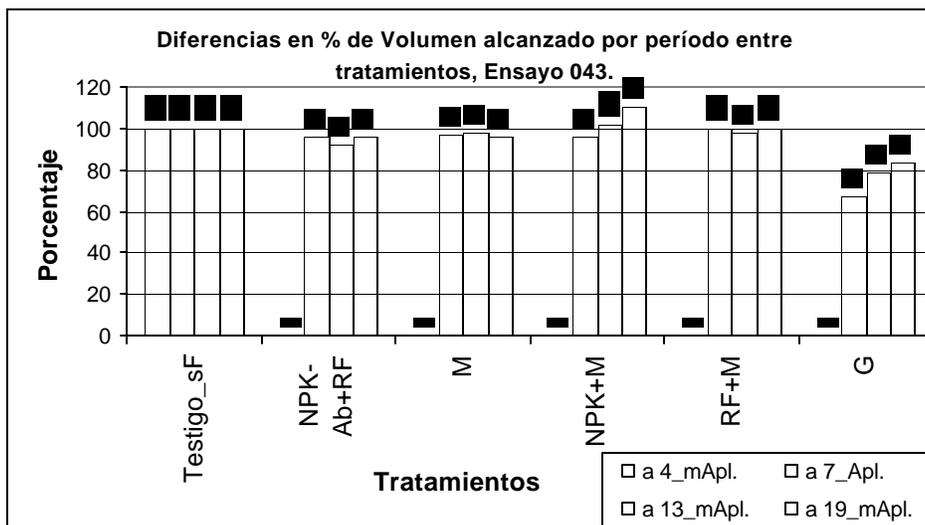
6.12.5. Ensayo 043

En este ensayo, tampoco se alcanzaron diferencias estadísticas entre tratamientos y entre repeticiones. Individualmente ningún tratamiento logró ser mejor, comparado con el tratamiento testigo sin fertilización, el cual alcanzó el valor máximo de 24.85 m³/ha. En la figura a continuación, todos los tratamientos ganaron casi un 60% de su volumen en el último período (19 meses después de las aplicaciones).



Testigo sF= Testigo sin fertilización
NPK-Ab+RF= NPK-Abotec(100g)+Roca Fosfórica(100g)
M= Magnesamon(100g)
NPK+M= NPK10-30-10(100g)+Magnesamón(100g)
RF+M= Roca Fosfórica(100g)+ Magnesamón(100g)
G= Compost(2kg/árbol)

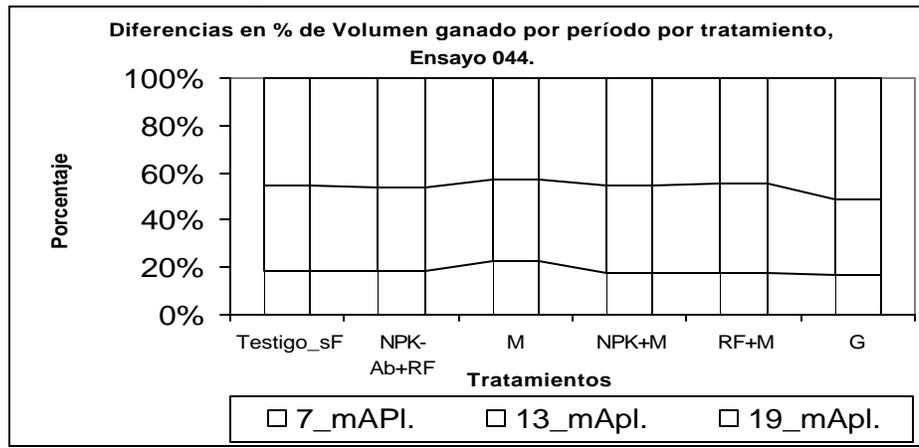
En términos porcentuales de las diferencias alcanzadas entre tratamientos, la figura siguiente nos muestra que, solamente la aplicación de NPK10-30-10(100g)+Magnesamon(100g) logra un 110% por sobre el tratamientos testigo, pero sin haber logrado una diferencia estadística significativa entre tratamientos. El otro tratamiento, la aplicación de Roca Fosfórica(100g)+Magnesamon(100g) logra alcanzar también un 100% similar al tratamiento testigo.



En relación a la variable sobrevivencia y considerado el último período evaluado, el primero de los tratamientos mencionados no tuvo variaciones, mientras que el segundo reportó una reducción promedio de 2.75%. El tratamiento testigo no reportó variación.

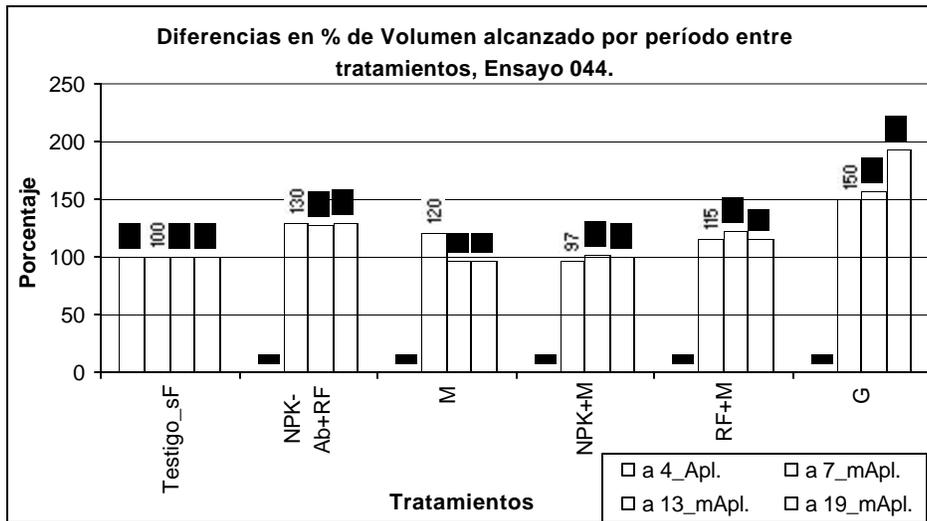
6.12.6. Ensayo 044

En este ensayo no se hallaron diferencias estadísticas significativas tanto entre tratamientos como entre repeticiones. Individualmente, fue la aplicación de compost (2 kg/árbol) que logra alcanzar una alta diferencia significativa al 7% ($p 0.066$) con un valor máximo de 10.84 m³/ha. En la figura a siguiente, se observa como la aplicación de compost logra ganar el mayor % de volumen en dicho período estimándolo en aproximadamente un 45%, en relación al ganado por los otros tratamientos (aproximadamente un 40%).



Testigo sF= Testigo sin fertilización
NPK-Ab+RF= NPK-Abotec(100g)+Roca Fosfórica(100g)
M= Magnesamon(100g)
NPK+M= NPK10-30-10(100g)+Magnesamón(100g)
RF+M= Roca Fosfórica(100g)+ Magnesamón(100g)
G= Compost(2kg/árbol)

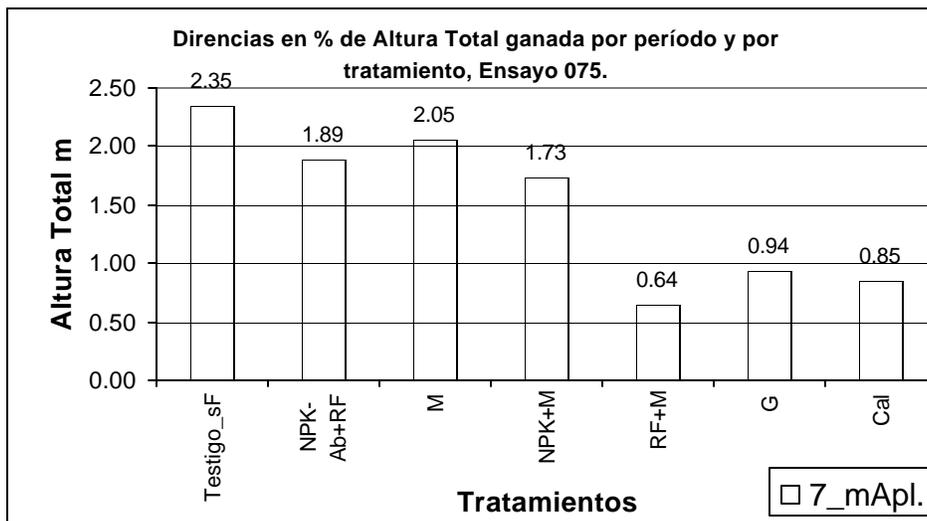
En términos porcentuales de las diferencias alcanzadas entre tratamientos, la aplicación de compost (2 kg/árbol), a los 19 meses de haberse aplicado, ésta logra un 93% por sobre el tratamiento testigo. Este mismo tratamiento logra en los períodos anteriores (7 y 13 meses después de la aplicación), un 150 y 157% por sobre el testigo.



En relación a la variable sobrevivencia, la aplicación de compost no reportó variación, en tanto el tratamiento testigo tampoco. Los tratamientos NPK10-30-10(100g)+Magnesamon(100g), reporta la mayor reducción promedio de 11%.

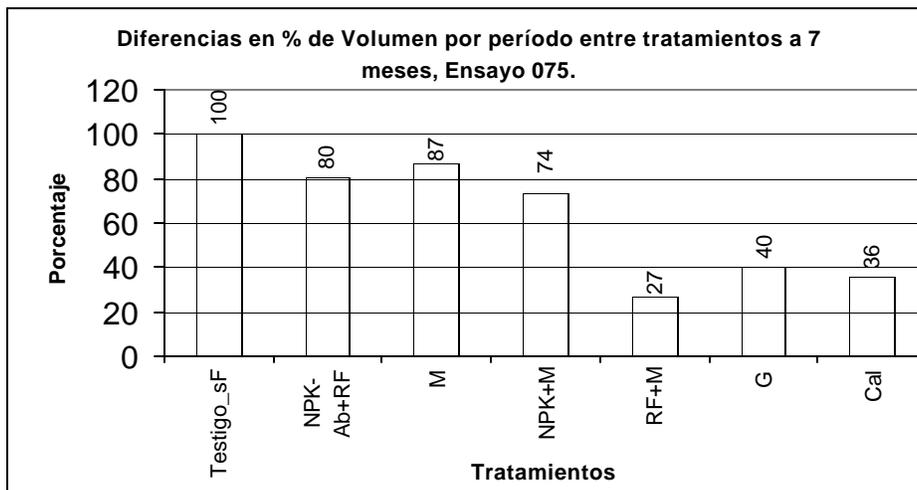
6.12.7. Ensayo 075

En este ensayo, en el cual se incluyó el tratamiento de la aplicación de cal agrícola en una dosis de 500g, cuya primera evaluación se hizo a los 7 meses de haber aplicado todos los tratamientos, los cuales alcanzaron una alta diferencias estadística significativa al 5% ($p=0.048$) entre repeticiones y ninguna entre tratamientos, siendo individualmente el tratamiento testigo sin fertilización el cual logra el máximo valor con 2.35 m. En la figura siguiente se aprecia que los otros tratamiento no lograron rebasar al tratamiento testigo.



Testigo_sF=	Testigo sin fertilización
NPK-Ab+RF=	NPK-Abotec(100g)+Roca Fosfórica(100g)
M=	Magnesamon(200g)
NPK+M=	10-30-10(100g)+Magnesamón(100g)
RF+M=	Roca Fosfórica(100g)+Magnesamon(100g)
G=	Compost (2kg/árbol)
Cal=	Cal Agrícola (500g)

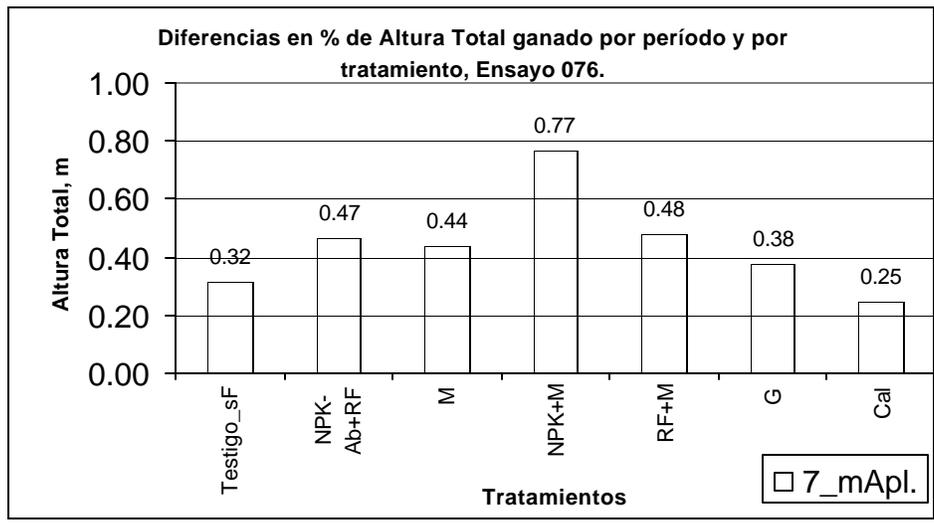
En términos porcentuales y al período evaluado, el tratamiento que más cerca estuvo al desempeño en el testigo fue la aplicación de magnesamon(100g) con un 87% por debajo del 100% del tratamiento testigo.



En cuanto a la variable sobrevivencia, solamente la aplicación de Magnesamon(200g) tuvo una reducción promedio de 2.75% de mortalidad, en tanto los otros tratamiento no reportaron variación alguna.

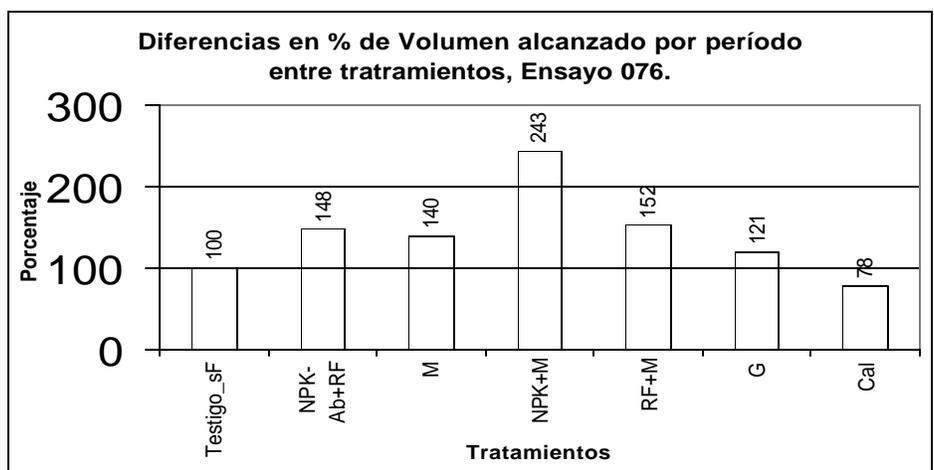
6.12.8. Ensayo 076

En este ensayo, no se alcanzaron diferencias estadísticas entre tratamientos y entre repeticiones. Individualmente la aplicación de NPK10-30-10(100g)+Magnesamon(100g) logró el máximo valor de 0.77 m, aunque sin haber logrado la significancia estadística aceptable. En la figura a continuación, se aprecia la contundencia del tratamiento aplicado en relación al tratamiento testigo.



Testigo_sF= Testigo sin fertilización
NPK-Ab+RF= NPK-Abotec(100g)+Roca Fosfórica(100g)
M= Magnesamon(200g)
NPK+M= 10-30-10(100g)+Magnesamón(100g)
RF+M= Roca Fosfórica(100g)+Magnesamon(100g)
G= Compost (2kg/árbol)
Cal= Cal Agrícola (500g)

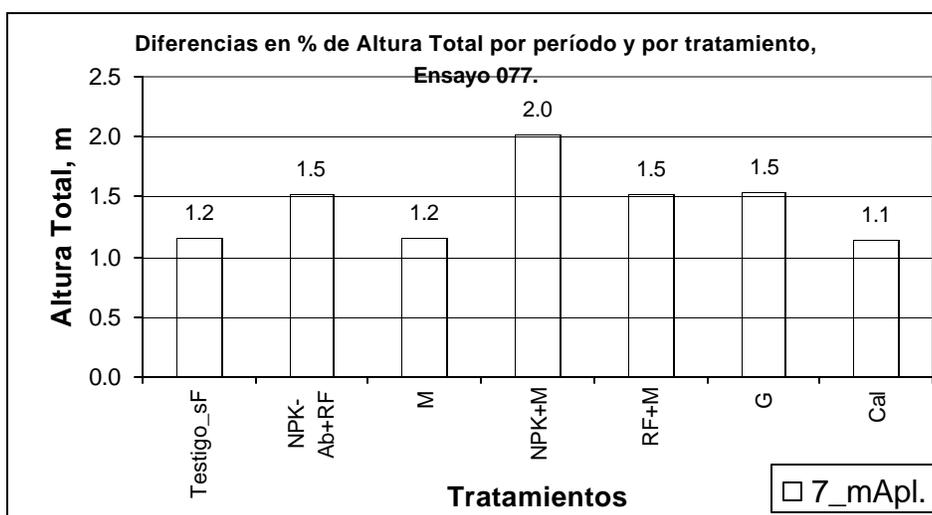
En términos de porcentaje, la aplicación NPK10-30-10+Magnesamon(100g) significó un 243% por encima del tratamiento testigo. En tanto las aplicaciones de NPK-Abotec(100g)+Roca Fosfórica(100g) con 148%, la de Magnesamon(200g) con 140%, la de Roca Fosfórica(100g)+Magnesamon(100g) con 152% y la de compost(2kg/árbol) con 121%, también sobresalieron por sobre el tratamiento testigo.



En cuanto a la variable sobrevivencia, la aplicación de NPK10-30-10(100g)+Magnesamon(100g), no reportó variación, teniéndose en similar situación al tratamiento testigo.

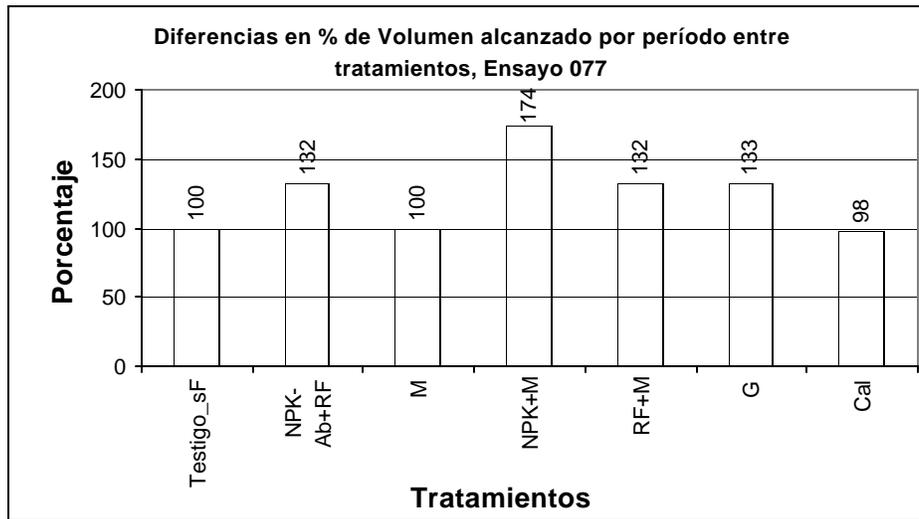
6.12.9. Ensayo 077

En este ensayo, se alcanzaron altas diferencias estadísticas entre tratamientos al 1% ($p=0.000$) y entre repeticiones al 6% ($p=0.06$). Individualmente la aplicación de NPK10-30-10(100g)+Magnesamon(100g) logró el máximo valor de 2.01 m. En la figura a continuación, se aprecia que en relación al tratamiento testigo, también sobresalen otros tratamientos como NPK-Abotec(100g)+Roca Fosfórica(100g), Roca Fosfórica(100g)+Magnesamon(100g) y el Compost (2 kg/árbol), pero sin haber alcanzado la significancia estadística aceptable. Los tratamientos logran también ser superiores en altura total ganada, 1.5 m cada uno, respecto al tratamiento testigo.



Testigo_sF=	Testigo sin fertilización
NPK-Ab+RF=	NPK-Abotec(100g)+Roca Fosfórica(100g)
M=	Magnesamon(200g)
NPK+M=	10-30-10(100g)+Magnesamon(100g)
RF+M=	Roca Fosfórica(100g)+Magnesamon(100g)
G=	Compost (2kg/árbol)
Ca=	Cal Agrícola (500g)

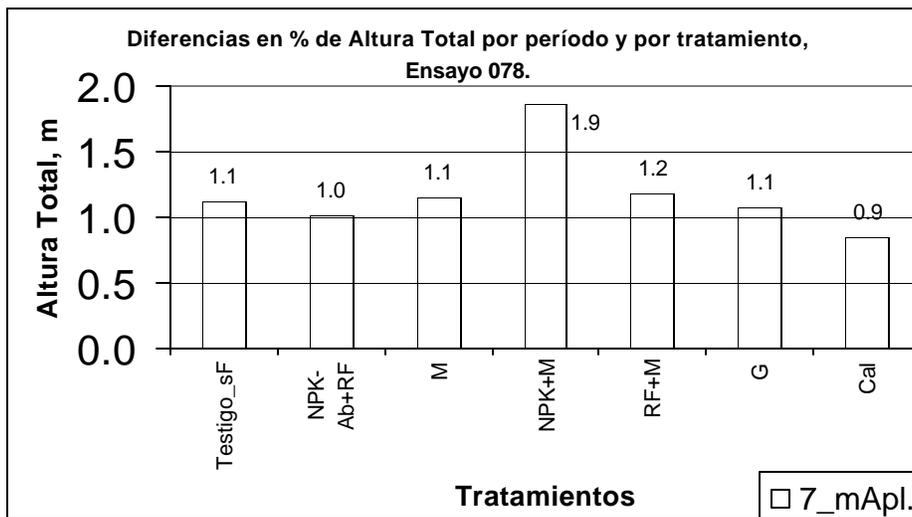
En términos porcentuales, se aprecia que la aplicación de NPK10-30-10(100g)+Magnesamon(100g) logra alcanzar un 74% por sobre el tratamiento testigo. Los otros tratamientos, NPK-Abotec(100g)+Roca Fosfórica(100g), Roca Fosfórica(100g)+Magnesamon(100g) y el Compost (2 kg/árbol), superan también con un 133% en promedio, respecto al tratamiento testigo.



En relación a la variable sobrevivencia, ninguno de los tratamientos reportó variación.

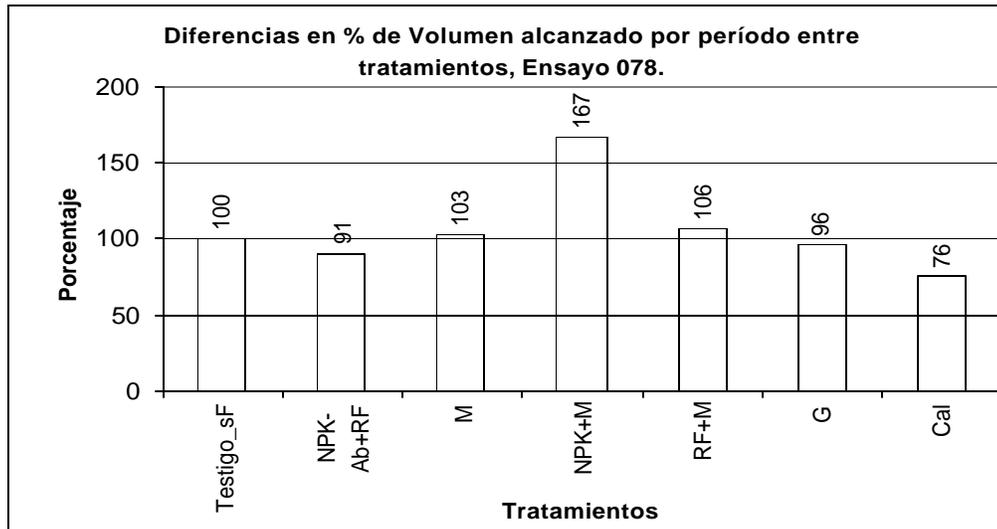
6.12.10. Ensayo 078

En este ensayo, también predominó el buen desempeño del tratamiento compuesto por la aplicación de NPK10-30-10(100g)+Magnesamon(100g), logrando a los 7 meses de aplicado que bs árboles alcanzaran 1.9 m en altura total, por sobre el desempeño en el tratamiento testigo sin fertilización, sin embargo entre tratamientos no se alcanzó significancia estadística.



- | | |
|---------------------|---------------------------------------|
| Testigo_sF = | Testigo sin fertilización |
| NPK-Ab+RF = | NPK-Abotec(100g)+Roca Fosfórica(100g) |
| M = | Magnesamon(200g) |
| NPK+M = | 10-30-10(100g)+Magnesamón(100g) |
| RF+M = | Roca Fosfórica(100g)+Magnesamon(100g) |
| G = | Compost (2kg/árbol) |
| Cal = | Cal Agrícola (500g) |

En términos de porcentaje, la aplicación de NPK10-30-10(100g)+Magnesamon(100g) logra un 67% por sobre el tratamiento testigo. Otros tratamientos que logran llegar al 100% del tratamiento testigo fueron la aplicación de Magnesamon(200g) y la de Roca Fosfórica(100g)+Magnesamon(100g) superando en un 3% y 6% respectivamente, al testigo.



Respecto a la variable sobrevivencia, el tratamiento NPK10-30-10(100g)+Magnesamon(100g) reportó una reducción promedio de 2.75%, en tanto que la de Magnesamon una reducción promedio de 5.5% y la aplicación de Roca Fosfórica(100g)+Magnesamon(100g) no tuvo variación.

7. Conclusiones y recomendaciones

7.1. Relación de crecimiento de teca con variables del suelo y foliares

1. El diseño de muestreo y la estratificación del crecimiento utilizando el incremento medio anual en altura total (IMAAItTot) y la pendiente en porcentaje, permitieron identificar las diferencias en desarrollo, lo que facilitó la clasificación de las plantaciones jóvenes de teca hasta los 42 meses de edad, en clases de crecimiento bajo (<2.25 m/año de IMAAItTot y desde 0-15% de pendiente), crecimiento medio (2.26 a 3.25 m/año de IMAAItTot y desde 16% hasta 30% de pendiente) y crecimiento alto (>3.26 m/año de IMAAItTot y mayor a 31% de pendiente). Con dicha estratificación se encontró que un 29% de las plantaciones actualmente establecidas en los sitios analizados, se ubican en crecimiento bajo, mientras que un 59% se ubican en la clase de crecimiento medio y un 12% poseen un crecimiento alto. Bajo esta condición es posible indicar que con este tipo de estratificación, es posible clasificar su crecimiento y productividad para evaluar plantaciones jóvenes, de teca en diferentes condiciones de suelo.
2. En este mismo sentido (inciso anterior), en términos de valores promedio del incremento medio anual en volumen, las plantaciones en crecimiento bajo que representaron un 29% alcanzaron un 3.44 m³/ha/año, en tanto las plantaciones en crecimiento medio con 59% alcanzaron 7.06 m³/ha/año y las plantaciones en crecimiento alto con un 12%, alcanzaron 11.93 m³/ha/año.
3. Se encontraron altas diferencias estadísticas significativas al 1% ($p=0.000$) entre el Índice de sitio (IS) y los incrementos medios anuales en altura dominante, altura total, área basal, volumen y Dap. Así mismo, considerando las clases de crecimientos, el análisis de variancia también mostró diferencias estadísticas entre las clases. A partir de esto hay suficiente argumento para aceptar la primera de las hipótesis planteada al inicio de la presente investigación, la cual considera que las plantaciones jóvenes de teca analizadas en el presente estudio no presentan diferencias estadísticas significativas en cuanto al crecimiento y la productividad para las clases de sitio definidas.

4. El análisis de crecimiento de teca en relación al porcentaje de pendiente, arrojó que las plantaciones localizadas en el rango de crecimientos medios no tienen definida su dependencia con la pendiente, mientras que la clase de crecimiento bajo son dependientes de la pendiente, y las plantaciones en crecimientos altos están relacionadas inversamente con el porcentaje de pendiente. Lo que muestra la importancia que tiene la pendiente sobre las expectativas de crecimiento y productividad de la teca, aún a edades tempranas.
5. Se confirma la condición "basófila" de la teca, dada su alta dependencia con el contenido de calcio, corroborando que se necesitan cantidades mayores aproximadamente desde 8-10 cmol+/l, para lograr un mejor desarrollo y productividad de plantaciones de teca, durante los primeros años de crecimiento.
6. De las variables seleccionadas y luego analizadas de forma individual y en conjunto, se encontró que las concentraciones de la acidez extraíble (cmol+/l) a la primera profundidad del suelo (0-20 cm) correlacionó negativamente con ciertas variables, alcanzando una probabilidad estadística altamente significativa al 1% ($p=0.000$) cuando correlacionó con la altura total promedio (-0.66) y estadísticamente significativa al 5% ($p=0.04$) con la altura dominante (-0.63) y con el Dap (-0.62). Así mismo, la variable pH a una segunda profundidad del suelo (20-40 cm) correlacionó con el incremento medio anual en altura dominante (0.66), y con el incremento medio anual en altura total (0.68) e incremento medio anual en Dap (0.71), ambas con probabilidades estadísticas altamente significativas al 1% ($p=0.000$). A la segunda profundidad y tercera profundidad del suelo, también la acidez extraíble a concentraciones no mayores de 2.5 cmol+/l, correlacionó negativamente con la mayoría de variables, y el pH(5.5 y 6.5), lo hizo con el incremento medio anual en Dap (0.52) con una probabilidad estadística significativa al 5% ($p=0.048$).
7. Para efectos del análisis de regresión y aunque a la tercera profundidad del suelo (>40 cm) el procedimiento estadístico no seleccionó ninguna variable, se considera importante que en futuras investigaciones sea considerado muestrear a tres profundidades, debido a que con esto se dispondrá de mayores elementos de

juicio, cuando se interpreten las condiciones de suelos en cada sitio en plantaciones de teca.

8. Las variables generadas a partir de las concentraciones de acidez extraíble y calcio, como lo son el porcentaje de saturación de acidez y porcentaje de saturación de calcio, respectivamente, indican que la teca en plantaciones hasta 42 meses, alcanza como nivel crítico de saturación de acidez equivalente a 6.8% (cuando se consideró el IMA en altura total como variable de respuesta) y saturaciones de calcio aproximadamente mínimas a mayores de un 40%. Cuando es considerada el IMA en volumen, el nivel crítico es de aproximadamente 8% de saturación de acidez. Así, mientras menor sea la saturación de acidez y mayor sea la saturación de calcio, la productividad de los sitios muestreados presentan crecimientos altos. Las concentraciones a las que están relacionadas estos porcentajes son: concentración de acidez $\approx 2.25 \text{ cmol+}/\text{l}$ equivalente a $\approx 10\%$ de saturación de acidez. Mientras que la concentración de calcio $\approx 8.0\text{-}10.0 \text{ cmol+}/\text{l}$ es equivalente a $\approx 40\%$ de saturación de calcio.
9. El porcentaje de saturación de acidez, el porcentaje de saturación de calcio y el nivel de pH, se perfilan como las variables “claves” para seleccionar un suelo y reunir las condiciones más óptimas para que la teca logre una mayor productividad. Aunque no pueden descartarse condiciones de sitio como la pedregocidad, la pendiente, drenaje y la ubicación de la plantación relacionado a la variable aspecto.
10. Considerando los 36 sitios muestreados a diferentes edades que se realizó el presente estudio, el análisis gráfico de tendencias entre el incremento medio anual en altura total (m/año) y la relación con el porcentaje de saturación de acidez, calcio y nivel de pH, permitió definir que a la primera profundidad del suelo (0-20 cm) se obtienen rendimientos mayores al 70%, en tanto que considerando éstas mismas variables, tanto a la segunda (20-40 cm) como a la tercera profundidad ($\approx 40 \text{ cm}$), los rendimientos disminuyen hasta un 40%.
11. Es importante mencionar que tanto la variable pendiente como la pedregocidad, indican que en la mayoría de los sitios analizados, las plantaciones fueron

establecidas en condiciones que permiten un desarrollo aceptable. Sin embargo establecer plantaciones en categorías mayores a 40% de pendiente, se podría estar induciendo a la degradación de los suelos, especialmente en sitios con estructura de suelos más susceptibles a la erosión. Bajo las actuales condiciones en las plantaciones, ubicadas en sitios con pendientes fuertes, es importante y necesario mantener un manejo forestal apropiado, que permita mantener el crecimiento de cierto sotobosque, y continuar utilizando el establecimiento de plantaciones en curvas a nivel, para reducir problemas de erosión por escorrentía superficial.

12. Respecto a las concentraciones de magnesio (Mg), a la primera profundidad del suelo (0-20 cm) no se tiene una tendencia clara sobre el requerimiento de determinada concentración de éste nutrimento en relación a los crecimientos bajos, medios a altos. Se encontró que el magnesio es dependiente de la pendiente en relación a crecimientos bajos, e inversamente proporcional a la pendiente en el caso de los crecimientos medios y altos. Lo que significa que para sitios clasificados con crecimientos desde medios a altos, a menor % de pendiente, se encontró mayores concentraciones de magnesio.
13. En cuanto a las concentraciones de potasio (K) y fósforo (P), se concuerda con lo recomendado por Vásquez (1999) en que tales nutrimentos deben ser preferiblemente adicionados al suelo. Del análisis gráfico de potasio foliar y potasio en el suelo, se muestra que el nivel crítico podría estar alrededor de 4.5 cmol+/l, en la primera profundidad (0-20 cm), mientras que el nivel crítico para el fósforo posiblemente es de 0.5 mg/l, en la misma profundidad. Valores inferiores a estos pueden limitar el crecimiento de la teca en las condiciones de los suelos estudiados.
14. El análisis de tendencias, permitió identificar valores aproximados que pueden contribuir a definir niveles críticos preliminares para los nutrimentos como el cobre (Cu) con 2 mg/l, el zinc (Zn) con 7 mg/l, el manganeso (Mn) con 3 mg/l y el hierro (Fe) con 100 mg/l. Su mayor disponibilidad estuvo también íntimamente relacionada con los valores de pH >5.5, correspondiendo a un 36% de los sitios bajo esta condición.

15. En el caso del calcio (Ca), del mismo análisis se logró definir que el nivel crítico podría ubicarse en lo indicado en el inciso 5, (es decir, entre 8-10 cmol+/l), de manera general puede señalarse que este sea de 10 cmol+/l. En tanto que en el caso del magnesio (Mg) podría ubicarse dicho nivel crítico en aproximadamente 5 cmol+/l.
16. De los incisos 13, 14 y 15, se concluye que es necesario para futuras investigaciones se realicen análisis más detallados, en plantaciones de teca de mayor edad y en diferentes condiciones climáticas, para poder determinar los niveles críticos para especies forestales tales como la teca.
17. Los contenidos de materia orgánica, los cuales disminuyen significativamente conforme aumenta la profundidad del suelo en promedio desde 4.03% (0-20 cm), a 1.68% (20-40 cm) y hasta 0.94% (?40 cm), debe ser objeto de atención, puesto que la actividad microbiana es sumamente importante a la hora de combinarse todas las condiciones adecuadas para lograr buenos crecimientos. En ésta investigación, la materia orgánica resultó íntimamente ligada a los valores de pH, encontrándose que cuanto mayor es el porcentaje de materia orgánica y con valores de pH ≥ 5.5 , los crecimientos pasan de medios a altos. En la mayoría de los sitios (64%) la fertilidad alta de los suelos estuvo ligada a sitios con un amplio rango de crecimientos incluyendo desde medios a altos, aunque estadísticamente el coeficiente de determinación no fue lo suficientemente aceptable.
18. En la combinación de factores, clase de crecimiento alto y pendiente baja, se encontró el mejor sitio (repetición #1), en cuanto a la productividad alcanzada hasta la edad analizada, donde el IMA en volumen fue el más alto (21.20 m³/año). En este sitio el suelo presenta las mejores condiciones a las tres profundidades analizadas 0-20, 20-40 y ≥ 40 cm, respectivamente, principalmente el pH con valores en promedio de (6.2, 6.3, y 6.5), concentraciones de acidez extraíble (0.05, 0.05 y 0.05), porcentaje de saturación de acidez (0.41, 0.61 y 0.67%), concentración de calcio (8.84, 6.09 y 5.76 cmol+/l), porcentaje de saturación de calcio (70.96, 73.76 y 77.11%), concentración de magnesio (3.31, 2.05 y 1.63 cmol+/l), además de tener los más altos porcentajes de materia orgánica (5.99%, 2.89% y 1.52%).

19. Del anterior inciso (#18) puede explicarse que a pesar de en dicho escenario las concentraciones de calcio contradicen en principio los requerimientos mínimos del mismo, la saturación calculada del nutrimento fortalece la condición de buen sitio, en este caso. Esto podría deberse al resultado de combinar la importancia de otra variable, como es el valor de la capacidad de intercambio catiónico efectiva (CICE), para tener saturaciones de calcio mayores a 70%. Es decir a mayor valor de la CICE mayor será la disponibilidad de calcio y por consiguiente mayor será el porcentaje de saturación esperado, no solo en cuanto al calcio, sino en relación a los demás nutrimentos.

20. Específicamente lo que se refiere al porcentaje de saturación de acidez, de acuerdo con los datos calculados en el presente estudio y en base a diversas investigaciones, se ha encontrado que tal variable y su valor, es lo que cada cultivo soporta antes de empezar a manifestar reducciones en su desarrollo, el cual varía de acuerdo a las características intrínsecas de tolerancia de cada especie, lo cual en términos muy amplios, casi ningún cultivo soporta más de un 60% de saturación de acidez, los cuales en nuestro estudio a la primera profundidad del suelo (0-20 cm) ningún sitio supera dicho valor. En tanto a la segunda profundidad del suelo (20-40 cm) son siete sitios que superan dicho valor. Mientras que a la tercera profundidad (>40 cm), son diez sitios que superan tal valor.

21. La concentración de elementos foliares en conjunto encontrados en las plantaciones de teca hasta 42 meses de edad, muestran que dichos valores la ubican en un nivel medio (Ca_Foliar 0.99%, Mg_Foliar 0.34, K_Foliar 1.33 %, P_Foliar 0.15%, Cu_Foliar 12.2 mg/kg, Zn_Foliar 28.15 mg/kg, Mn_Foliar 62 mg/kg y Fe_Foliar 112.78 mg/kg), en comparación con los valores encontrados en plantaciones de hasta 9 años de edad en Costa Rica (Montero 1999). En tanto Vallejos (1996), encontró que la condición basófila de la teca se respaldaba aún más por la correlación entre el calcio en el suelo con el calcio foliar y el magnesio foliar. En nuestro caso, los niveles bajos están relacionados con los niveles de pH menor 5.5, registrados en los sitios. Esto fue demostrado con la correlación estadísticamente significativa entre los contenidos foliares de calcio y el pH del

suelo a la segunda profundidad del suelo (20-40 cm) y a la tercera profundidad del suelo (>40 cm). Por lo que tales resultados inducen a rechazar la segunda hipótesis planteada al inicio de la investigación, que considera la no existencia de relaciones estadísticas significativas entre los contenidos nutricionales de suelo y los foliares.

22. El análisis de correlación en conjunto de todas las variables se encontró que las variables con una correlación ≥ 0.40 , pero que no alcanzaron una probabilidad y tampoco fueron seleccionadas por los procedimientos estadísticos de regresión lineal, lo que podría ser explicado por su relación intrínseca entre algunas de ellas. En este sentido, el número de variables que correlacionaron fue mayor en número a la primera profundidad del suelo (0-20 cm), mientras que a la segunda (20-40 cm) y tercera profundidad (>40 cm), fueron muy pocas, máximo dos variables. Esto podría apoyar la importancia de obtener muestras de suelo a la tercera profundidad.
23. A través del análisis de regresión lineal múltiple se logró desarrollar dos ecuaciones que facilitan predecir el índice de sitio en forma indirecta a partir de variables de suelo, a la primera profundidad (0-20 cm). Ambos utilizando solamente como variables independientes, las de suelo, con las cuales se confeccionó el siguiente modelo.

$$IS_{10} = 19.874 - 0.192 * (\text{Sat.Acidez}) - 0.150 * (\text{Sat.Calcio}) + 3.238 * (\text{Ca/Mg}) \quad r^2 = 0.46; n = 36$$

Donde:

Sat.Acidez: % saturación de acidez, a la primera profundidad (0-20 cm)
Sat.Calcio: % saturación de calcio, a la primera profundidad (0-20 cm)
Ca/Mg: Relación calcio/magnesio, a la primera profundidad (0-20 cm)

A la hora de considerar solamente los valores de variables de suelos en sitios ácidos que registraron un pH hasta 5.5, se obtuvo el siguiente modelo, a partir de la salida con el procedimiento no lineal.

$$IS_{10} = 20.507 - 0.138 * (\text{Sat.Acidez}) - 0.081 * (\text{Sat.Calcio}); r^2 = 0.54; n = 17$$

Donde:

Sat.Acidez: % saturación de acidez, a la primera profundidad (0-20 cm)

Sat.Calcio: Porcentaje de saturación de calcio, a la primera profundidad del suelo 0-20 cm.

El uso que se le dé a ambos modelos, debe ir acompañado del conocimiento oportuno que, las mismas fueron generadas para condiciones geográficas determinadas por el ámbito de las plantaciones estudiadas. Es decir, su uso está circunscrito a una región geográfica, por lo que utilizarse para inferir en otras condiciones o sitios, deberá ser precavido por las recomendaciones que puedan derivarse y que las mismas sean producto de un análisis detallado de los suelos en los sitios.

7.2. Ensayos de fertilización:

24. En el ensayo 039, se alcanzó una probabilidad estadística significativa al 1% ($p=0.001$) entre tratamientos y no entre repeticiones, siendo la aplicación de compost (2 kg/árbol), y principalmente la variable volumen con la que se logra la más alta diferencia de 8.12 m³/ha superando en un 68% al testigo (15-3-25 + Roca Fosfórica) al momento de la siembra. La aplicación de compost fue estadísticamente significativa al 1% ($p=0.000$) tanto a los 7, 13 como a los 19 meses después de haber sido adicionada al suelo. El % de mortalidad no tuvo grandes variaciones, salvo uno de los tratamientos con rebrote con una reducción promedio de 2.75%.
25. Respecto a los tratamientos en los cuales se utilizó manejo de rebrotes, en el ensayo 039, se obtuvo que fue en el último período evaluado (19 meses después de la aplicación) que el volumen en % ganado por ambos tratamientos fue aproximadamente un 50% mayor a los otros tratamientos. Aunque en volumen neto solamente alcanzaron ganar aproximadamente lo equivalente a un 33% respecto al testigo. Respecto a la sobrevivencia, solamente el tratamiento que incluyó la nivelación y fertilizante químico registró una reducción promedio de 2.75% de mortalidad.
26. En el ensayo 040, se alcanzaron diferencias estadísticas entre tratamientos al 1% ($p=0.009$) y ninguno entre repeticiones, siendo la aplicación de la compost (2

kg/árbol), la que logra que los árboles tratados hayan alcanzado una mayor diferencia en volumen con $1.75 \text{ m}^3/\text{ha}$ superando en un 96%, con una significancia estadística significativa al 2% ($p=0.011$), por encima del testigo (15-3-24 + Roca Fosfórica) al momento de la siembra, cuyo efecto en los árboles fue estadísticamente significativo hasta los 13 meses después de la aplicación. En relación a la variable sobrevivencia, se registraron altos porcentajes de mortalidad con una reducción promedio de 16.75% en el tratamiento Rebrote+Nivelación. El tratamiento de compost registró un -2.75% de mortalidad. Para el último período evaluado (19 meses después de la aplicación), se alcanza un volumen de $1.84 \text{ m}^3/\text{ha}$ superando en un 84%, al testigo, pero sin haber alcanzado una diferencia significativa.

27. En relación al ensayo 040 y los tratamientos con manejo de rebrotes. Ambos tratamientos registraron su mayor ganancia en % de volumen en el período de los 19 meses después de la aplicación de cada tratamiento. Sin embargo en valor neto de volumen, lograron ganar lo equivalente a un 13% respecto a lo alcanzado por el tratamiento testigo, en el mismo período. Respecto a la variable sobrevivencia ambos tratamientos registraron una reducción promedio de 11.0 y 16.5%, respectivamente de mortalidad.
28. En el ensayo 041, no se alcanzaron diferencias estadísticas tanto entre tratamientos y entre repeticiones. A pesar de esto todas las variables de crecimiento respondieron a la aplicación de NPK-Abotec(100g)+Roca Fosfórica(100g), donde el volumen alcanzado fue de $7.30 \text{ m}^3/\text{ha}$ superando en un 48% al testigo (sin fertilización), es decir, existen diferencias numéricas considerables, pero no significativas estadísticamente, en un período no mayor a 15 meses después de la aplicación. Dicho tratamiento no registró mortalidad en todo el período evaluado.
29. En el ensayo 042, no se alcanzaron diferencias significativas entre tratamientos y entre repeticiones. Fu el tratamiento testigo (sin fertilización) el cual logró la más alta diferencia en volumen con $15.1 \text{ m}^3/\text{ha}$, no alcanzando significancia estadística individual, aunque si se aprecian diferencias numéricas significativas, a los 19 meses después de la aplicación. La variable sobrevivencia registró en este mismo

tratamiento reducciones promedio de mortalidad de 22.0% a los 4 meses, disminuyendo en 2.75% en los períodos posteriores.

30. En el ensayo 043, no se alcanzaron diferencias estadísticas aceptables tanto entre tratamientos como entre repeticiones. Fue la aplicación de NPK10-30-10(100g)+Magnesamon(100g), en que los árboles en promedio alcanzaron la más alta diferencia con 24.9 m³/ha superando en un 10 % al testigo. La aplicación del mismo tratamiento logro que los árboles alcanzaran una altura total de 6.97 m equivalente a un 104 %. Esto se logró a los 19 meses después de la aplicación. La variable sobrevivencia registro una reducción de mortalidad no mayores a 2.75% en todos los tratamientos.
31. En el ensayo 044, se obtuvieron diferencias entre tratamientos a 7% ($p=0.066$) entre tratamientos y no hubo diferencias entre repeticiones en este caso, la aplicación de compost (2kg/árbol) logra la más alta diferencia con 10.84 m³/ha superando en 92 % al testigo (sin fertilización). Así mismo la variable altura total en este mismo tratamiento logra alcanzar la más alta diferencia con 4.55 m, equivalente a un 39% por sobre lo logrado por el tratamiento testigo. Esto se logró hasta un período no mayor a 19 meses después de la aplicación. Este mismo tratamiento no registró mortalidad, en comparación con tratamientos como el NPK10-30-10+Magnesamon que registró una reducción en la mortalidad del 11.0%.
32. En el ensayo 075, se alcanzó diferencias estadísticamente significativas al 5% ($p=0.048$) solamente entre repeticiones y no entre tratamientos, dada la corta edad de evaluación (6 meses), después de la aplicación de los tratamientos, la mayor diferencia fue alcanzada por el tratamiento testigo (sin fertilización) con 2.35 m equivalente a un 100%. En relación a la variable sobrevivencia, solamente en la aplicación de Magnesamon se registró una reducción del 2.75%, donde se alcanzó una diferencia en altura total de 2.05 m, equivalente a un 87% menor que el tratamiento testigo en un 13%.
33. En el ensayo 076, no se alcanzaron diferencias estadísticas entre tratamientos y tampoco entre repeticiones. Aún así fue la aplicación de NPK10-30-10

(100g)+Magnesamon (100g), con el cual los árboles alcanzaron la mayor diferencia en altura total con 0.77 m superando en un 143 %, al testigo (sin fertilización), sin haber alcanzado significancia estadística individual. La evaluación se hizo 6 meses después de la aplicación de los tratamientos. En relación a la sobrevivencia esta alcanzó una reducción del 2.75%, menos el tratamiento mencionado (NPK10-30-10 (100g)+Magnesamon (100g))

34. En el ensayo 077, se alcanzaron diferencias estadísticas significativas al 1% ($p=0.000$) entre tratamientos y al 6% ($p=0.06$) entre repeticiones. Fue la aplicación de NPK(10-30-10)+Magnesamon(200g)., la que causó que los árboles de teca alcanzaran la mayor diferencia con 2.01 m, superando en un 74 %, al testigo (sin fertilización). La evaluación se hizo 6 meses después de la aplicación de los tratamientos. Ningún tratamiento registró aumento en la mortalidad.
35. En el ensayo 078, se logró alcanzar una diferencia estadística significativa al 1% ($p=0.003$) entre tratamientos, pero no entre repeticiones. En este caso también la aplicación de NPK10-30-10(100g)+Magnesamon(100g), con la cual se logró que los árboles de teca alcanzaran la mayor diferencia a los 6 meses después de la aplicación, con un valor de 1.87 m superando en un 67%, al testigo (sin fertilización). La evaluación se hizo 6 meses después de la aplicación de los tratamientos. En términos de la variable sobrevivencia el tratamiento mencionado registró una reducción del 2.75% de mortalidad, siendo en general una reducción del 5.50% de mortalidad el promedio registrado por otros tratamientos.
36. En el caso de los ensayos 075, 076, 077 y 078, en los cuales se adicionó el tratamiento de cal agrícola (500g/árbol), dados los resultados encontrados que no se alcanzaron diferencias estadísticas significativas entre tratamientos y entre repeticiones, lo que puede ser explicado debido al corto período de 6 meses de haberse aplicado el tratamiento.
37. De los resultados obtenidos en ensayos de fertilización, se concluye que es posible rechazar la hipótesis planteada, que considera la no existencia de diferencias significativas entre los tratamientos de los experimentos establecidos

para demostrar la respuesta a la fertilización de la teca. Esto debido a que se obtuvieron diferencias significativas en un 78% de los tratamientos.

38. La respuesta positiva de la teca a aplicaciones de compost, puede explicarse debido a que los suelos en su mayoría, a pesar de los altos contenidos de materia orgánica en la primera profundidad y su consecuente disminución a segunda y tercera profundidad con promedios 4.03%, 1.68% y 0.94%, respectivamente en todos los sitios estudiados, lo cual está relacionado con el papel que juega la materia orgánica, debido a que ésta forma complejos muy fuertes con la acidez extraíble o Aluminio (Al) pudiendo soportar los suelos niveles de Al en solución más altos que otros suelos minerales. Esto debido a que el pH actúa sobre los tipos de organismos presentes y su actividad, teniendo que a pH ≥ 5.5 la actividad de las bacterias y actinomicetes sea baja (Bertsch 1995).
39. La respuesta de los árboles de teca a tratamientos como Nivelación(70g)+NPK10-30-10(100g)+Magnesamon(100g) y el de Nivelación(70g)+NPK10-30-10(100g), en ensayos como el 039, 040 y 041, cuyo desempeño se ubicó en segundo y tercer lugar, precedidos solamente por la aplicación de compost (2 kg/árbol), es posible que esto se deba, tal y como lo demuestra el análisis gráfico que, en escenarios con crecimientos bajos las concentraciones de calcio y magnesio son $<10 \text{ cmol}^+/\text{l}$, donde precisamente los valores de pH fueron <5.5 , y en donde la aplicación de compost resultó ser a lo que los árboles respondieron mejor. Así mismo, la respuesta de las fórmulas químicas como el (NPK, 10-30-10) evidencia las necesidades de suplir fósforo y potasio, ya reportados por Vázquez (1999) y comprobados en el presente estudio.
40. Con base a los resultados en los ensayos puede afirmarse que sería recomendable en suelos ácidos, fertilizar siempre y cuando se hagan las aplicaciones juntamente adicionando la cal agrícola y las fuentes a utilizar. Deberán para el efecto instalarse nuevos ensayos, con diferentes dosis y fuentes, en épocas y frecuencias, un tanto similares a otros estudios (Alvarado y Fallas, 2003).

8. Literatura citada

- Alfaro, M., MD. 1993. Relación entre factores edáficos e índice de sitio para *Cupressus lusitanica* (Mill) en el valle central, Costa Rica. Heredia, CR. Tesis Magíster Scientiae. UCR, CATIE. Costa Rica. 132 p.
- Alvarado, A., Fallas, JL. 2003. Efecto de la saturación de Acidez y el encalado sobre el crecimiento de la teca (*Tectona grandis* L.f.) en suelos ácidos de Costa Rica. Universidad Nacional de Costa Rica. Instituto de Investigaciones Agropecuarias (CIA). (en prensa).
- Anam. 2003. Estadísticas actualizadas de plantaciones forestales en la República de Panamá. Autoridad del Ambiente de Panamá. Sitio web <http://www.anam.gob.pa/Sif%202002/plantacione%20forestales.htm>
- Añez, R.B. 1996. Uso como enmienda del azufre elemental (So) en suelos alcalinos. Revista Forestal Venezolana. 40(2):63-68.
- Barros, FDN. 1981. Algunas consideraciones sobre relaciones entre sitio y suelo en los neotrópicos. In IUFRO/MAB/Servicio Forestal, Simposio / (1980, Río Piedras, Puerto Rico) / Producción de madera en los neotrópicos vía plantaciones. / Redactado por J.L. Whitmore / Río Piedras, Puerto Rico, / IUFRO/MAB/Servicio Forestal / 133-144p.
- Bertsch, F. 1995. La fertilidad de los suelos y su manejo. Primera Ed. Asociación Costarricense de la Ciencia del Suelo. San José, Costa Rica. 157 p.
- Bhat K.M. 1991. Managing teak plantations for super-quality timber. In Teak: Proceedings of the international teak symposium, thiruvananthapuram, Kerala, India. Eds. Basha, S.C; Mohanan, C.; Sankar, S. Kerala, India. / Kerala Forest Department & Kerala Forest Reaearch Institute. / 15-19p.
- Blanco Sánchez, M. 1996. Determinación de la productividad en plantaciones de *Tectona grandis* L.f. Informe de práctica de especialidad. Instituto Tecnológico de Costa Rica. Cartago, CR. 67 p.
- Briscoe, C. 1995. Silvicultura y manejo de teca, melina y pochote. Turrialba, CR. Diseminación del cultivo de árboles de uso múltiple. MADELEÑA/USAID/G-CAP/RENARM Y FINNIDA/PROCAFOR (Proyecto 1. CATIE Serie Técnica, Informe Técnico no. 270. 44p.
- Cannon, P.G. 1983. Diagnóstico de deficiencias edáficas en el bosque. In Fertilización forestal en el valle y el Cauca. Octavo informe anual. Investigación forestal./ Cali, Colombia / Cartón de Colombia / . 99-112p.
- Calderón Maldonado, JJ. 2001. Evaluación económica de árboles y bosquetes remanentes dentro de plantaciones de teca (*Tectona grandis* L.f.) en la cuenca del canal de Panamá. Tesis Magíster Scientiae. CATIE. Turrialba, CR. 78p.

- CATIE. 1997. Resultados de 10 años de investigación silvicultural del proyecto MADELEÑA en Panamá. Ed. Luis A. Ugalde Arias. Turrialba, CR. Serie Técnica, Informe Técnico no. 293. 133p.
- Chávez E.; Fonseca, W. 1991. *Tectona grandis* L.f. especie de árbol de uso múltiple en América Central. Turrialba, CR. Proyecto cultivo de árboles de uso múltiple (Madeleña) CATIE/ROCAP (506-0117). CATIE. 47p.
- Covel, R.R.; McCluskin, D.C. 1967. Site index of Loblolly pine on Ruston soils in the Southern Coastal Plain. *Journal of Forestry*. 65:263-264.
- Chelunor, N.L. 1984. Growth and Nutrient Requirements in a teak plantation Age Series in Nigeria. II. Nutrient Accumulation and Minimum Annual Requirements. *Forest Science*. 30(1). 35-40 p.
- Chelunor, N.L. 1983. Growth and Nutrient Requirements in a teak plantation Age Series in Nigeria. I. Linear Growth and Biomass production. *Forest Science*. 29(1). 159-165 p.
- Christen, H. Von. 1966a. Curso de edafología forestal. Cap. XVII, Bogotá, Colombia, Universidad Distrital "Francisco José de Caldas". 163-176 p.
- , 1979b. Aspectos edafológicos sobre el manejo de las plantaciones de coníferas en las Cordilleras Colombianas, Ibagué, Colombia. Universidad de Tolima. 20 p.
- Daniel, P. et al. 1982. Principios de silvicultura. Segunda Edición. Ed. Mc. Graw-Hill. México. 492 p.
- Davey, CB. 1983. Crecimiento de los árboles y los elementos nutrientes esenciales. *In* Fertilización forestal en el valle y el Cauca. Octavo informe anual. Investigación forestal./ Cali, Colombia / Cartón de Colombia /. 13-26p.
- de Camino, RV.; Alfaro MM.; Sage, LFM. 2002. Teak (*Tectona grandis*) in Central America. Ed. Forest Plantation Working Papers, Working Paper 19. Forest Resources Development Service, Forest Resources Division. FAO, Rome (*unpublished*).
- Drechsel, P.; Schmall, S; Zech, W. 1989. Mineral nutrition and soil properties in young teak plantations in Benin and Liberia. *Mitteilungen. Dtsch. Bodenkundk. Gesellschaft*. 59/11. 691-696 p.
- Fassbender, H.W. 1967. Efecto del encalado en la mejor utilización de fertilizantes fosfatados en un Andosol de Costa Rica. *In* VII Reunión latinoamericana de fitotecnia / Resúmenes de los trabajos científicos / Maracay, Venezuela /. 84-86p.
- González M. R. 1975. Plantaciones de teca en Guanacaste y Quepos, Costa Rica. Reimpresión. CR. Ministerio de Agricultura y Ganadería. Dirección General Forestal. Departamento de Investigaciones Forestales. 7p.
- Jadan, P. S.V. 1972. Sistemas de clasificación de índice de sitio para *Eucalyptus deglupta* B1, en Turrialba, Costa Rica. Tesis Mg. Sc. Turrialba, Costa Rica, IICA. 98 p.

- Hase, H.;Folster, H. y Castillo, JB. s/f. Requerimientos de elementos nutritivos y potencial de producción de plantaciones de teca (*Tectona grandis*) en suelo franco aluvial arenoso en los llanos occidentales de Venezuela. (*datos preliminares*). Institut feur Bodenkunde und Waldernaehrung, Gorringen, Alemania Occidental y Universidad de los Andes, Mérida, Venezuela. 255-264.
- Hernández, A;Franco, H;Zambrana, H; García, C. 1990. Fertilización de *Tectona grandis* L.f. en la region occidental de El Salvador. San Salvador, ESV. Centro de Recursos Naturales. CATIE-Madeleña. s/p.
- Herrera, B. Alvarado, A. 1998. Calidad de sitio y factores ambientales en bosques de Centro América. San José, CR. Agronomía Costarricense. 22(1): 99-117p.
- Jonson, OJ. 1989. Alternativas para la conservación de la micro cuenca del Río Gatuncillo, en el contexto de la planificación del manejo de la cuenca del Canal de Panamá. CATIE, Turrialba (Costa Rica. Tesis (Mag.Sc.). Turrialba (Costa Rica. 1989. 250 p.
- Kass, DCL. 1996. Fertilidad de suelos. Jorge Núñez Solís, Ed. Segunda. Ed. EUNED. San José, C.R. 272 p.
- Keogh R.M. 1981a. Teca (*Tectona grandis* L.f.); Procedencias del Caribe, América Central, Venezuela y Colombia. *In* IUFRO/MAB/Servicio Forestal, Simposio / (1980, Río Piedras, Puerto Rico) / Producción de madera en los neotrópicos vía plantaciones. / Redactado por J.L. Whitmore / Río Piedras, Puerto Rico, / IUFRO/MAB/Servicio Forestal / 356-372 p.
- Keogh RM. 1981b. Teca (*Tectona grandis* L.f.); Cuadro provisional de la clasificación de sitios para el Caribe, Centro América, Venezuela y Colombia. *In* IUFRO/MAB/Servicio Forestal, Simposio / (1980, Río Piedras, Puerto Rico) / Producción de madera en los neotrópicos vía plantaciones. / Redactado por J.L. Whitmore / Río Piedras, Puerto Rico, / IUFRO/MAB/Servicio Forestal / 76-90p.
- Keogh, RM. s/f. Does teak have a future in tropical America?. Rome, Italia. Unasyuva. No. 120. *In*: Agri-silviculture in Latin America. 11 p.
- Kishore, N. 1987. Preliminary studies on the effect of phosphatic fertilizer on teak production. *Indian Forester*. 113(6):391:394.
- Márquez, O. 1994. Cartografía de suelos y evaluaciones de las plantaciones de teca (*Tectona grandis*) en la unidad II de la Reserva Forestal de Ticoporo. *Revista Forestal Venezolana*. 38:17-23.
- Montagnini, F. 2000. Ciclaje de nutrimentos en plantaciones con especies puras y mixtas en región de bosque húmedo tropical. *In*. Consejo Nacional de Rectores, Oficina de Planificación de la Educción Superior. Taller de Nutrición Forestal. San José, Costa Rica. pp. 17-24.
- Montero M. M. 1999. Factores de sitio que influyen en el crecimiento de *Tectona grandis* L.f. y *Bombacopsis quinatum* (Jacq), Dugand, en Costa Rica. Tesis Magíster

Scientiae. Universidad Austral de Chile, Facultad de Ciencias Forestales. Valdivia, Ch. 111p.

- Montero, V. 1995. Dinámica de crecimiento en teca (*Tectona grandis* L.f.) bajo fertilización en el Limón de Chupampa, Herrera-Panamá. *En: Memorias sobre el Seminario Técnico sobre Fertilización E.* 17-29 p.
- Patel, V.J. 1991. Teak cultivation at Jivrajbhai Patel agroforestry center. *In Teak: Proceedings of the international teak symposium, thiruvananthapuram, Kerala, India.* Eds. Basha, S.C; Mohanan, C.; Sankar, S. Kerala, India./ Kerala Forest Department & Kerala Forest Research Institute./ 15-19p.
- Pérez, L.D. 1998. Desarrollo de escenarios de crecimiento con base en la relación de la composición y la estructura de copa con la productividad en plantaciones de *Tectona grandis* L.f. y *Bombacopsis quinata* en Costa Rica. Tesis de Magíster Scientiae. CATIE. Turrialba, Costa Rica.
- Prasad, R.A.K.;Bhandari, A.S. 1986. Fertilizer trial in ten and twenty years old teak plantations in Madhya Pradesh. *Journal of Tropical Forestry.* Jan-March. Vol.2(1).
- Raigosa, J.; Ugalde A, L.; Alvarado, A. 199. Respuesta inicial de *Tectona grandis* L. F. (teca) a la fertilización con estiércol, ceniza, KCL y NPK en Guanacaste, Costa Rica. 3. *In: Taller Nacional de Investigación Forestal y Agroforestal. Cañas (Costa Rica.* 14-16 Nov 1995. Cañas (Costa Rica). 1995. p. 218-227
- Rao, YS. 1991. Keynote address. *In Teak: Proceedings of the international teak symposium, thiruvananthapuram, Kerala, India.* Eds. Basha, S.C; Mohanan, C.; Sankar, S. Kerala, India./ Kerala Forest Department & Kerala Forest Research Institute./ 1-6p.
- Sundralingam, P. 1982. Some preliminary studies on the fertilizer requirements of teak. *The Malaysian Forester.* Vol45(3). 361-366 p.
- Tanaka, N.;Hamazaki, T. & Vacharangkura, T. 1998. Distribution, Growth and Site Requirements of Teak. *Tsukuba, Japan. JARQ* 32:65-77.
- Tschiskel, P. 1972. La clasificación de sitios y el crecimiento de *Cupressus lusitanica* en Antioquia, Colombia. *Revista Facultad Nacional de Agronomía (Colombia).* 27(1):3-30
- Torres, A; Márquez, O; Hernández, R; Franco, W. 1991. Ensayos de fertilización con fosforita en Plantaciones del Occidente y el oriente de Venezuela. *Universidad de los Andes. Mérida, VE.* 17:299-301p.
- . 1993. Respuesta inicial de Crecimiento a la Fosforita en teca en los Llanos Occidentales de Venezuela. *Revista Turrialba.* 42(2):113-118.
- Ugalde, L. 2003a. Sistema para el manejo de información arbórea y silvícola (Mirasily). Turrialba, CR.

- , 2003b. Advancements on Management and teak Productivity in Central America. Paper presented at the International Conference Quality Timber Productions of Teak from Sustainable Forest Management. Peechi, Kerala, India. 2-5 December 2003. (*in press*)
- Vásquez, M. A 1999. Estudio semidetallado de suelos y determinación de la capacidad de uso de las tierras (Globo Sur, Central y Norte). Ecos, Panamá. San José, Costa Rica. 75 p.
- Vásquez, W; Ugalde, L.A. 1995. Rendimiento y calidad de sitio para *Gmelina arborea*, *Tectona grandis*, *Bombacopsis quinatum* y *Pinus caribaea* en Guanacaste, Costa Rica. Serie Técnica, Informe Técnico No. 256. Convenio de Cooperación entre el Proyecto MADELEÑA 3/Proyecto Forestal Chorotega (IDA/FAO/HOLANDA). 33 p.
- Vallejos B.O. 1996. Productividad y relaciones del índice de sitio con variables fisiográficas, edafoclimáticas y foliares para *Tectona grandis* L.f., *Bombacopsis quinatum* (Jacq), Dugand y *Gmelina arborea* Roxb, en Costa Rica. Tesis Magíster Scientiae. CATIE. Turrialba, CR. 147 p.
- Vallejos, B.O; Ugalde, A.L. 1998. Índice de sitio dasométrico y ambiental para *Tectona grandis*, L.f., *Bombacopsis quinatum* (Jacq) Dugand y *Gmelina arborea* Roxb. Creciendo en Costa Rica. In. Primer Congreso Latinoamericano, El manejo Sustentable de los Recursos Forestales, Desafío del Siglo XX. Valdivia, Chile, 22al 28 de noviembre.
- Zambrana, H. 1987. Fertilización forestal. *In*: Curso centroamericano de Silvicultura de plantaciones de especies de árboles de uso múltiple. Ed. Miguel Angel Musálem. Tomo I. Siguatepeque, HN.
- Zech, W; Drechsel, P. 1991. Relationships between growth, mineral nutrition and site factors of teak (*Tectona grandis*) plantations in the rainforest zone of Liberia. *Forest Ecology and Management*. 41:221-235.
- Weaverm P.L.; Francis, J.K. 1990. The performance of *Tectona grandis* in Puerto Rico. *Commonwealth Forest Review*. 69(4). 313-321 p.

Anexo 01. Mapa actualizado de América Latina sobre la distribución de áreas plantadas con Teca en diferentes países.



Anexo 06. Resumen de contenidos foliares en plantaciones de teca hasta 9 años de edad (Adaptado de Drechsel y Zech 1991, Boardman *et al* 1997).

Elemento	Condición			
	Deficiente	Marginal	Adecuado	Alto
		BAJO	MEDIO	ALTO
Ca, %	0.12-0.22	0,56	0.75-2.13	mayor 2.13
Mg, %	0.04-0.07	0,15	0.27-0.35	mayor 0.35
K, %	0,18	0,37	0.44-2.0	mayor 2.53
P, %	0,10	0.11-0.13	0.14-0.23	mayor 0.40
Cu, mg/kg		menor 8	8 a 12	mayor 12
Zn, mg/Kg		11 a 16	17-25	mayor 25
Mn, mg/kg	menor 25		25-112	mayor 112
Fe, mg/kg			79-320	379-1074

Fuente: Apuntes de clase, compilación del Dr. Alfredo Alvarado, 2002.

Anexo 07, Variaciones en los niveles de pH, a la primera profundidad (0-20 cm), a la segunda profundidad (20-40 cm. y a tercera profundidad del suelo (mayor 40 cm)

