

**CENTRO AGRONÓMICO TROPICAL DE INVESTIGACIÓN Y ENSEÑANZA**

**PROGRAMA DE ENSEÑANZA PARA EL DESARROLLO Y LA CONSERVACIÓN**

**ESCUELA DE POSGRADO**

**“Características de sitio que determinan el crecimiento y productividad de teca  
(*Tectona grandis* L. f.), en plantaciones forestales de diferentes regiones en  
Guatemala”**

**Edwin Estuardo Vaidés López**

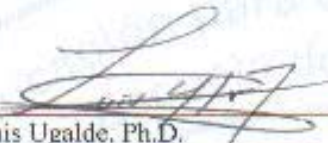
**Turrialba, Costa Rica**

**2004**

Esta tesis ha sido aceptada en su presente forma por el Programa de Educación para el Desarrollo y la Conservación y la Escuela de Posgrado del CATIE y aprobada por el Comité Consejero del Estudiante como requisito parcial para optar por el grado de:


**MAGISTER SCIENTIAE**

**FIRMANTES:**



---

Luis Ugalde, Ph.D.  
**Consejero Principal.**




---

Glenn Galloway, Ph.D.  
**Miembro Comité Consejero**



---

Alfredo Alvarado, Ph.D.  
**Miembro Comité Consejero**



---

Glenn Galloway, Ph.D.  
**Director Programa de Educación y  
Decano de la Escuela de Posgrado**



---

Edwin Estuardo Veides López  
**Candidato**

## **DEDICATORIA**

### **A DIOS:**

Quien me permitió nacer y crecer para poder compartir con todos lo hermosa que es la vida y tener la oportunidad de trabajar en este campo.

### **A MI PADRE**

Oscar Gonzalo Vaidés Sierra, quien me enseñó a trabajar y valorar todas las cosas que se nos presentan en esta vida.

### **A MI MADRE:**

Ana María Leticia López Molina de Vaidés, quien es parte fundamental de mi existencia y a quien guardo el más grande amor en este mundo.

### **A MIS HERMANOS:**

Quienes comparten conmigo todos los triunfos y fracasos, alegrías y tristezas, que hemos tenido en esta hermosa vida que valoramos tanto y que queremos tanto.

### **A MI FAMILIA EN GENERAL:**

Todos miembros de un terruño hermoso conocido como Cobán, que son un apoyo para nuestra familia, además de ser un ejemplo de unidad y confianza.

## AGRADECIMIENTOS

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

- Al CATIE, Escuela de Posgrado y sus autoridades. Por haberme dado la oportunidad de efectuar los estudios de maestría.
- Al Dr. Luis Ugalde Arias, Profesor Consejero y Asesor Principal. Por su apoyo, consejos y enseñanzas en el proceso de estudios en el CATIE.
- Al Dr. Glen Galloway. Miembro Comité Consejero. Por su apoyo incondicional como miembro del comité y como director de la escuela de Posgrado.
- Al Dr. Alfredo Alvarado. Miembro Comité Consejero. Por sus consejos y apoyo en la elaboración del documento final.
- Al personal Técnico y Administrativo del INAB, en especial al departamento de Investigaciones, Monitoreo Forestal y a las Regiones II (Alta y Baja Verapaz), III (Nororiente), VIII (El Petén) y IX (Costa Sur). Por cuyo apoyo y amistad fue posible el desenvolvimiento de la fase de campo de esta investigación.
- Al programa de becas DAAD. Quienes durante los años 2003 y 2004 me apoyaron con el estipendio para la estadía en Costa Rica durante estos años de estudio. Gracias por apoyarme.
- A Carlos Archila, Max Quirin, Otto Becker, Fernando Enríquez, Raelden Esquivel, entre otras personas, que colaboraron en la fase de campo de esta investigación.
- A mis compañeros y compañeras de promoción y de maestría 2003/2004. Un especial agradecimiento a Rocío Tovar por su apoyo incondicional durante estos dos años de estudio. A la comunidad del ANEXO que fueron como una familia durante estos dos años en CATIE.
- Al Dr. Fernando Casanoves. Departamento de estadística del CATIE. Por apoyarme en el desarrollo de la tesis y por compartir con los estudiantes los momentos fuera de aulas, donde también aprendimos algo más que estadística.
- A la Facultad de Agronomía de la Universidad de San Carlos de Guatemala.
- A la Escuela Nacional Central de Agricultura de Guatemala, lugar donde me inicié en esta carrera de sacrificios, pero de grandes satisfacciones.

## **BIOGRAFÍA**

Edwin Estuardo Vaides López nació el 30 de enero de 1971 en la ciudad de Cobán, Alta Verapaz, Guatemala. Hijo de Oscar Gonzalo Vaides Sierra y de Ana María Leticia López Molina, cuarto de cuatro hijos.

Se gradúa de Dasónomo de la Escuela Nacional Central de Agricultura, Guatemala en el año de 1990. Obtiene el título de Ingeniero Agrónomo en Recursos Naturales renovables en el año 2000 en la Universidad de San Carlos de Guatemala.

A partir del año 1996 labora como técnico forestal con el servicio forestal nacional de Guatemala, en el Instituto Nacional de Bosques (INAB), en la región forestal II, conocida como Las Verapaces.

Realizó estudios de posgrado en el CATIE, durante los años 2003 y 2004, cursando la Maestría en Ciencias sobre Manejo y Conservación de Bosques Tropicales y Biodiversidad.

**VAIDES LÓPEZ, E.E. 2004. Características de sitio que determinan el crecimiento y productividad de teca (*Tectona grandis* L. f.), en plantaciones forestales de diferentes regiones en Guatemala. Tesis M. Sc. CATIE. Turrialba, Costa Rica. 81 p.**

Palabras claves: Teca, Teak, *Tectona grandis*, crecimientos, incrementos, productividad, sitio, índice de sitio, análisis de suelos, fisiografía, clima, Guatemala.

## **RESUMEN**

Esta Investigación se realizó en las regiones forestales II (Las Verapaces), III (Nororiente), VIII (Petén) y IX (Costa Sur) en la república de Guatemala, en plantaciones jóvenes de teca con edades entre 2.6 y 7 años, evaluando un total de 113 Parcelas Permanentes de Monitoreo (PPM), ubicadas en los departamentos de El Petén, Alta Verapaz, Izabal, Zacapa, Suchitepéquez, Retalhuleu y Escuintla. Se evaluaron cuatro clases de sitio para todo el país, basados en el índice de sitio existente para teca a una edad base de 10 años. De igual manera se evaluó la productividad, basada en el incremento medio anual en volumen total. Con este análisis se logró clasificar las plantaciones en cuatro categorías de crecimiento, siendo estas bajo, medio, alto y excelente.

Con todos los sitios evaluados, se determinaron las características fisiográficas, climáticas, de suelo y silviculturales que más influyen en el crecimiento y productividad de la especie, encontrando que los sitios con mejor crecimiento y productividad, se encuentran en lugares con elevaciones menores a 220 msnm, en terrenos con pendientes menores al 40 %, en paisajes que van de ondulados a planos, con poca o mediana pedregosidad externa y que no presentan problemas de inundación. Estos sitios también presentan una temperatura media anual cercana a 26 °C, precipitación promedio entre 1,900 y 2850 mm al año, pH del suelo mayor a 5.5, porcentaje de saturación de bases mayor a 43 % en la 1ª profundidad (0 a 20 cm) y terrenos con ninguna o poca compactación. El análisis específico, con los sitios que presentaron pH menor a 5.5, los mejores valores de crecimiento y productividad se observaron en suelos con valores inferiores a 5 % de saturación de acidez y valores superiores a 62 % de saturación de calcio.

Se obtuvieron relaciones importantes entre variables de crecimiento y productividad. También se efectuó una evaluación para generar modelos de predicción de sitio, a partir de variables fisiográficas, climáticas y de suelo.

**VAIDES LOPEZ, E.E. 2004. Site characteristics that determine teak growth and productivity (*Tectona grandis* L. F.) in forest plantations in different regions of Guatemala, M.Sc. Thesis, CATIE, Turrialba, Costa Rica. 81 p.**

Key words: Teak, *Tectona grandis*, growth, increases, productivity, site, site index, soil analysis, physiography, climate, Guatemala

## **SUMMARY**

This study was conducted in the forest regions II (Las Verapaces), III (Northeast), VIII (Petén) and IX (Southern Coast) in the Republic of Guatemala in young teak plantations between 2.6 and 7 years old. The study evaluated a total of 113 Permanent Monitoring Plots (PMP) located in El Petén, Alta Verapaz, Izabal, Zacapa, Suchitepéquez, Retalhuleu and Escuintla departments. Four site classes in all of the country were evaluated based on the existing site index for 10 year-old teak. Additionally, productivity was evaluated based on the average annual increase and total volume. This analysis classified the plantations into four growth categories: low, medium, high and excellent.

The physiographic, climatic, soil, and silvicultural characteristics which influence the growth and productivity for this species were determined. The sites with greater growth and productivity were found in elevations less than 220 meters above sea level, on slopes of less than 40%, in landscapes which are flat to hilly, in extremely rocky to not very rocky areas, and in non-flooded and well-drained areas. These sites also have an average annual temperature around 26 °C, average annual rainfall between 1,900 and 2850 mm, soil pH greater than 5.5, base saturation percentage greater than 43% in the 1<sup>st</sup> soil layer (0 to 20 cm), and land with little or no compaction.

In sites with a pH lower than 5.5, the best growth and productivity values were observed in soils with acidity saturation values less than 5% and calcium saturation values greater than 62%.

Important relationships between growth and productivity variables were obtained. Furthermore, an evaluation was conducted to generate site predictor models using physiographic, climatic and soil variables.

## TABLA DE CONTENIDO

DESCRIPCION	Pag.
RESUMEN _____	vi
SUMMARY _____	vii
TABLA DE CONTENIDO _____	viii
INDICE DE CUADROS _____	x
INDICE DE FIGURAS _____	xi
INDICE DE ANEXOS _____	xiii
1 INTRODUCCIÓN _____	1
1.1 ANTECEDENTES _____	2
1.2 JUSTIFICACIÓN E IMPORTANCIA _____	2
1.3 OBJETIVOS _____	4
Objetivo general _____	4
Objetivos específicos _____	4
1.4 HIPÓTESIS _____	5
2 REVISION DE LITERATURA: _____	6
2.1 PROGRAMA DE INCENTIVOS FORESTALES EN GUATEMALA _____	6
2.2 TECA ( <i>Tectona grandis</i> L.f.) _____	8
2.3 TECA EN LATINOAMERICA _____	10
2.4 EVALUACION DE VARIABLES DE SITIO EN PLANTACIONES DE TECA _____	11
2.5 CRECIMIENTO Y PRODUCTIVIDAD DE TECA _____	13
2.6 INDICE DE SITIO _____	15
2.6.1 Calidad de sitio e índice de sitio _____	15
2.6.2 Métodos de evaluación de calidad de sitio _____	16
3 MATERIALES Y METODOS _____	18
3.1 LOCALIZACIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO _____	18
3.2 MATERIALES _____	19
3.3 MÉTODOS _____	19
3.3.1 Tamaño de la muestra _____	19
3.3.2 Unidad experimental _____	19
3.3.3 Ubicación y medición de las parcelas _____	20
3.3.4 Demarcación de las parcelas _____	20
3.3.5 Variables evaluadas dentro de las parcelas _____	21



3.4	ANÁLISIS DE LA INFORMACIÓN	25
3.4.1	Generación de base de datos	25
3.4.2	Determinación de las variables dependientes	25
3.4.3	Análisis de crecimiento y productividad	25
3.4.4	Análisis gráfico y de correlación	26
3.4.5	Análisis de regresión múltiple	26
4	RESULTADOS Y DISCUSION	28
4.1	ANALISIS DE CRECIMIENTO Y PRODUCTIVIDAD	28
4.1.1	Crecimiento en plantaciones de teca	28
4.1.2	Productividad de plantaciones de teca	32
4.2	VARIABLES QUE DETERMINAN CRECIMIENTO Y PRODUCTIVIDAD	34
4.2.1	Variables fisiográficas	34
4.2.2	Variables climáticas	40
4.2.3	Variables de suelo	42
4.2.4	Relaciones entre variables silviculturales	50
4.3	MODELOS DE PREDICCIÓN DE CRECIMIENTO Y PRODUCTIVIDAD	54
4.3.1	Índice de sitio	55
4.3.2	Productividad	56
5	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	58
5.1	CRECIMIENTO Y PRODUCTIVIDAD	58
5.2	VARIABLES DE SITIO QUE TIENEN RELACION CON EL CRECIMIENTO Y LA PRODUCTIVIDAD DE TECA	59
5.3	MODELOS DE PREDICCIÓN DE INDICE DE SITIO Y PRODUCTIVIDAD DE TECA	63
6	LITERATURA CITADA	64
	ANEXOS	68

## INDICE DE CUADROS

	Descripción	Pag.
Cuadro 1	Especies prioritarias para plantaciones del PINFOR	3
Cuadro 2	Montos incentivados en proyectos de reforestación por el PINFOR, por fase de ejecución.	6
Cuadro 3	Superficie reforestada por especies para plantaciones del PINFOR, hasta el año 2002	7
Cuadro 4	Resumen de variables fisiográficas, climáticas y de suelo que han sido evaluadas para sitio en plantaciones de teca en la región	12
Cuadro 5	Crecimiento y productividad en plantaciones jóvenes de teca en Costa Rica.	13
Cuadro 6	Promedio de valores de crecimiento y productividad de teca por escenarios de crecimiento en Panamá	14
Cuadro 7	Promedio de valores de crecimiento y productividad de teca por calidad de sitio en plantaciones entre 3 y 5 años de edad en Alta Verapaz, Guatemala	15
Cuadro 8	Clases de sitio para plantaciones forestales	17
Cuadro 9	Superficie plantada con <i>Tectona grandis</i> en Guatemala, establecidas entre 1997 y 2000, en proyectos aprobados por el INAB	18
Cuadro 10	Número de parcelas utilizadas para el muestreo por región forestal	20
Cuadro 11	Promedio de crecimiento y productividad obtenidos en las cuatro diferentes clases de sitio en plantaciones de teca en Guatemala.	29
Cuadro 12	Número de PPM, sitios y porcentajes por clase de sitio, encontrados en plantaciones de teca en Guatemala	31
Cuadro 13	Promedio de crecimiento y productividad obtenidos en las cuatro diferentes clases de productividad en plantaciones de teca en Guatemala.	33
Cuadro 14	Número de PPM, sitios y porcentajes por clase de productividad, encontrada en plantaciones de teca en Guatemala	33
Cuadro 15	Valores de saturación de acidez y calcio, en porcentaje, límites para el crecimiento de teca, en suelos con pH menor a 5.5, para Centro América	48

## INDICE DE FIGURAS

	Descripción	Pag.
Figura 1	Porcentaje de superficie reforestada por especie para Guatemala, por medio del PINFOR, hasta el año 2002. (Base de datos PINFOR, 2003).	8
Figura 2	Diferencias por clase de sitio en plantaciones de <i>Tectona grandis</i> en Guatemala, basado en índice de sitio a una edad base de 10 años.	28
Figura 3	Grafico de valores de altura dominante observada en relación a la curva guía para IS <sub>10</sub> , en plantación de <i>Tectona grandis</i> , El Estor, Izabal, Guatemala.	30
Figura 4	Grafico de valores de altura dominante observada en relación a la curva guía para IS <sub>10</sub> , en plantación de <i>Tectona grandis</i> , Chahal, Alta Verapaz, Guatemala.	30
Figura 5	Grafico de valores de altura dominante observada por PPM en relación a la curva guía para IS <sub>10</sub> , en plantación de <i>Tectona grandis</i> en Guatemala.	31
Figura 6	Diferencias por clase de productividad en plantaciones de <i>Tectona grandis</i> en Guatemala, basado en incremento medio anual en volumen total	32
Figura 7	Valores de IS <sub>10</sub> en relación con la elevación en metros sobre el nivel del mar de PPM en plantaciones de <i>Tectona grandis</i> en Guatemala	34
Figura 8	Valores de crecimiento (a) y productividad (b) (IMA en altura total y volumen total) con respecto a la elevación en metros sobre el nivel del mar de PPM en plantaciones de <i>Tectona grandis</i> en Guatemala	35
Figura 9	Valores de crecimiento (a) y productividad (b) (índice de sitio a una edad base de 10 años e IMA en volumen total) en relación con la pendiente del terreno en porcentaje, de PPM en plantaciones de <i>Tectona grandis</i> en Guatemala	36
Figura 10	Valores promedio de crecimiento (a) y productividad (b) por paisaje encontrado en plantaciones de <i>Tectona grandis</i> en Guatemala	37
Figura 11	Valores de crecimiento (a) y productividad (b) por tipo de paisaje encontrado en plantaciones de <i>Tectona grandis</i> en Guatemala	38
Figura 12	Valores de crecimiento (a) y productividad (b) por tipo de topografía del terreno, encontrada en plantaciones de <i>Tectona grandis</i> en Guatemala	39
Figura 13	Valores promedio de crecimiento (a) y productividad (b) en relación a la temperatura media anual, en plantaciones evaluadas de <i>Tectona grandis</i> en Guatemala	41

Figura 14	Valores promedio de crecimiento (a) y productividad (b) en relación a la precipitación media anual, en plantaciones evaluadas de <i>Tectona grandis</i> en Guatemala	42
Figura 15	Valores promedio de productividad a primera (a) y segunda (b) profundidad en relación al pH del suelo, en plantaciones de <i>Tectona grandis</i> en Guatemala	43
Figura 16	Valores promedios de $IS_{10}$ para la primera profundidad de suelos en relación con valores de acidez intercambiable, en plantaciones de <i>Tectona grandis</i> en Guatemala, en sitios con pH menor a 5.5	44
Figura 17	Valores promedios de productividad a primera profundidad en relación a valores de acidez intercambiable, en plantaciones de <i>Tectona grandis</i> en Guatemala, en sitios con pH menor a 5.5	45
Figura 18	Valores promedio de productividad a primera profundidad con relación al porcentaje de saturación de acidez, en plantaciones de <i>Tectona grandis</i> en Guatemala, en sitios con pH menor a 5.5	46
Figura 19	Valores promedio de productividad a primera (a) y segunda (b) profundidad en relación al porcentaje de saturación de calcio, en plantaciones de <i>Tectona grandis</i> en Guatemala, en sitios con pH menor a 5.5	47
Figura 20	Valores promedio de productividad a primera profundidad con respecto al porcentaje de saturación de bases del suelo, en plantaciones de <i>Tectona grandis</i> en Guatemala	49
Figura 21	Relación $IS_{10}$ e IMA en DAP (a) y altura total (b), en plantaciones de <i>Tectona grandis</i> evaluadas en Guatemala	51
Figura 22	Relación $IS_{10}$ e IMA en área basal (a) y volumen total (b) en plantaciones de <i>Tectona grandis</i> evaluadas en Guatemala	52
Figura 23	Relación IMA en volumen total e IMA en DAP en plantaciones de <i>Tectona grandis</i> evaluadas en Guatemala	53
Figura 24	Relación IMA en volumen total e IMA en altura total en plantaciones de <i>Tectona grandis</i> evaluadas en Guatemala	53
Figura 25	Relación IMA en volumen total e IMA en área basal, en plantaciones de <i>Tectona grandis</i> evaluadas en Guatemala	54

## INDICE DE ANEXOS

	Descripción	Pag.
Anexo 1A.	Mapa de regiones forestales de Guatemala, basado en la regionalización del servicio forestal –INAB-	68
Anexo 2A.	Mapa de ubicación de las Parcelas Permanentes de Monitoreo de teca evaluadas para Guatemala	69
Anexo 3A.	Análisis de varianza para clases de sitio y clases de productividad en plantaciones de <i>Tectona grandis</i> en Guatemala	70
Anexo 4A.	Análisis de varianza para crecimiento y productividad por los distintos niveles de paisaje evaluados en plantaciones de <i>Tectona grandis</i> en Guatemala	71
Anexo 5A.	Análisis de varianza productividad por la topografía del terreno, crecimiento por pedregosidad superficial, evaluada en plantaciones de <i>Tectona grandis</i> en Guatemala	72
Anexo 6A.	Análisis de varianza para IS <sub>10</sub> y productividad, con distintas clases de compactación del terreno, evaluada en plantaciones de <i>Tectona grandis</i> en Guatemala	73
Anexo 7A.	Sumario de la selección de variables que explican el IS <sub>10</sub> con el procedimiento STEPWISE, de SAS, evaluadas en plantaciones de <i>Tectona grandis</i> en Guatemala, para un n = 66	74
Anexo 8A.	Análisis de regresión para el modelo de predicción de IS <sub>10</sub> , evaluado en plantaciones de <i>Tectona grandis</i> en Guatemala	75
Anexo 9A.	Sumario de la selección de variables que explican el IS <sub>10</sub> con el procedimiento STEPWISE, de SAS y análisis de regresión para los modelos de predicción de IS <sub>10</sub> , evaluados en plantaciones de <i>Tectona grandis</i> en Guatemala, en sitios con pH menores a 5.5, para un n = 11	76
Anexo 10A.	Sumario de la selección de variables que explican el IS <sub>10</sub> con el procedimiento STEPWISE, de SAS y análisis de regresión para los modelos de predicción de IS <sub>10</sub> , evaluados en plantaciones de <i>Tectona grandis</i> en Guatemala, en sitios con pH mayores a 5.5, para un n = 55	77
Anexo 11A.	Sumario de la selección de variables que explican el IMA en volumen total con el procedimiento STEPWISE, de SAS, evaluadas en plantaciones de <i>Tectona grandis</i> en Guatemala, para un n = 66	78
Anexo 12A.	Análisis de regresión para el modelo de predicción de productividad, por medio del IMA en volumen total, evaluado en plantaciones de <i>Tectona grandis</i> en Guatemala	79
Anexo 13A.	Sumario de la selección de variables que explican el IMAVOL con el procedimiento STEPWISE, de SAS y análisis de regresión para los modelos de predicción de IMAVOL, evaluados en plantaciones de <i>Tectona grandis</i> en Guatemala, en sitios con pH menores a 5.5, para un n = 11	80

Anexo 14A. Sumario de la selección de variables que explican el IMAVOL con el procedimiento STEPWISE, de SAS y análisis de regresión para los modelos de predicción de IMAVOL, evaluados en plantaciones de *Tectona grandis* en Guatemala, en sitios con pH mayores a 5.5, para un n = 55

81

# 1 INTRODUCCIÓN

Las plantaciones forestales están teniendo mayor auge en las últimas décadas en los trópicos, debido a los beneficios que se obtienen de éstas. Las plantaciones, principalmente son productoras de materia prima para las sociedades actuales, demandantes de productos de madera.

La teca (*Tectona grandis* L.f.) es una especie popular para los inversionistas y productores forestales, aunque gran parte de éstos se involucran en la producción sin contar con un claro conocimiento de los crecimientos y de su productividad. Es necesario tomar en cuenta que el éxito en la producción de madera de teca depende en gran medida de la elección de los sitios donde se establecen estas plantaciones.

De Camino y colegas (2002), estiman que en Centro América existe un potencial de plantar no menos de 100 mil ha, de las cuales el 25 por ciento se localizan en Guatemala, 25 por ciento en Nicaragua, 20 por ciento en Costa Rica, 15 por ciento en el Salvador y 15 por ciento en Panamá. Por lo que en la región se ha presentado un auge en el interés por plantar esta especie con fines de producción, sin contar con información local de crecimiento y productividad.

El presente estudio generó resultados sobre el estado actual del crecimiento y productividad de plantaciones de teca en diversas regiones de Guatemala, además de determinar algunas de las características que determinan estos crecimientos y productividades.

Para la generación de estos datos se estableció y midió parcelas permanentes para evaluar y monitorear el crecimiento y la productividad en el tiempo. Los resultados, como cita Ugalde (2001), dan los insumos básicos necesarios para desarrollar modelos de crecimiento y tablas de rendimiento que permiten realizar un análisis financiero realista sobre los proyectos de reforestación, los impactos y beneficios de los programas de incentivos forestales en la región.

En Guatemala, teca tiene una demanda creciente con respecto al establecimiento de proyectos de reforestación, como una especie prioritaria dentro del programa de incentivos forestales, fomentados por el Instituto Nacional de Bosques. Con este estudio se logra sistematizar el

efecto de algunas variables de sitio sobre el crecimiento y la productividad de teca, para orientar la identificación de sitios adecuados para establecimiento de futuros proyectos de reforestación.

## **1.1 ANTECEDENTES**

El Programa de Incentivos Forestales (PINFOR) es una de las principales actividades de fomento de plantaciones forestales y de manejo de bosque natural en Guatemala, el cual es impulsado por el Instituto Nacional de Bosques (INAB). Con la aprobación del decreto legislativo 101-96, en diciembre de 1996, el Congreso de la República de Guatemala, crea la séptima Ley Forestal del país y con ella al INAB como la máxima autoridad en el manejo de bosques fuera de áreas protegidas, teniendo como uno de sus principales programas al PINFOR. Este programa fomenta la implementación de plantaciones forestales en tierras de vocación forestal desprovistas de bosque y el manejo de bosques naturales para la producción y protección.

Para el Plan de Acción Forestal de Guatemala –PAF´G- (2002), las plantaciones forestales han tenido auge en este programa, teniéndose hasta el año 2,000 alrededor de 20 mil hectáreas plantadas con especies forestales, de las cuales el 17 por ciento de la superficie se encuentra plantada con teca (*Tectona grandis*). En la actualidad el PINFOR ha aprobado 1,900 proyectos en total, hasta el 2004, encontrando alrededor de 41,000 ha en proyectos de plantaciones forestales y cerca de 48,000 ha en proyectos de manejo y protección de bosques naturales<sup>1</sup>.

## **1.2 JUSTIFICACIÓN E IMPORTANCIA:**

El programa de incentivos forestales, del INAB, contempla especies prioritarias para ser plantadas en Guatemala, encontrándose dentro de estas la teca, como se aprecia en el cuadro 1. Estas especies prioritarias son plantadas en todo el país, en diferentes condiciones de sitio y suelo de cada región. De acuerdo a lo anterior, se trata de cumplir con uno de los objetivos del PINFOR, que es la generación de una masa crítica de bosques productores de materia prima, mediante el establecimiento y mantenimiento de estas plantaciones forestales.

---

<sup>1</sup> Consulta con oficina de PINFOR del INAB en el 2004.



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; es importante conocer estos datos para la planificación de las plantaciones. Además es necesario reconocer que el manejo de las plantaciones forestales juega un papel importante en el crecimiento y la productividad de éstas.

Cuadro 1 Especies prioritarias para plantaciones del PINFOR.

<b>Nombre común</b>	<b>Nombre científico</b>
Teca	<i>Tectona grandis</i>
Pino colorado	<i>Pinus caribaea</i>
Pino candelillo	<i>Pinus maximinoi</i>
Pino de ocote	<i>Pinus oocarpa</i>
Ciprés común	<i>Cupressus lusitanica</i>
Melina	<i>Gmelina arborea</i>
Palo Blanco	<i>Cydistax donell-smithii</i>
Pinabete	<i>Abies guatemalensis</i>
Santa Maria	<i>Callophylum brasilense</i>
San Juan	<i>Vochysia guatemalensis</i>
Aliso, Jaul	<i>Alnus jorulensis; A. acuminada</i>
Palo Sangre	<i>Virola koschnii</i>

\* Fuente: PAFG, 2002.

Conocer el comportamiento de las plantaciones, y en especial de teca, sirve de base técnica para la planificación del establecimiento de plantaciones y de las labores silviculturales posteriores para obtener en el futuro un producto de buena calidad y cantidad para aportar al desarrollo de la región a través del recurso forestal. Al igual que se conocerá en qué forma las labores silviculturales aplicadas a las plantaciones tienen influencia en el crecimiento y la productividad.

La información generada, como argumenta Montero (1999), está dirigida hacia la búsqueda de recomendaciones prácticas, desarrollando una herramienta que facilite la clasificación de áreas para proyectos 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.

Las características del sitio no son las únicas que definen la productividad de una plantación forestal, también influyen factores externos de planificación en el momento del establecimiento. Entre estos otros factores podemos citar: la procedencia de la semilla, la calidad de planta, preparación del suelo antes del establecimiento de la plantación, labores culturales de limpieza de la plantación, aplicación de fertilizantes, labores silviculturales ejecutadas a tiempo, entre otras.

Con este estudio se logra identificar algunas variables fisiográficas, climáticas y de suelo que están determinando el crecimiento y la productividad de Teca en los proyectos de PINFOR en Guatemala. A partir de esto, se pretende que el presente estudio sea una herramienta más de decisión al momento de implementar proyectos de reforestación, tanto para los propietarios de tierras de vocación forestal interesados en plantar Teca, como para el INAB, en el momento de aprobar el beneficio del PINFOR.

### **1.3 OBJETIVOS:**

#### ***Objetivo general***

Identificar características de sitio y de manejo de las plantaciones que influyen en el crecimiento y la productividad de *Tectona grandis* en proyectos de reforestación establecidos en diversas regiones de Guatemala.

#### ***Objetivos específicos***

- Determinar factores fisiográficos y climáticos que influyen en el crecimiento y productividad de *Tectona grandis* en diferentes regiones en Guatemala.
- Evaluar el impacto de las prácticas de manejo forestal en el crecimiento de las plantaciones de *Tectona grandis*.
- Identificar características del suelo que influyen en el crecimiento y productividad de *Tectona grandis* en diferentes regiones en Guatemala.
- Desarrollar modelos de crecimiento y de productividad para *Tectona grandis*, partiendo de diversas condiciones imperantes en los sitios, que permitan estimar la capacidad productiva de los mismos.

#### **1.4 HIPÓTESIS:**

Existen diferencias significativas en cuanto a la productividad, en relación a la clasificación por clases de sitio definidos en el estudio, en plantaciones jóvenes de *Tectona grandis* en Guatemala.

Existen diferencias significativas en cuanto a los incrementos medios anuales en DAP, altura total, área basal y volumen total con respecto a las clases de productividad definidos, en plantaciones jóvenes de *Tectona grandis* en Guatemala.

Existe dependencia entre las diversas variables fisiográficas, climáticas, silviculturales y de suelo con respecto a el crecimiento y la productividad de las plantaciones jóvenes de *Tectona grandis*, en Guatemala.

Existen diferencias significativas entre la clasificación de las plantaciones de teca con base a la altura total por observación de campo, en relación a la clasificación realizada posteriormente por rangos de IMA ( $\text{m}^3/\text{ha}/\text{año}$ ) en volumen total.

## 2 REVISIÓN DE LITERATURA:

### 2.1 PROGRAMA DE INCENTIVOS FORESTALES EN GUATEMALA

Gálvez et al (2002), define los incentivos forestales como un pago en efectivo que el estado otorga al propietario de tierras de vocación forestal por ejecutar proyectos de reforestación o manejo de bosques naturales. Con la aprobación de la ley forestal (Decreto Legislativo 101-96), se crea el Programa de Incentivos Forestales (PINFOR), el que con una proyección de 20 años, se convierte en el principal instrumento de la Política Forestal para Guatemala. El PINFOR es administrado por el Instituto Nacional de Bosques (INAB) en coordinación con el Ministerio de Finanzas Públicas. Para lograr esto, el programa se sustenta económicamente en la asignación anual de un monto equivalente al 1% del Presupuesto de los ingresos ordinarios del Estado. Este monto asciende a un promedio anual de \$US 52 millones, aunque la asignación real promedio anual ha sido alrededor de \$US 14 millones. Los montos incentivados para los proyectos de reforestación por hectárea plantada se muestran en el cuadro 2.

Cuadro 2 Montos incentivados en proyectos de reforestación por el PINFOR, por fase de ejecución.

Fase número	Descripción	Monto quetzales
0	Establecimiento	5,000.00
1	Mantenimiento 1	2,100.00
2	Mantenimiento 2	1,800.00
3	Mantenimiento 3	1,400.00
4	Mantenimiento 4	1,300.00
5	Mantenimiento 5	800.00
TOTAL:		12,400.00

Las metas del programa, citadas por PAFG (2002), son para el período 1997 – 2016 de 285 mil ha para plantaciones y 572 mil ha de bosques naturales bajo manejo. Por otra parte, Gálvez et al (2002), menciona que para el total de proyectos establecidos hasta el 2002, los proyectos de reforestación han capturado el 98 por ciento de los recursos financieros invertidos por el PINFOR. Este hecho obedece, entre otros factores, a que las tierras con vocación preferentemente forestal en las regiones prioritarias del programa se encuentran desprovistas de vegetación.

El Plan de Acción Forestal para Guatemala (2002), menciona que es visible la conformación de cuatro núcleos forestales que concentran las plantaciones establecidas en el periodo de análisis

y que corresponden a las regiones prioritarias. Las Verapaces (Región II, Alta y Baja Verapaz) concentrando el 40 por ciento de la superficie plantada, Petén (Región VIII) concentra un 20 por ciento de la superficie plantada, Izabal (Región III) concentra un 9 por ciento de la superficie plantada y, Escuintla y Suchitepéquez (Región IX) concentra el 10 por ciento de la superficie plantada (ver figura 1A en anexos). Es importante mencionar también que tres especies ocupan la mayor área reforestada en estas regiones, siendo estas *Tectona grandis* (17.02 por ciento del total), *Pinus caribaea* (11.58 por ciento del total) y *P. maximinoi* (13.92 por ciento del total), según las estadísticas hasta el año 2002, como se muestra en el cuadro 3.

Cuadro 3 Superficie reforestada por especies para plantaciones del PINFOR, hasta el año 2002.

No.	Especie	Código	Superficie reforestada	
			ha	Porcentaje
1	<i>Tectona grandis</i>	TECTGR	5,351.28	17.02
2	<i>Pinus caribaea</i>	PINUCC	3,640.54	11.58
3	<i>Pinus maximinoi</i>	PINUMI	4,377.40	13.92
4	<i>Pinus oocarpa</i>	PINUOO	2,986.06	9.50
5	<i>Cupressus lusitanica</i>	CUPRLU	2,286.85	7.27
6	<i>Gmelina arborea</i>	GMELAR	1,635.05	5.20
7	<i>Cybistax donell-smithii</i>	CYBIDO	1,374.92	4.37
8	<i>Abies guatemalensis</i>	ABIEGU	69.42	0.22
9	<i>Callophylum brasilense</i>	COLLBR	325.52	1.04
10	<i>Vochysia guatemalensis</i>	VOCHGU	212.33	0.68
11	<i>Alnus sp.</i>	ALNUSP	117.80	0.37
12	<i>Virola koschnii</i>	VIROKO	17.12	0.05
<i>Total especies prioritarias</i>			22,394.29	71.24
<i>Otras especies</i>			9,041.32	28.76
TOTAL GENERAL			31,435.61	100.00

\* Base de datos del PINFOR, pago 2003.

En este cuadro se puede observar que del total de especies prioritarias son seis las que se encuentran plantadas en mayor cantidad, encontrándose como la principal Teca (Figura 1).

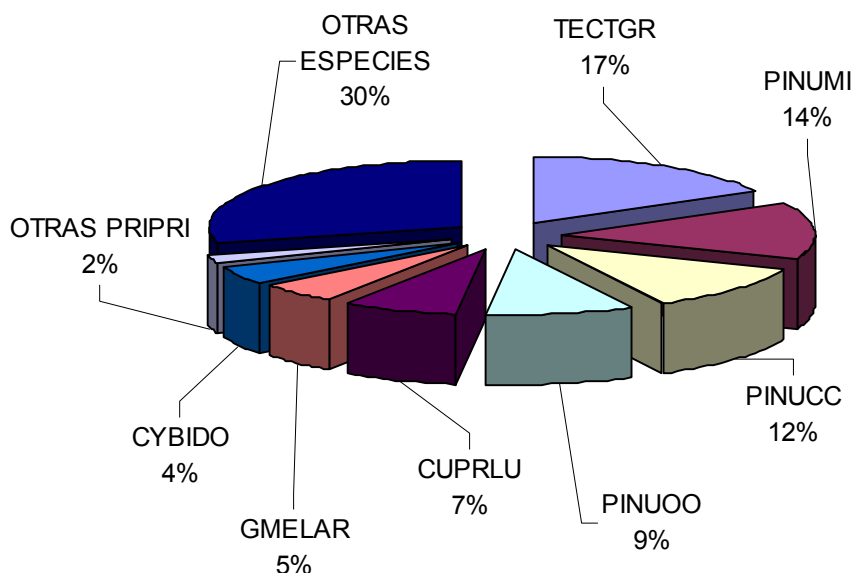


Figura 1 Porcentaje de superficie reforestada por especie para Guatemala, por medio del PINFOR, hasta el año 2002. (Base de datos PINFOR, 2003)

## 2.2 TECA (*Tectona grandis* L.f.):

La teca, es una de las especies más utilizadas en la reforestación de las zonas tropicales (Bhat, 2000). Briscoe (1995) menciona que también esta especie es conocida con nombres comunes como Teak, Teck, pertenece a la familia Verbenaceae, es originaria de los bosques deciduos húmedos y secos del trópico de la India, Laos, Myanmar (anteriormente Birmania) y Tailandia, en las latitudes 12 a 25° Norte y se ha establecido y adaptado bien en Malasia, Indonesia y otros países comprendidos en las latitudes 28° Norte a 18° Sur. Rao (1991), señala que esta especie es nativa únicamente entre las latitudes 9° y 15° Norte.

La teca, es una especie que tiene una larga historia de ordenación sistemática. Se introdujo en Indonesia (Java) hace cientos de años y las más antiguas plantaciones de teca en Sri Lanka se han documentado a fines del siglo XVII. Los primeros sistemas intensivos de ordenación de los bosques naturales se desarrollaron hace unos 150 años en Myanmar, desde donde la ordenación activa de la especie pasó a la India y Tailandia durante un período de unos 40 años (Gonzales, 2003).

Esta especie presenta fustes rectos, que generalmente cuentan con dominancia apical; es marcadamente heliófita y muy susceptible a la competencia ínterespecífica en su fase inicial de crecimiento (Lamprecht, 1990).

Teca se ha plantado con fines comerciales en el trópico cálido, especialmente en áreas inferiores a los mil metros de elevación sobre el nivel del mar (Briscoe, 1995). Chávez y Fonseca (1991), mencionan que para Centro América uno de los factores limitantes para el crecimiento de teca es la altitud por encima de los 1000 msnm<sup>2</sup>; estos autores encontraron la altitud como un factor ambiental que mostró diferencias en la estimación indirecta del índice de sitio, presentando los mas altos rendimientos de esta especie por debajo de los 100 msnm. Lamprecht (1990), cita que esta especie requiere una elevación de no más de 1300 msnm.

Lamprecht (1990), menciona que Teca requiere una estación seca bien definida, en los lugares donde se distribuye naturalmente, que comprende de tres a siete meses, con una precipitación media anual que va de los 760 a 5,000 mm<sup>3</sup> y una temperatura media anual de 21° a 28° C. Para Bacillieri et al (1998), lo óptimo para la especie es al menos contar con 4 meses secos con menos de 60 mm de precipitación, con precipitaciones medias entre 1,250 y 3,750 mm al año y temperaturas medias anuales que oscilen entre 22° y 27° C. Por otra parte Briscoe (1995), reporta que esta especie ha sido plantada en áreas con precipitaciones superiores a los 1000 mm por año. Para Centro América, Chávez y Fonseca (1991), indican el factor precipitación como uno de los principales que determinan el crecimiento de teca, encontrando que los mayores incrementos se producen en sitios con una variación entre 2,500 a 3,000 mm por año.

Briscoe (1995) y Lamprecht (1990), mencionan que la teca en condiciones naturales crece en diversos tipos de suelo, alcanzando los mejores desarrollos en suelos franco-arenosos a arcillosos, fértiles, bien drenados, profundos y con pH ligeramente ácidos o neutros; Briscoe (1995) cita que prefiere pH entre 5.0 y 8.5. Por otra parte Bacillieri et al (1998), menciona que los mejores crecimientos se dan en suelos bien drenados y fértiles, en substratos volcánicos o suelos aluviales con pH entre 6.5 y 7.5

Barros (1981), informa que para plantaciones forestales en general, los resultados de crecimiento de árboles dentro de una clase topográfica homogénea frecuentemente se asocian

---

<sup>2</sup> Metros sobre el nivel del mar de elevación.

<sup>3</sup> Milímetros de lluvia.

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.

### **2.3 TECA EN LATINOAMERICA:**

Teca ha sido sembrada de manera extensa fuera de su distribución natural, Ugalde (2003) estima que actualmente en América Latina existen aproximadamente entre 150 mil a 200 mil ha. Muchas de las nuevas plantaciones con esta especie están en zonas que hace veinte años se habrían considerado marginales para el cultivo, encontrándose en zonas de pluviosidad muy elevada y de estación seca muy breve o inexistente, características que no se dan en condiciones de distribución natural de la especie, pero parecen favorecer su crecimiento (Nair y Souvannavong, 2000).

FAO (2002) cita que en Centroamérica se han plantado aproximadamente unas 76 mil ha con esta especie. Por otra parte se menciona como una especie importante para el sector forestal centroamericano, ya que los productos de los raleos silviculturales se comercializan en los mercados internacionales (Moya, 2002).

El reciente desarrollo en gran escala de las plantaciones comerciales intensivas en la región ha favorecido la participación de diversos sectores en la investigación, con el fin de entender mas la silvicultura de la especie en el área y de esta manera obtener altas productividades de la especie (Nair y Souvannavong, 2000).

Según De Camino *et al* (2002), del total de plantaciones establecidas en América Central, alrededor del 18 por ciento se encontraba plantada con teca para 1998, siendo los países con mas plantaciones en orden de área plantada Costa Rica, Panamá, El Salvador y Guatemala. Estos autores añaden que un elemento importante en la producción de teca en la región son los sistemas de incentivos para la reforestación, encontrando con rotación de 20 a 25 años un incremento medio anual en volumen total de 20 a 25 m<sup>3</sup>/ha/año en los mejores sitios.



## **2.4 EVALUACION DE VARIABLES DE SITIO EN PLANTACIONES DE TECA:**

Montero et al (2001) encontró que para Costa Rica la precipitación y la temperatura media anual son importantes para el crecimiento de teca, además del déficit hídrico; encontró también que los mejores sitios se encuentran en terrenos de plano a pendientes inferiores en contraposición de pendientes medias y cimas.

Vallejos (1996) encontró que algunas de las variables fisiográficas, edáficas y climáticas tienen relación con el índice de sitio, para el cálculo de la calidad de sitio por el método indirecto en Costa Rica. Las variables que mostraron estar relacionadas fueron déficit hídrico, temperatura media anual, resistencia a la penetración y el contenido de calcio a una profundidad menor a 0.20 m.

En Venezuela, Hernández et al (1993), encontraron que las plantaciones con mayores crecimientos se presentaron en suelos moderadamente drenados a bien drenados, al contrario encontraron limitaciones para el crecimiento en terrenos pobremente drenados.

En otro estudio similar Vásquez y Ugalde (1994) encontraron que las variables que más tienen relación con el índice de sitio fueron déficit hídrico, precipitación media anual, posición topográfica y profundidad del suelo como variables del sitio y el contenido de calcio (Ca) y de hierro (Fe) en el primer horizonte, para 23 sitios en Costa Rica.

Chávez y Fonseca (1991), mencionan que para Centro América los factores limitantes para la especie son considerados los suelos poco profundos, que se encuentran compactados y que presentan bajos contenidos de calcio (Ca) y magnesio (Mg), en terrenos con pendientes moderadas a fuertes y terrenos mal drenados. De esta misma manera, Alvarado y Fallas (2004), menciona que la teca es una especie que requiere altos contenidos de calcio (Ca) para su desarrollo, lo que da por aseverado que es una especie determinada como basófila.

Plantaciones de hasta 3 años de edad, ubicadas en la cuenca del canal de Panamá, en sitios con pH menor a 5.5, presentaron los mejores crecimientos (Incremento medio anual –IMA- en volumen) en sitios con porcentajes de saturación de acidez por debajo de 8 por ciento y porcentaje de saturación de calcio mayores a 40 por ciento (Mollinedo, 2003).

Ugalde (1997), cita que en Centro América, deben ser considerados los siguientes aspectos para elección de sitios:

- Temperatura: Entre 25 y 28 grados Celsius se clasifican como buenos, fuera de esta temperatura la especie puede crecer inadecuadamente.
- Precipitación: La especie crece bien entre 1250 y 2500 mm/año, requiriendo de 3 a 5 meses de período seco por año.
- Los mejores rendimientos se obtienen en sitios ubicados a menos de 600 msnm.
- Suelos arenosos y medianamente arcillosos, fértiles, profundos, bien drenados, con pH neutro o medianamente ácidos, permiten buenos crecimientos.
- Como factores limitantes del crecimiento de la especie menciona suelos compactos o sombreados, texturas pesadas, sitios en terrazas o pequeñas colinas con pendientes.

En el cuadro 4 se resumen las diferentes variables que han sido evaluadas en plantaciones de tecla y que tienen alguna relación con el crecimiento y la productividad de esta especie, las cuales fueron importantes para definir la metodología del presente estudio.

Cuadro 4 Resumen de variables fisiográficas, climáticas y de suelo que han sido evaluadas para sitio en plantaciones de tecla en la región.

Diferentes tipos de variables			Referencia
Fisiográfica	Climática	Suelo	
Pendiente		Compactación Profundidad del suelo Drenaje Calcio y Magnesio	Chávez y Fonseca, 1991
		Drenaje	Hernández et al, 1993
Posición topográfica	Precipitación Déficit hídrico	Profundidad del suelo Calcio y Hierro	Vásquez y Ugalde, 1994
	Temperatura Déficit hídrico	Compactación Calcio	Vallejos, 1996
Pendiente Paisaje	Precipitación Temperatura Déficit hídrico		Montero, 2001
		Porcentaje de saturación de calcio y acidez	Mollinedo, 2003
		Porcentaje de saturación de calcio y acidez	Alvarado y Fallas, 2004

De acuerdo a Enters (2000), puede producirse teca en diversas condiciones, pero cabe esperar una alta productividad en sitios con buenas características de fertilidad de suelos, por los que compiten intensamente varios cultivos agrícolas comerciales. También es importante recalcar que el viento en terrenos de colinas o áreas donde se dan velocidades altas de viento es uno de los factores que limita el crecimiento de teca, debido a los problemas que tiene la planta por la pérdida de follaje, la que esta relacionada con la disminución de procesos fisiológicos como la fotosíntesis<sup>4</sup>. De acuerdo a esto en muchos países se está plantando esta especie en sitios degradados, lo que explica, al menos en parte, el bajo rendimiento.

## 2.5 CRECIMIENTO Y PRODUCTIVIDAD DE TECA:

El crecimiento y la productividad son parámetros importantes para evaluar la calidad del sitio en el que se encuentra una plantación, para el caso de teca, Chávez y Fonseca (1991) citan que esta especie presenta un crecimiento rápido en la etapa inicial, seguida por una etapa de medio crecimiento, a partir de la cual, luego de 8 a 10 años, el crecimiento disminuye. Esto se observó en los análisis fustales obtenidos por Pérez (1998) en Parrita, Puntarenas, Costa Rica en un individuo de 46 años. Los registros sobre crecimiento y productividad para la región, se refieren en mayor cantidad a plantaciones de teca en Costa Rica, los que se resumen en el cuadro 5.

Cuadro 5 Crecimiento y productividad en plantaciones jóvenes de teca en Costa Rica.

Variable	Unidad	TIPO DE SITIO			
		Bajo	Medio	Alto	Excelente
IMA en DAP	cm/año	< a 2.49*	2.5 a 3.01*	3.02 a 3.8*	> a 3.81*
		< a 1.5**	1.6 a 1.9**	> a 2.0**	
IMA en ALTURA TOTAL	m/año	< a 2.32*	2.33 a 3.14*	3.15 a 4.05*	> a 4.06*
		< a 1.5**	1.6 a 1.9**	> a 2.0**	
IMA en AREA BASAL	m <sup>2</sup> /ha/año	< a 2.04*	2.05 a 2.77*	2.78 a 3.73*	> a 3.74*
		< a 1.5**	1.6 a 2.4**	> a 2.5**	
IMA en VOLUMEN TOTAL	m <sup>3</sup> /ha/año	< a 11.83*	11.84 a 18.00*	18.01 a 26.57*	> a 26.58*
		< a 12.00**	12.1 a 17.9**	> a 18.00**	
		< a 5.0***	5.0 a 10.9***	11.1 a 18.0***	> a 18.0***

\* Vallejos (1996), plantaciones de 2 a 15 años

\*\* Vásquez y Ugalde (1995), plantaciones menores de 10 años

\*\*\* Montero (1999)

<sup>4</sup> Alfredo Alvarado, 2004. CIA, UCR, San José, Costa Rica. Comunicación personal.

También para Costa Rica, Galloway et al (2001) reportan resultados similares de IMA's en altura total entre 1.4 y 2.8 m/año y un IMA en volumen total de 5.4 m<sup>3</sup>/ha/año en sitios de bajo crecimiento hasta 26.7 m<sup>3</sup>/ha/año en sitios de alto crecimiento. Por otra parte, Mollinedo (2003), en su estudio en la cuenca del canal de Panamá, clasificó a las plantaciones de Teca en tres tipos de crecimiento, obteniendo diferentes IMA's en sitios con crecimiento bajo (< a 5 m<sup>3</sup>/ha/año), medio (de 5 a 10 m<sup>3</sup>/ha/año) y alto (> a 10 m<sup>3</sup>/ha/año), como se muestran en el Cuadro 6.

Cuadro 6 Promedio de valores de crecimiento y productividad de teca por escenarios de crecimiento en Panamá.

Crecimiento	Índice de Sitio (m)*	INCREMENTO MEDIO ANUAL PROMEDIO			
		ALTOT (m/año)	DAP (cm/año)	AB (m <sup>2</sup> /ha/año)	VOLTOT (m <sup>3</sup> /ha/año)
Bajo	13.43	1.81	1.99	0.47	3.44
Medio	15.38	2.73	2.77	0.70	7.06
Alto	17.14	3.72	3.67	0.95	11.93

\* Índice de sitio a una edad base de 10 años.

Francis (1995) cita que para Puerto Rico, con periodos de rotación que van de 50 a 80 años, existen sitios con IMA en volumen total que va de 8 a 12 m<sup>3</sup>/ha/año. En un estudio efectuado por FAO (1977) se indica que existe una fuerte semejanza en cuanto a crecimiento y rendimiento en plantaciones de Teca en El Salvador, Trinidad y Tobago y Jamaica. Keogh (1979 y 1980), reportó para El Salvador en sitios excelentes IMA en volumen total de 17 m<sup>3</sup>/ha/año y para sitios bajos 3 m<sup>3</sup>/ha/año; para Trinidad y Tobago sitios excelentes IMA en volumen total de 16 m<sup>3</sup>/ha/año y para sitios bajos 3 m<sup>3</sup>/ha/año, y para Jamaica sitios excelentes IMA en volumen total de 16 m<sup>3</sup>/ha/año y para sitios bajos 2 m<sup>3</sup>/ha/año.

En Guatemala, Padilla (1977), reportó en la costa sur un IMA en DAP de 2.33 cm/año y un IMA en altura total de 1 m/año. Castañeda y colegas (2003), indican que el 90 por ciento de los proyectos de reforestación con esta especie fueron plantados con una densidad inicial de 1,111 plantas/ha, encontrando la mayor parte de las plantaciones en sitios de calidad media con IMA en altura de 1.28 a 3.61 m/año.

Por otra parte Ávila (2003), encontró que para la región forestal II de Guatemala (Las Verapaces), las plantaciones de teca se encuentran en diferentes sitios, clasificándolos en tres rangos, como se muestra en el cuadro 7.

Cuadro 7 Promedio de valores de crecimiento y productividad de teca por calidad de sitio en plantaciones entre 3 y 5 años de edad en Alta Verapaz, Guatemala.

Clase de Sitio	INCREMENTO MEDIO ANUAL PROMEDIO		
	ALTOT(m/año)	DAP(cm/año)	VOLTOT(m <sup>3</sup> /ha/año)
BAJA	0.36	0.95	1.15
MEDIA	2.13	2.36	10.60
ALTA	2.99	3.07	20.62

Otros autores reportan crecimientos para India de 0.73 hasta 1.98 m/año de IMA en altura dominante en plantaciones de teca de 10 años (Kadambi, 1993); en Asia de 0.55 a 1.36 cm/año de IMA en DAP y de 1.17 a 7.02 m<sup>3</sup>/ha/año de IMA en volumen total en plantaciones de teca en la etapa juvenil (Bebarta, 1999). En plantaciones de Teca en Sabah, se presentan, a los 21 años, productividades un poco más altas que las anteriores, reportando para sitios bajos 5.6 m<sup>3</sup>/ha/año, para sitios medios 10.4 m<sup>3</sup>/ha/año y para sitios altos 14.8 m<sup>3</sup>/ha/año (Bacilieri, 1998).

## 2.6 INDICE DE SITIO:

### 2.6.1 Calidad de sitio e índice de sitio:

Alfaro (1983), recopila diferentes definiciones para sitio, calidad de sitio e índice de sitio, las cuales se describen a continuación:

Se denomina 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 biofísicas, climáticas y edáficas de un área” (Alfaro, 1983).

Calidad de sitio la definen como “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 (Alfaro, 1983).

Enters (2000), menciona que debido al papel crítico que le corresponde al sitio en la productividad, es necesario afinar, armonizar y difundir ampliamente los criterios de selección de sitios para plantaciones de teca. El mismo autor indica que para esto es necesario establecer y monitorear regularmente una red de parcelas permanentes, que abarquen toda la gama de condiciones de crecimiento y manejo, con normas y definiciones comunes para facilitar la comparación.

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 variación en la metodología empleada, 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 altura total, de los 100 árboles más altos por hectárea”.

Como lo definen, Vásquez y Ugalde (1995), 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 (fisiografía, suelo, clima, entre otros) y la vegetación existente.

### **2.6.2 Métodos de evaluación de calidad de sitio**

Se entiende por índice de sitio a “la estimación de la altura que los árboles dominantes (100 árboles más altos por hectárea) de una plantación coetánea alcanzan a una edad en particular, denominada como edad base” (Alfaro 1983). El índice de sitio es la expresión de la calidad de sitio, basada en la altura dominante, como lo exponen también Herrera y Alvarado (1998).

Vásquez y Ugalde (1994), basados en Carmean y Cutter *et al.* (1975 y 1983 respectivamente) 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. Para el segundo método se desean clasificar sitios donde aún no hay plantaciones, siendo necesario utilizar relaciones entre especies, características de la vegetación inferior (sotobosque) o factores de suelo y sitio.

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 podían ser muchas, tal como argumentan Vásquez y Ugalde (1995), debido a la gran cantidad de unidades que saldrían, por lo que considerando esto último, se definieron tres clases de sitio como se ven en el cuadro 8.

Cuadro 8 Clases de sitio para plantaciones forestales.

Clase de Sitio	Descripción
ALTO	Agrupación de 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.
BAJO	Sitios por debajo del promedio, considerados como marginales, difícilmente rentables que no deberían ser recomendados para ser plantados.

\*Basado en Vásquez y Ugalde (1995)

Es importante tener en claro que la rentabilidad de una plantación no se puede estimar únicamente con variables de sitio, suelo y silviculturales, debido a que se deben tomar en cuenta otras como acceso a las plantaciones, cercanía de mercados, superficie plantada, entre otras.

En Centroamérica se cuenta con estudios de este tipo, tal el caso de la recopilación efectuada por Herrera y Alvarado (1998), que analizaron dos estudios sobre teca que relacionan la calidad de sitio con factores ambientales, desarrollados en el pacífico seco de Costa Rica, donde se encontraron algunas limitantes como la precipitación y la temperatura media anual, la profundidad del suelo, la posición topográfica, entre otras variables que se han encontrado que influyen en el crecimiento de esta especie.

### 3. MATERIALES Y METODOS

#### 3.1 LOCALIZACIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO

El estudio se llevo a cabo para evaluar el crecimiento y productividad de los sitios donde se encuentra plantada la especie *Tectona grandis* L.F., a nivel nacional, en Guatemala. La evaluación se efectuó en las regiones forestales donde se ubican los proyectos de incentivos forestales para la reforestación con esta especie, que son las siguientes: Región II (Alta y Baja Verapaz), Región III (Nororiente), Región VIII (El Petén) y Región IX (Costa Sur).

Los sitios donde se desarrolló la investigación corresponden a plantaciones de teca establecidas a partir del año 1997, y que en la actualidad cuentan con edades entre 32 y 83 meses (2.7 a 7 años), los cuales se identificaron con ayuda de la base de datos proporcionada por la oficina del programa de incentivos forestales del INAB. En general se tomaron en cuenta 2,211.11 ha de plantaciones, distribuidas en las diferentes regiones, como se muestra en el cuadro 9.

Cuadro 9 Superficie plantada con *Tectona grandis* en Guatemala, establecidas entre 1,997 y 2000, en proyectos aprobados por el INAB.

REGION	SUBREGION	LOCALIDAD	AREA (ha)	AREA TOTAL (ha)	PORCENTAJE
II	II-1	Polochic	89.79	818.06	37.00
	II-3	Cobán	68.00		
	II-4	San Jerónimo	2.00		
	II-5	Fray Bartolomé Las Casas	652.27		
	II-6	Ixcán	6.00		
III	III-1	Izabal	651.53	657.08	29.72
	III-2	Zacapa	5.55		
VIII	VIII-1	San Benito	47.22	641.29	29.00
	VIII-2	Poptún	519.55		
	VIII-3	Sayaxché	22.12		
	VIII-4	La Libertad	52.40		
IX	IX-1	Suchitepéquez	57.65	94.68	4.28
	IX-2	Escuintla	28.93		
	IX-3	Retalhuleu	8.10		
<b>TOTAL:</b>			<b>2211.11</b>	<b>2211.11</b>	<b>100.00</b>

Fuente: Programa de Incentivos Forestales<sup>5</sup>

<sup>5</sup> Base de datos consultada en Enero del año 2004, con los proyectos que han sido aprobados y pagados por el programa a través del INAB.



En el anexo 1A, se puede observar la ubicación de las distintas sub-regiones en Guatemala, de acuerdo a la regionalización utilizada por el servicio forestal nacional en dicho país (INAB).

### **3.2 MATERIALES:**

Para llevar a cabo el trabajo de campo se hizo necesario contar con el siguiente material y equipo:

Cinta diamétrica,	Vara telemétrica para medición de alturas,
Cinta métrica,	Brújula,
Altímetro,	GPS,
Clinómetro,	Hipsómetro,
Pala,	Machete,
Bolsas plásticas,	Formularios,
Marcadores,	entre otros no menos importantes.

### **3.3 MÉTODOS:**

La información se recabó mediante una muestra compuesta por Parcelas Permanentes de Monitoreo (PPM), las cuales se encuentran establecidas en una red, en plantaciones de teca beneficiadas por el programa de incentivos forestales del INAB.

#### **3.3.1 *Tamaño de la muestra:***

El número de parcelas a evaluar ( $n$ ), se estableció basados en los recursos disponibles para efectuar el estudio, partiendo de la posibilidad de contar con el análisis completo de fertilidad de 148 muestras de suelo. En total se evaluaron 113 PPM, de las cuales a 74 se les efectuó muestreo de suelos (muestreo de dos profundidades de suelo por cada parcela), distribuidas estas en sitios de alto y bajo crecimiento con el fin de captar toda la variabilidad dentro de las plantaciones evaluadas. Las parcelas se distribuyeron de acuerdo al área plantada por cada una de las regiones forestales, como se puede observar en el cuadro 10.

#### **3.3.2 *Unidad experimental:***

Cada una de las unidades experimentales la constituyó una PPM, de acuerdo a la metodología del sistema MIRA-SILV (Ugalde, 2001). Con esta metodología se recomiendan parcelas

permanentes con 80 a 100 árboles iniciales, contando al final del turno cada parcela con 10 a 15 árboles. La forma de las parcelas es rectangular, con el fin de facilitar la ubicación, demarcación y el sentido de medición de los árboles en mediciones consecutivas en el monitoreo. El tamaño de cada PPM utilizada fue de 500 a 1,000 m<sup>2</sup>, de acuerdo a la red de parcelas establecidas por el INAB en cada uno de los proyectos evaluados.

Cuadro 10 Número de parcelas utilizadas para el muestreo por región forestal.

<b>REGION</b>	<b>No. PPM</b>	<b>% de PPM</b>	<b>No. M SUELOS*</b>	<b>% de M SUELOS</b>	<b>No. SITIOS**</b>	<b>% de sitios</b>
II	46	40.71	26	35.14	14	37.84
III	26	23.01	17	22.97	9	24.32
VIII	29	25.66	20	27.03	8	21.62
IX	12	10.62	11	14.86	6	16.22
<b>TOTAL</b>	<b>113</b>	<b>100.00</b>	<b>74</b>	<b>100.00</b>	<b>37</b>	<b>100.00</b>

\* Número de PPM donde se efectuó el muestreo de suelos

\*\* Sitios se entiende como sinónimo de finca o unidad productiva.

### **3.3.3 Ubicación y medición de las parcelas:**

Las parcelas que se utilizaron para la evaluación, son PPM instaladas a través de un muestreo exploratorio, las cuales consideran diferentes condiciones de sitio como: tipo de suelo, pendiente, drenaje, entre otros, con el fin de tomar en cuenta la mayor parte de variabilidad de condiciones que determinan las características de los sitios.

Se efectuaron recorridos dentro de las plantaciones con el fin de estratificar, de manera visual, áreas con diferentes tipos de crecimiento, donde deberían estar ubicadas las PPM. Para efectuar esta estratificación se tomo como referencia la edad de la plantación y la altura dominante de los árboles, diferenciando en cada lote de plantación lugares con bajo y alto crecimiento. En el caso de no contar con PPM establecidas en alguna de estas áreas se procedió a instalarla.

### **3.3.4 Demarcación de las parcelas:**

Las parcelas se delimitaron y marcaron en el terreno de acuerdo a la metodología propuesta por Ugalde (2001), con el fin de que estas se puedan reubicar en el futuro por personas diferentes a las que las establecieron originalmente, para facilitar y asegurar mediciones futuras confiables. Para esto se cavaron zanjas en el suelo en las esquinas de la parcela, de un metro de largo a

cada lado de la esquina (en forma de L), con un ancho de mas o menos 20 cm y de 25 cm de profundidad; además se identificaron los tres árboles de los bordes externos de cada esquina de la parcela, con pintura, de manera que se puedan visualizar desde largas distancias.

Dentro de cada parcela se numeró la totalidad de los árboles, con placas y clavos de aluminio en un mismo sentido, con el fin de asignar un número consecutivo a cada individuo. Al primer árbol dentro de la parcela (árbol número 1) se le agregó una placa para identificar el número de PPM dentro del lote de plantación.

Luego de establecidas las parcelas en plantaciones, donde el espaciamiento no es siempre regular, se procedió a medir el área exacta de la parcela, midiendo los cuatro lados y la pendiente de cada uno de estos. Se tomo la medición de cada lado como el espacio entre líneas de los árboles de los extremos de la parcela, con el fin de respetar el espaciamiento real del establecimiento de la plantación.

### **3.3.5 Variables evaluadas dentro de las parcelas**

Las variables que se evaluaron fueron agrupadas en 4 grupos, siendo estos: variables fisiográficas, variables climáticas, variables de suelo y variables silvícolas. Para la toma de datos se utilizaron los formularios propuestos por Ugalde (2001) en la metodología del sistema MIRA-SILV.

#### **3.3.5.1 Variables fisiográficas:**

Para estas variables se tomaron las que propone el sistema MIRA-SILV (Ugalde, 2001), siendo las siguientes:

Elevación sobre el nivel del mar en metros (ASNM), pendiente sobre el terreno en porcentaje (PEND), paisaje (1= ciénega o pantano, 2= terraza aluvial, 3= plano, 4= ondulado, 5= con colinas, 6= con colinas fragmentadas, 7= fuertemente escarpado, 8= montañoso), inundación (INUNDAC: 1=nunca, 2= 1 vez por año o menos, 3= 1 a 3 veces por año, 4= mas de 3 veces por año), pedregosidad superficial (PEDREGSUP: 1= 30%, 2 entre 30 y 60 % y 3 > 60%), erosión (EROS: 1= ninguna, 2= moderada, 3= severa y 4= muy severa), aspecto (ASPEC: 1= Norte, 2= Este, 3= Sur, 4= Oeste, 5= Llano, 6= Noreste, 7= Noroeste, 8= Sureste, 9= Suroeste),

viento (1= Poco viento, no afecta el crecimiento, 2= Moderado, afecta poco el crecimiento y 3= Muy severo, afecta el crecimiento), posición topográfica (POSICION: 1= cima, 2= pendiente media, 3= pendiente inferior y 4= fondo plano), drenaje superficial (DRENEX: 1= libre y 2= impedido), topografía (TOPOG: 1= plana, 2= cumbre o cima, 3= escarpada, 4= cumbre redondeada, 5= pendiente media, 6= terraza, 7= pendiente inferior, 8= depresión, 9= llanura de inundación, 10= variada). Todas estas variables fueron evaluadas al momento de la medición efectuada en cada una de las PPM.

### **3.3.5.2 Variables climáticas:**

Se obtuvieron las variables precipitación promedio anual en milímetros (PPPROM), temperatura promedio anual en grados centígrados (TEMPROM) y el déficit hídrico en dos valores, a 100 mm y 50 mm, entendiendo como déficit hídrico el número de meses que precipita menos de 100 o 50 mm respectivamente.

Los valores para cada PPM se extrajeron a partir de imágenes Grid generadas para Guatemala por el proyecto CATIE-ESPRED, del MAGA<sup>6</sup> en Guatemala.

Para la obtención de los datos primero se generó una base de datos en Shape, con ayuda del software Arc View, de todas las PPM georeferenciadas con apoyo del GPS (Anexo 2A), a partir de la cual se extrajeron los datos de los Grid de precipitación y temperatura, con ayuda de la extensión GRID PIG de Arc View.

Los Grid de precipitación promedio anual representa la media aritmética de las alturas de precipitación anuales medidas en milímetros de una serie de registros lo más larga posible, al menos treinta años para que los datos sean confiables. Los datos anuales se obtuvieron a través de procesar las medias mensuales de precipitaciones de la serie de registros de cada estación, posteriormente se realiza una suma aritmética de los promedios mensuales de cada estación considerada. El mapa de temperatura promedio anual se procesa de forma similar a lo indicado para las precipitaciones. Los mapas climáticos fueron elaborados durante el año 2000 y editados en el año 2001, para su realización se utilizó la información proporcionada por el INSIVUMEH correspondiendo a 140 estaciones meteorológicas. Como elementos de apoyo para la definición de los trazos de las isóneas, se utilizaron 88 estaciones pluviométricas

---

<sup>6</sup> Ministerio de Agricultura Ganadería y Alimentación, Guatemala

consideradas en el Plan Maestro de Riego y Drenaje (PLAMAR) y 40 estaciones meteorológicas fronterizas con las Repúblicas de México, El Salvador y Honduras.

Al utilizar datos meteorológicos de las estaciones más cercanas a las plantaciones, algunos datos pudieran presentar problemas en el análisis, dependiendo principalmente de: cercanía de estaciones meteorológicas a las plantaciones forestales, tipo de estaciones meteorológicas con que se cuente, disponibilidad de datos para los análisis, entre otros (Galloway, et. al., 1991).

### **3.3.5.3 Variables de suelo:**

Para la obtención de las variables de suelo se elaboró una calicata al centro de cada PPM con una profundidad de 0.50 m y una superficie de 0.50 m por lado, obteniendo dos muestras de cada calicata, a dos profundidades diferentes: la primera de estas de 0 a 0.20 m y la segunda de 0.20 a 0.40 m de profundidad. A cada una de las muestras se le efectuó un análisis completo de fertilidad. Las profundidades tomadas en cuenta se basan en estudios efectuados anteriormente y citados en la revisión bibliográfica, donde se han encontrado resultados de la relación suelo – planta.

El análisis de laboratorio se proceso de la siguiente manera: Para el pH se utilizó el método Potenciométrico, relación agua:suelo 2.5:1. Para las variables fósforo (P), potasio (K), calcio (Ca), magnesio (Mg), cobre (Cu), zinc (Zn), hierro (Fe) y manganeso (Mn) se utilizó la solución extractora de Carolina del Norte o Mehlich 1 o doble ácido; el P se determinó por colorimetría utilizando como reductor ácido ascórbico, el K se determinó por emisión y el resto de elementos por absorción atómica. Para el CIC y las bases intercambiables (Ca, Mg, Na y K) por el método de acetato de amonio 1 normal pH de 7. Materia orgánica se obtuvo por el método de digestión húmeda Walkley y Black modificado. Acidez intercambiable se obtuvo extraída con KCl 1 normal y titulado con NaOH 0.01 normal. La textura por medio de granulometría por el método de Bouyucos, con lecturas iniciales a los 40 segundos y finales a las 2 horas.

Las variables analizadas fueron pH, P, en ppm; K, en ppm, meq/100 ml y meq/100 gr; Ca y Mg, en meq/100 ml y meq/100 gr; Cu, Zn, Fe y Mn, en ppm; Na, en meq/100 gr; materia orgánica, saturación de bases, arcilla, limo y arena en porcentaje; CIC en meq/100 gr; acidez intercambiable en meq/100 ml.

Se generaron otras variables derivadas de las fórmulas contenidas en la Guía para la interpretación de análisis de suelo utilizada por CATIE, como relación Ca:Mg, CICE (bases + acidez intercambiable), saturación de acidez en porcentaje  $[(\text{acidez intercambiable} / \text{CICE}) * 100]$ , saturación de calcio en porcentaje  $[(\text{Ca} / \text{CICE}) * 100]$ .

Además de las variables provenientes del laboratorio de suelos se tomaron otras como grosor del horizonte orgánico en cm (HORIZORG), grosor del horizonte sáprico en cm (HORIZSAPI), profundidad efectiva en cm (PROFEFEC), compactación por medio de observación en el campo a criterio del investigador y relacionada al uso anterior del suelo (alta, media, ninguna), drenaje interno (1= bueno, 2= imperfecto, 3= moderado), pedregosidad interna (1= no existe, 2= menos de 30 %, 3= de 30 a 60 %, 4= mas de 60 %).

#### **3.3.5.4 Variables silvícolas:**

En cada una de las PPM se tomaron variables silvícolas, basados en la metodología del sistema MIRA-SILV, de manera directa, a partir de las cuales se obtuvieron otras variables silvícolas indirectas mediante el uso del Software del sistema. Además se tomaron en cuenta variables de manejo y establecimiento de la plantación.

VARIABLES MEDIDAS DIRECTAMENTE EN LAS PPM:

Altura total en metros, diámetro a 1.30 m de altura del fuste en centímetros, fecha de plantación, fecha de medición, número inicial de árboles plantados por ha.

Las variables anteriores fueron ingresadas al software del sistema MIRA-SILV, para obtener las siguientes variables:

Edad de la plantación en meses, número actual de árboles por ha, porcentaje de sobre vivencia, Índice de sitio (INDSITIO) a una edad base de 10 años (basado en Vallejos y Ugalde, 1996), Altura dominante en metros (ALTDOM), área basal en  $\text{m}^2/\text{ha}$  (ABASALHA), diámetro promedio a la altura del pecho en cm (DAP), altura total promedio en metros (HTOT), IMA en altura total en  $\text{m}/\text{año}$  (IMAHTOT), IMA en DAP en  $\text{cm}/\text{año}$  (IMADAP), IMA en área basal en  $\text{m}^2/\text{ha}/\text{año}$  (IMAAB), volumen total con corteza en  $\text{m}^3/\text{ha}$  (utilizando factor de forma 0.45 como aparece en la base de datos del sistema MIRA-SILV), IMA en volumen total en  $\text{m}^3/\text{ha}/\text{año}$  (IMAVOL)

Se evaluaron además de las anteriores, variables de manejo de las plantaciones: uso anterior del suelo, fertilización de la plantación, limpiezas, deshierbes, raleos, podas y control de plagas y enfermedades, tomando el número y la frecuencia por año de cada una de estas.

### **3.4 ANÁLISIS DE LA INFORMACIÓN**

#### **3.4.1 Generación de base de datos**

Luego de efectuadas las mediciones de las variables silvícolas, se procedió a generar una base de datos, ingresando los valores de las variables al software de MIRASILV (Ugalde, 2001). Después de tener todos los datos ingresados en el software se exportaron para contar con una base general en una hoja electrónica, utilizando para este caso el programa Excel, al cual se le agregaron también las variables de suelo, fisiográficas y de manejo de las plantaciones para poder efectuar luego los análisis estadísticos.

#### **3.4.2 Determinación de las variables dependientes:**

La base de datos generada contaba con las variables dependientes que se utilizaron para el análisis, obteniendo el índice de sitio por el modelo de predicción del INDSITIO, basado por el modelo generado por Vallejos y Ugalde (1996 y 1998), detallado a continuación:

$$\text{Ln (IS)} = \text{Ln (HDOM)} + 1.8253 (1/\text{Edad}^{0.5162} - 1/\text{Edad base}^{0.5162})$$

De donde:    Ln                    = logaritmo natural  
                  HDOM                = altura dominante  
                  Edad                    = en años de la plantación  
                  Edad base                = 10 años

La variable INDSITIO se empleo para estimar la calidad de sitio de las plantaciones y la variable IMAVOL se utilizo para evaluar la productividad de las plantaciones.

#### **3.4.3 Análisis de crecimiento y productividad**

Esta determinación es importante por que permite visualizar, de mejor manera el potencial productivo de un sitio.

Para el caso del crecimiento se utilizó la variable Índice de Sitio en metros (INDSITIO), en cuatro niveles siendo estos BAJO(menor a 16 m), MEDIO(de 16 a 20 m), ALTO(de 20 a 24 m) Y EXCELENTE(mayor a 24 m).

Para el caso de productividad se utilizó la variable incremento medio anual en volumen total en m<sup>3</sup>/ha/año (IMAVOL) en cuatro niveles: BAJO(menor a 5 m<sup>3</sup>/ha/año), MEDIO(de 5 a 10 m<sup>3</sup>/ha/año), ALTO(de 10 a 20 m<sup>3</sup>/ha/año) y EXCELENTE(mayor a 20 m<sup>3</sup>/ha/año).

#### **3.4.4 Análisis gráfico y de correlación**

Para analizar las variables que determinan el crecimiento y la productividad de Teca se efectuó primero un análisis gráfico para ver el comportamiento de cada una de las variables dependientes (IMAHTOT e IMAVOL) con el resto de variables fisiográficas, climáticas, de suelo y silviculturales, para observar los distintos comportamientos en los distintos sitios evaluados.

Se efectuó un segundo análisis de la información, un análisis de correlación de Pearson, para determinar las variables que se encuentran más correlacionadas con las variables dependientes y definir en conjunto con los dos análisis las variables que más influyen en el comportamiento de IMAHTOT e IMAVOL.

#### **3.4.5 Análisis de regresión múltiple**

Para efectuar el análisis de regresión múltiple, con el fin de obtener los modelos de predicción de sitio, fue necesario agrupar las variables en dos, un primer grupo con todas las variables presentes en las 66 PPM, sin tomar en cuenta aquellas variables que tuvieran valores de acidez intercambiable, y un segundo grupo que contaba con las variables como acidez intercambiable, porcentaje de saturación de calcio y porcentaje de saturación de acidez(debido a que estas variables solo se reportan en suelos con valores por debajo de los 5.5 de pH), que fue un total de 11 PPM.

Se seleccionaron las variables a través de la regresión lineal múltiple con el procedimiento estadístico STEPWISE o regresión por pasos, con el fin de obtener los mejores modelos para cada grupo de variables, a partir del cual se probó generar los modelos de predicción.



En el caso de los modelos generados para las relaciones silvícolas, se efectuó un análisis de residuos con el fin de eliminar puntos extraños dentro de la dispersión. Se generaron los modelos de acuerdo a una elección de los que presentaron los mejores valores de determinación ( $r^2$ ) y que tuvieran una probabilidad con valores de  $p < a 0.05$ .

#### 4. RESULTADOS Y DISCUSION

En general se evaluaron un total de 113 PPM en 37 fincas distribuidas en cuatro regiones, de las cuales 74 PPM se les efectuó muestreo de suelos, como se indicó en el cuadro 10.

##### 4.1 ANALISIS DE CRECIMIENTO Y PRODUCTIVIDAD

En este análisis se encontraron rangos, en promedio por PPM, de DAP de 3.10 a 23.69 cm, alturas totales de 2.61 a 20.07 m, altura dominante de 4.73 a 21.36 m, área basal de 0.68 a 24.39 m<sup>2</sup>/ha, volumen total de 1.22 a 216.12 m<sup>3</sup>/ha. Los valores de índice de sitio a una edad base de 10 años fueron de 4.95 a 34.10 m de altura dominante. Se obtuvieron incrementos medios anuales –IMA- en DAP de 0.78 a 5.21 cm/año, en altura total de 0.69 a 4.58 m/año, en área basal de 0.17 a 5.73 m<sup>2</sup>/ha/año y en volumen total de 0.34 a 38.54 m<sup>3</sup>/ha/año. Con estos datos se puede notar la amplia variabilidad y el rango de crecimiento y productividad de teca, debido principalmente a la gran diversidad de sitios donde se establecieron estos proyectos de reforestación.

##### 4.1.1 Crecimiento en plantaciones de teca

Se presentaron diferencias (con un  $p < 0.0001$ ) en las cuatro clases de sitio evaluadas (figura 2), mostrando los valores de crecimiento y productividad para cada clase de sitio en el cuadro 11, esto se dio debido a la gran diversidad de sitios evaluados. Los resultados obtenidos en el análisis de varianza para la diferencia presentada en las cuatro clases de sitio, se muestra en el anexo 3A.

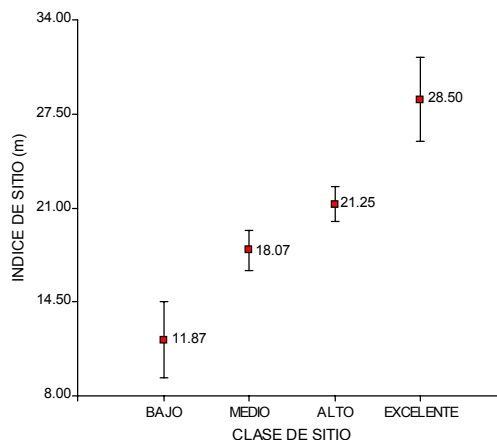


Figura 2 Diferencias por clase de sitio en plantaciones de *Tectona grandis* en Guatemala, basado en índice de sitio a una edad base de 10 años.

Cuadro 11 Promedio de crecimiento y productividad obtenidos en las cuatro diferentes clases de sitio en plantaciones de teca en Guatemala.

CLASE DE SITIO	INDICE DE SITIO (metros)	IS <sub>10</sub>	IMA DAP (cm/año)	IMA HTOT (m/año)	IMA AB (m <sup>2</sup> /ha/año)	IMA VOL (m <sup>3</sup> /ha/año)
BAJO	< a 16	11.87	1.89	1.55	1.12	4.54
MEDIO	16 a 20	18.07	2.62	2.25	2.23	11.76
ALTO	20 a 24	21.25	2.54	2.43	2.59	14.88
EXCELENTE	> a 24	28.50	3.27	3.08	3.44	25.38

Se encontró que el 51.85 % de los sitios evaluados se encuentran en sitios clasificados como bajos, que presentan valores de Índice de sitio (IS<sub>10</sub>)<sup>7</sup> menor a 16 metros de altura dominante. En estos terrenos se obtuvieron valores de IMA en DAP promedio de 1.89 cm/año, valores de IMA en altura total promedio de 1.55 m/año, IMA en área basal promedio de 1.12 m<sup>2</sup>/ha/año y con una productividad media de 4.54 m<sup>3</sup>/ha/año expresada en IMA en volumen total.

Dentro de los sitios de clase baja, se encuentran PPM en Cahabón, Panzós y Fray Bartolomé de las Casas en Alta Verapaz; Livingstone, El Estor y Los Amates en Izabal; Dolores y San Francisco en El Petén; con valores de IS<sub>10</sub> menores a 10 m. En la figura 3, se muestra uno de los sitios ubicados en clase de sitio baja, en el municipio de El Estor, Izabal, donde se observan los valores de altura dominante observados en las PPM, de acuerdo a la curva guía para el modelo de IS<sub>10</sub> generada por MIRASILV.

Se encontraron crecimientos excelentes en un 9.26 % de los sitios. En estos sitios se encontraron valores promedio de IS<sub>10</sub> de 28.50 m, IMA promedio en DAP de 3.27 cm/año, promedio de IMA en altura total de 3.08 m/año, IMA en área basal promedio de 3.44 m<sup>2</sup>/ha/año y una productividad promedio de 25.38 m<sup>3</sup>/ha/año, expresada en IMA en volumen total.

Los cinco sitios encontrados con valores de IS<sub>10</sub> superior a 24 m, se localizan: 1 en Chahal, Alta Verapaz; 3 en Livingstone, Izabal, y 1 en Managua, Escuintla. En la figura 4 se puede observar el comportamiento de las alturas dominantes de cada PPM de uno de estos sitios de excelente crecimiento, en relación a la curva guía de IS<sub>10</sub>.

<sup>7</sup> Índice de Sitio en metros de altura dominante a una edad base de 10 años.

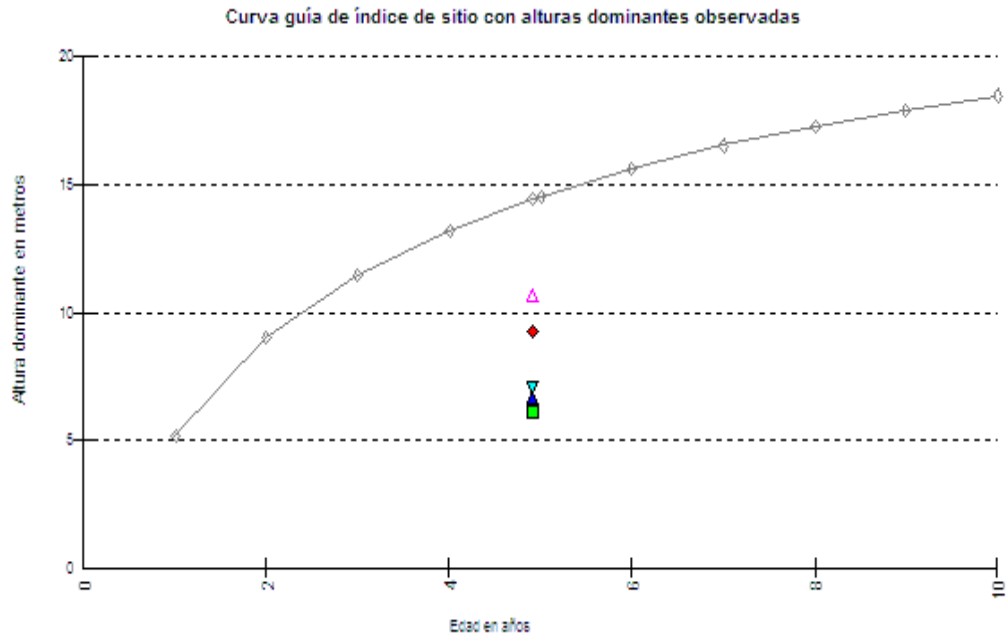


Figura 3 Grafico de valores de altura dominante observada en relación a la curva guía para IS<sub>10</sub>, en plantación de *Tectona grandis*, El Estor, Izabal, Guatemala.

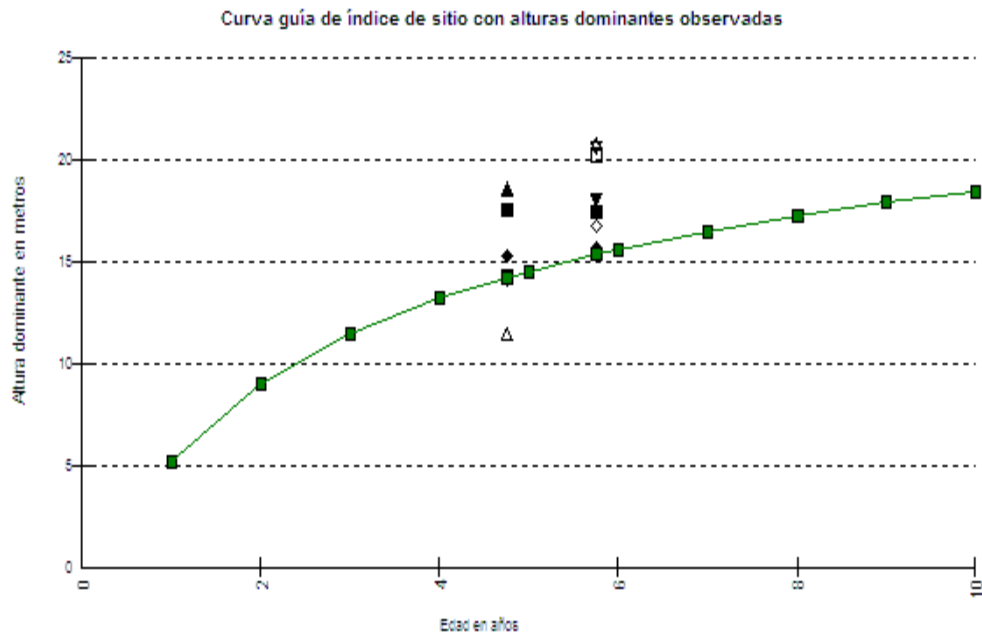


Figura 4 Grafico de valores de altura dominante observada en relación a la curva guía para IS<sub>10</sub>, en plantación de *Tectona grandis*, Chahal, Alta Verapaz, Guatemala.

Los sitios con crecimientos medios y altos, corresponden a un 38.89 % del total, encontrándose en condiciones adecuadas de crecimiento (cuadro 12). Presentan productividades medias de 11.76 y 14.88 m<sup>3</sup>/ha/año de IMA en volumen total, respectivamente, con IMA en DAP superiores de 2.62 cm/año y valores de IMA en altura total mayores a 2.25 m/año.

Cuadro 12 Número de PPM, sitios y porcentajes por clase de sitio, encontrados en plantaciones de teca en Guatemala.

SITIO	INDICE DE SITIO (metros)	NO PPM	% de PPM	NO SITIOS	% SITIOS
BAJO	< a 16	68.00	60.18	28.00	51.85
MEDIO	16 a 20	18.00	15.93	15.00	27.78
ALTO	20 a 24	11.00	9.73	6.00	11.11
EXCELENTE	> a 24	16.00	14.16	5.00	9.26
TOTAL		113.00	100.00	54.00	100.00

Se puede observar en la figura 5 la gran variedad de sitios evaluados (113 PPM), ubicadas en todas las clases de Índice de Sitio, comparando las alturas dominantes observadas en el campo con la curva guía de IS<sub>10</sub>.

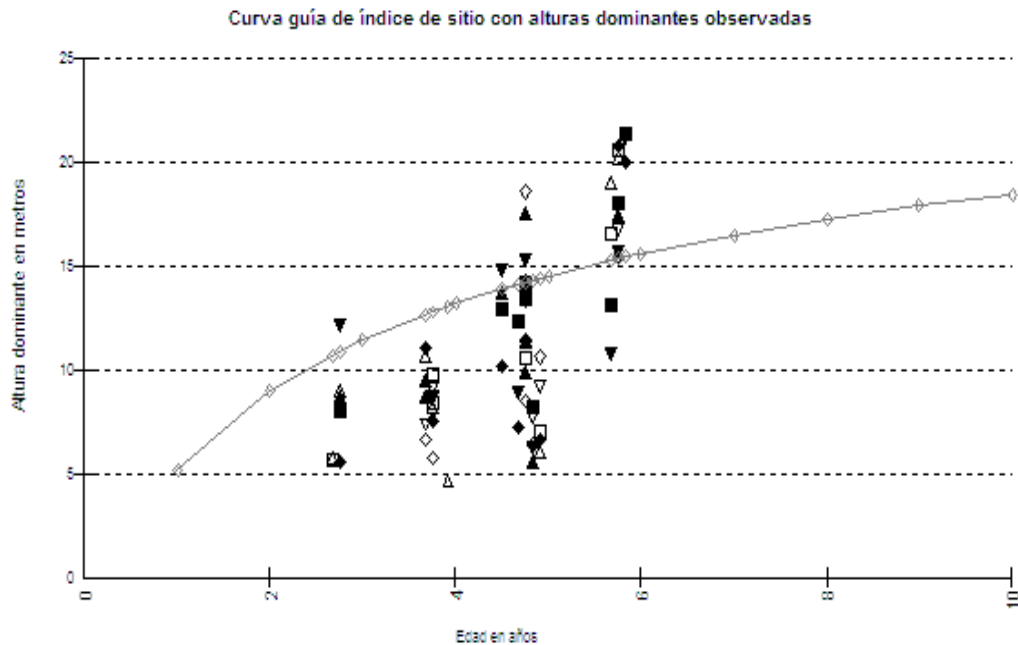


Figura 5 Grafico de valores de altura dominante observada por PPM en relación a la curva guía para IS<sub>10</sub>, en plantaciones de *Tectona grandis* en Guatemala.

Se encontraron plantaciones en sitios con valores de  $IS_{10}$  desde 4.95 m en PPM con crecimientos bajos, hasta valores de  $IS_{10}$  de 34.10 m en PPM con crecimientos excelentes, resaltándose de esta manera la importancia en la selección del sitio para plantar esta especie. No obstante el 52 % de los sitios se encuentran en clases bajas de crecimiento, es importante mencionar que se encontraron PPM con valores de  $IS_{10}$  superiores a la media para Centro América, que es de 18 metros de altura dominante, lo que indica que con una buena selección de sitio se pueden lograr crecimientos altos y excelentes.

#### 4.1.2 Productividad de plantaciones de teca

Para las cuatro clases de productividad evaluadas, se encontraron diferencias ( $p < 0.0001$ ), en los promedios de IMA en volumen total para cada clase, como se muestran en la figura 6. El análisis de varianza para la productividad se encuentra en anexo 3A.

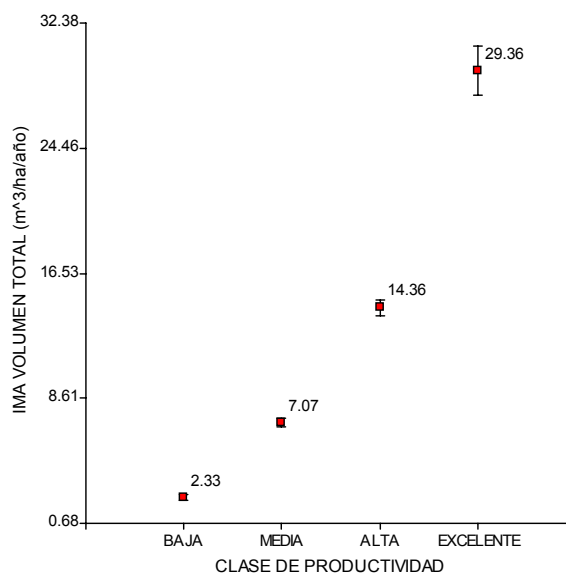


Figura 6 Diferencias por clase de productividad en plantaciones de *Tectona grandis* en Guatemala, basado en incremento medio anual en volumen total.

Los sitios clasificados con productividad baja hacen un 38.60 % del total de sitios evaluado (22 fincas) y corresponden a valores de 49 PPM (43.36%). Estos sitios se ubican en El Estor y Los Amates en Izabal, Dolores y San Francisco en El Petén, Gualán en Zacapa; Cahabón, Panzós y Fray Bartolomé de las Casas en Alta Verapaz. Presentan un promedio de IMA en volumen total de 2.33 m³/ha/año, IMA en DAP de 1.60 cm/año, IMA en altura total de 1.30 m/año y un IMA en área basal de 0.75 m²/ha/año (cuadro 13). No se puede generalizar que en estas localidades

solamente se presentan crecimientos bajos, debido a que las plantaciones se han establecido generalmente en terrenos no apropiados para teca. Con los valores que se presentan en promedio de IMA en volumen total se asegura que estas plantaciones difícilmente podrán tener éxito en la producción de madera en el futuro.

Los mejores sitios se encuentran en sitios con clase de productividad excelente y hacen un 29.36 % de todos los sitios evaluados. Hay cinco sitios de productividad excelente, como se muestra en el cuadro 14, ubicándose 1 en Dolores, Petén; 1 en Chahal, Alta Verapaz; 1 en Río Dulce, Livingstone, Izabal, 1 en Patulul, Suchitepéquez y 1 en Managua, Escuintla.

Cuadro 13 Promedio de crecimiento y productividad obtenidos en las cuatro diferentes clases de productividad en plantaciones de teca en Guatemala.

CLASE DE PRODUCTIVIDAD	IMA VOLUMEN (m <sup>3</sup> /ha/año)	IS <sub>10</sub>	IMA DAP (cm/año)	IMA HTOT (m/año)	IMA AB (m <sup>2</sup> /ha/año)	IMA VOL (m <sup>3</sup> /ha/año)
BAJO	< a 5	11.38	1.60	1.30	0.75	2.33
MEDIO	5 a 10	17.19	2.29	2.04	1.66	7.07
ALTO	10 a 20	18.40	2.78	2.48	2.51	14.36
EXCELENTE	> a 20	26.43	3.48	3.09	3.95	29.36

El 52.64 % del total de sitios evaluados se encuentra con una productividad en clase de medio y alto crecimiento, con IMA en DAP promedio de 2.29 y 2.78 cm/año, IMA en altura total de 2.04 y 2.48 m/año respectivamente. Estos sitios presentan productividades promedios de 1.66 y 2.51 m<sup>2</sup>/ha/año de IMA en área basal y 7.07 y 14.36 m<sup>3</sup>/ha/año de IMA en volumen total respectivamente.

Cuadro 14 Número de PPM, sitios y porcentajes por clase de productividad, encontrada en plantaciones de teca en Guatemala.

SITIO	IMA VOLUMEN (m <sup>3</sup> /ha/año)	NO PPM	% de PPM	NO SITIOS	% SITIOS
BAJO	< a 5	49	43.36	22	38.60
MEDIO	5 a 10	21	18.58	15	26.32
ALTO	10 a 20	29	25.66	15	26.32
EXCELENTE	> a 20	14	12.39	5	8.77
TOTAL		113	100.00	57	100.00

En comparación con otros estudios, como el de Mollinedo (2003), en la zona oeste de la cuenca del canal de Panamá, se puede observar que en Guatemala se reportó una clase de productividad más, la denominada como excelente, debido a que se encontraron valores de IMA en volumen por arriba de 20 m<sup>3</sup>/ha/año, en comparación a la mayor productividad encontrada

en el estudio citado, que fue de 13.33 m<sup>3</sup>/ha/año. Estos resultados son importantes, por que nos indican que con una buena selección de los terrenos donde se planta teca se pueden obtener crecimientos con productividades excelentes, como los encontrados en el estudio.

Otros estudios realizados en Costa Rica, reportan resultados similares, con un amplio rango de productividad, para sitios bajos 5.4 m<sup>3</sup>/ha/año de IMA en volumen total, un poco más altos que los de este estudio; mientras que para los sitios más altos reportan medias de 26.7 m<sup>3</sup>/ha/año, que están por debajo de los encontrados en Guatemala (Galloway et al, 2001).

## 4.2 VARIABLES QUE DETERMINAN CRECIMIENTO Y PRODUCTIVIDAD

### 4.2.1 Variables fisiográficas

Elevación sobre el nivel del mar: las parcelas evaluadas se encontraron distribuidas desde 20 m hasta 800 m sobre el nivel del mar. Por arriba de 220 msnm de elevación no se encontraron PPM con valores por arriba de los 19.5 m de IS<sub>10</sub>, como se observa en la figura 7. No obstante en sitios con elevaciones menores a 220 se presentan PPM con valores de IS<sub>10</sub> bajos, también se encontró en este rango de elevación las PPM con los mejores crecimientos.

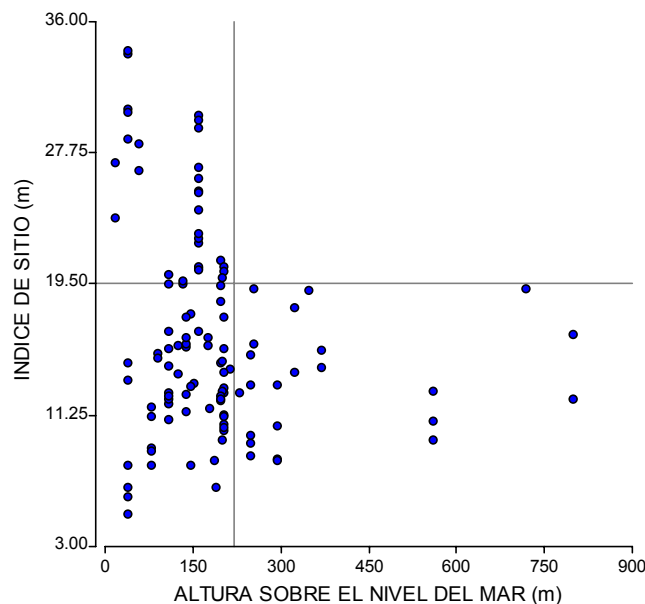
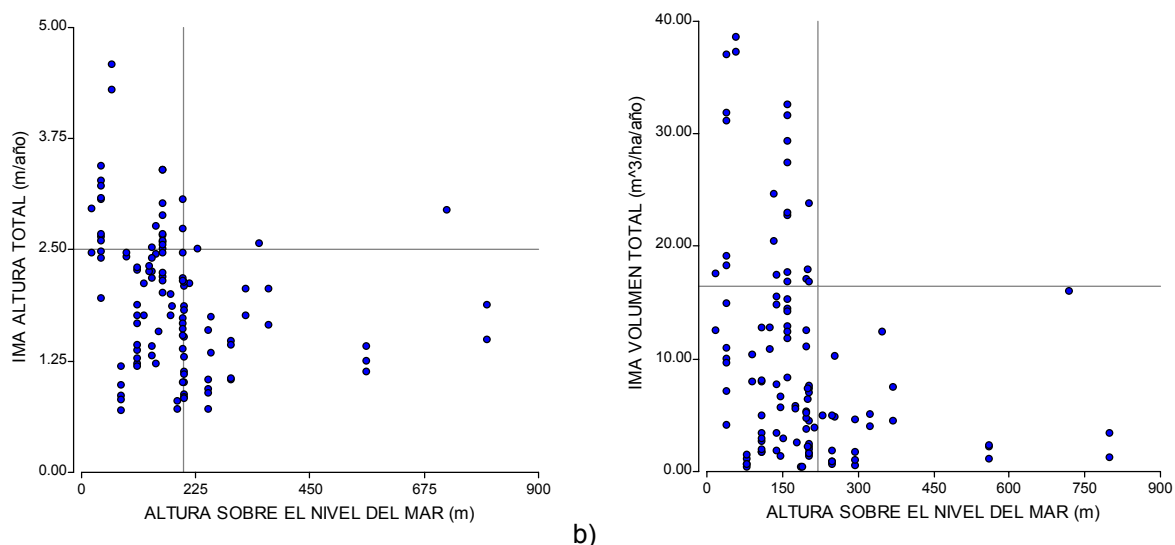


Figura 7 Valores de IS<sub>10</sub> en relación con la elevación en metros sobre el nivel del mar de PPM en plantaciones de *Tectona grandis* en Guatemala.



Los mejores crecimientos de IMA en altura total se encontraron por debajo de los 200 msnm, con valores superiores a 2.5 m/año. Los sitios con mejor productividad, al igual que el IS<sub>10</sub>, se presentaron en elevaciones por debajo de los 220 msnm. Se observa, en la figura 8, que también por debajo de 220 msnm de elevación se encontraron PPM con crecimiento y productividad baja. Es importante resaltar en el análisis gráfico que en sitios con elevaciones mayores de 220 msnm no se encontraron plantaciones con productividad superior a 16.5 m<sup>3</sup>/ha/año, pudiendo observar esto en el cuadrante separado, sin datos, en la figura 8b.



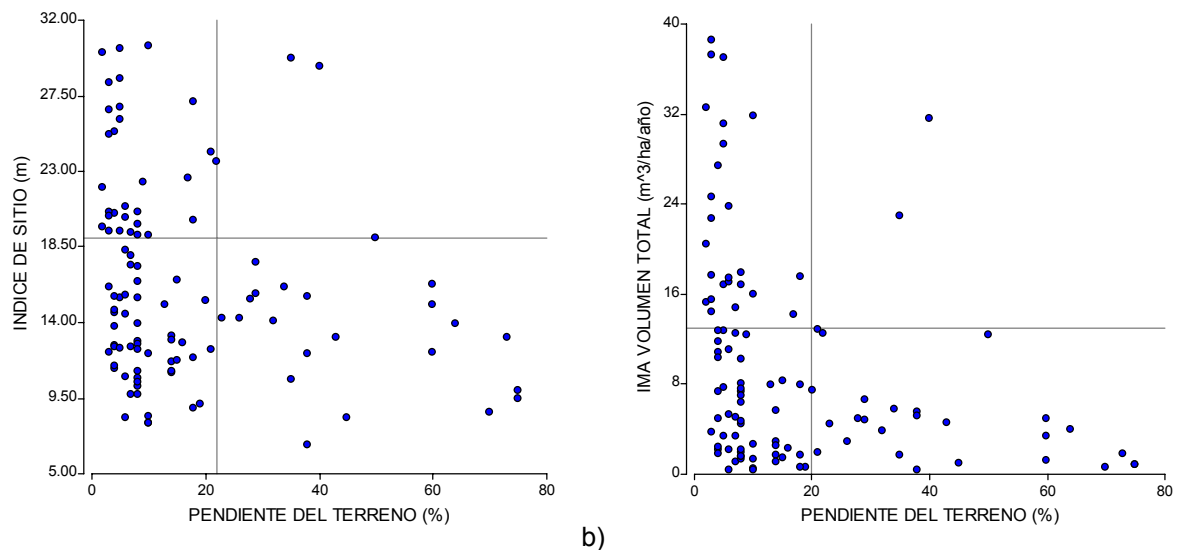
a) b)  
 Figura 8 Valores de crecimiento (a) y productividad (b) (IMA en altura total y volumen total) con respecto a la elevación en metros sobre el nivel del mar de PPM en plantaciones de *Tectona grandis* en Guatemala.

A pesar de no haber encontrado una correlación estadísticamente significativa de la elevación en metros sobre el nivel del mar, son importantes las observaciones que se obtienen, por medio del análisis gráfico, de las tendencias de los crecimientos y la productividad de teca en Guatemala. Este tipo de análisis permitió identificar algunos comportamientos de los crecimientos con respecto de esta variable independiente.

Las PPM que se encuentran en los sitios con excelente productividad se ubican en los municipios de Masagua, en Escuintla; Chahal en Alta Verapaz y Río Dulce, Livingstone en Izabal; que se encuentran en elevaciones por debajo de los 200 msnm.

Pendiente del terreno: Al analizar esta variable se encontraron parcelas ubicadas en pendientes desde 2% hasta 75% sobre el terreno. Se encontró que el 72 % (82 PPM) del total de PPM se encuentran en pendientes menores al 23%.

No se encontraron valores de correlación altos entre pendiente y el crecimiento y la productividad, pero es importante detallar, como se observa en la figura 9, que conforme se incrementan los valores de pendiente del terreno, disminuyen los valores de  $IS_{10}$  y de IMA en volumen total.



a) b)  
 Figura 9 Valores de crecimiento (a) y productividad (b) (índice de sitio a una edad base de 10 años e IMA en volumen total) en relación con la pendiente del terreno en porcentaje, de PPM en plantaciones de *Tectona grandis* en Guatemala.

En sitios con pendientes mayores al 40 % no se observaron sitios con  $IS_{10}$  con valores superiores a 19 m, de la misma manera que no se encontraron sitios con productividad superior a los 13 m<sup>3</sup>/ha/año (figura 9). Se encontró que la mayoría de PPM en sitios con productividad alta y excelente se ubican en terrenos con pendientes por debajo de 20%, a excepción de dos PPM ubicadas en un sitio en Chahal, Alta Verapaz, que a pesar de presentar pendientes moderadas tienen buena profundidad de suelo, no presentan compactación en el terreno y tienen buena fertilidad general del suelo. Este resultado es importante por que muestra que la pendiente hasta 40 % no es limitante para el crecimiento de la especie, siempre y cuando presente características de suelo adecuadas para teca.

Paisaje del sitio: Esta variable pretendió evaluar el paisaje general del sitio donde se ubica la plantación, tomada como una variable categórica. Se encontraron diferencias significativas tanto en el crecimiento como en la productividad con respecto del paisaje del terreno con un  $p < 0.001$ , encontrando los mejores sitios en el paisaje denominado como Terraza aluvial, que son las que se encuentran como terrazas en las riveras de ríos, los demás paisajes presentaron igualdad estadística en crecimiento y productividad, como se puede observar en la figura 10. En el anexo 4A se observan los resultados del análisis de varianza para esta variable.

En el paisaje con excelente crecimiento y productividad, se encuentran 3 PPM en un sitio ubicado en Río Dulce, Livingstone, Guatemala, donde se tienen en promedio 29.78 m de  $IS_{10}$  y  $33.33 \text{ m}^3/\text{ha}/\text{año}$  de IMA en volumen total.

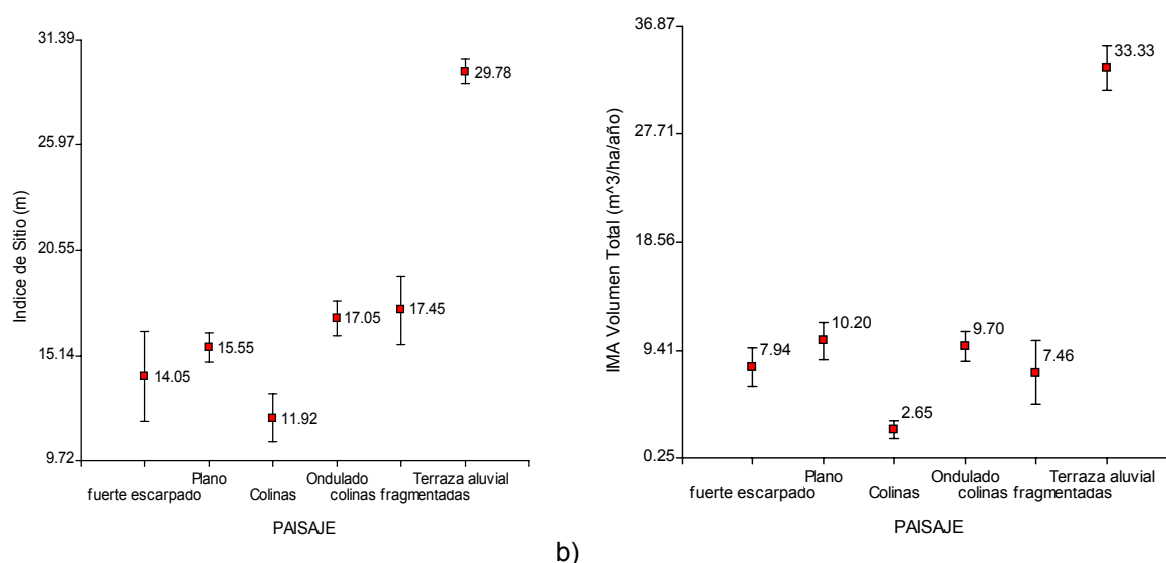
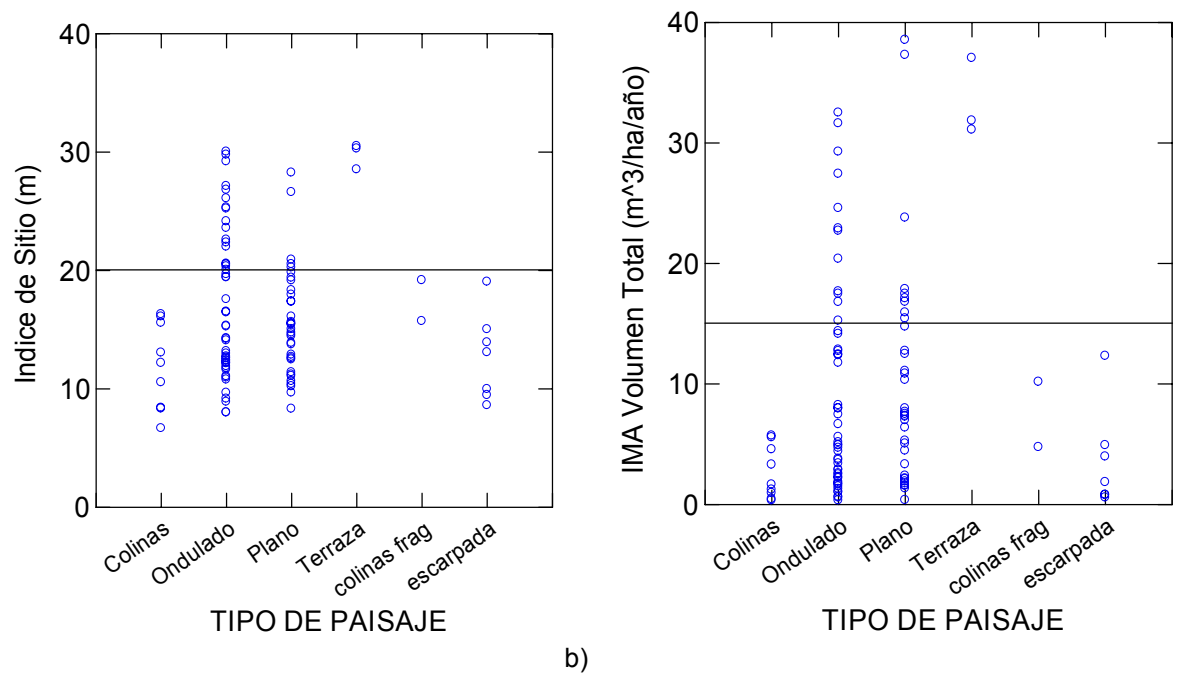


Figura 10. Valores promedios de crecimiento (a) y productividad (b) por paisaje encontrado en plantaciones de *Tectona grandis* en Guatemala.

En paisajes de Colinas, Colinas fragmentadas y Fuertemente escarpadas no se encontraron sitios con altos crecimientos y altas productividades (figura 11). Esto es de esperarse principalmente en sitios que presentan problemas con erosión, provocando un desgastado de los horizontes superficiales con mayores contenidos de materia orgánica en el suelo y se

encuentran expuestos los horizontes inferiores, los cuales presentan valores mayores de pH, variable que afecta el crecimiento de teca<sup>8</sup>.



a) b) Figura 11. Valores de crecimiento (a) y productividad (b) por tipo de paisaje encontrado en plantaciones de *Tectona grandis* en Guatemala.

Los sitios con menor valor de  $IS_{10}$  se encuentran en el paisaje de colinas, que coincide con la variable pendiente, donde estos paisajes presentan un mayor porcentaje de pendiente sobre el terreno, donde los valores de  $IS_{10}$  no son mayores a 18 m y los valores de IMA en volumen total no son superiores a 7 m<sup>3</sup>/ha/año. Estas PPM corresponden a sitios ubicados en los municipios de Cahabón y Panzós en Alta Verapaz, Gualán en Zacapa y San Francisco en Petén. Los sitios ubicados en paisajes fuertemente escarpados, con media de  $IS_{10}$  igual a 14.05 m y de IMA en volumen total igual a 7.94 m<sup>3</sup>/ha/año, se encuentran ubicados en el municipio de El Estor en Izabal.

**Topografía:** Esta variable se refiere a la topografía del terreno y se encontraron diferencias significativas únicamente en cuanto a la productividad de teca con un  $p = 0.0049$ , determinando que los sitios con mas alta productividad se encuentran en topografías planas, como se muestra en el análisis de varianza en el anexo 5A. En el análisis gráfico de esta variable se observa que terrenos con topografía plana y pendiente inferior muestran los mejores crecimientos y valores

<sup>8</sup> Alfredo Alvarado, 2004, comunicación personal.

de productividad, a pesar de que existe una gran variabilidad dentro de las PPM en esta clase de topografía (figura 12).

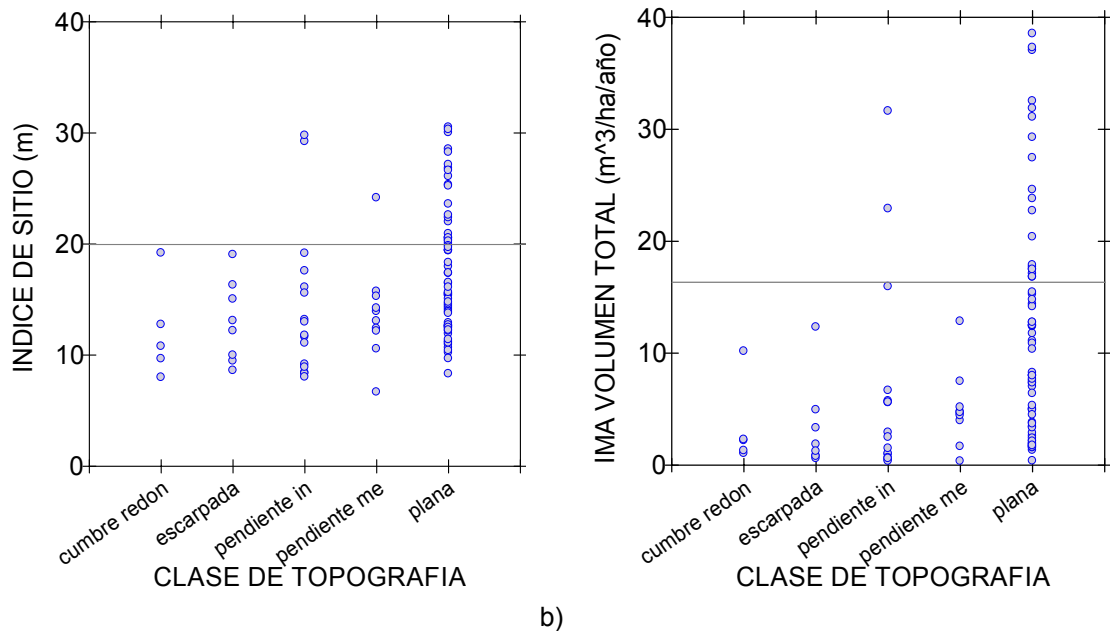


Figura 12 a) b) Valores de crecimiento (a) y productividad (b) por tipo de topografía del terreno, encontrada en plantaciones de *Tectona grandis* en Guatemala.

Las PPM ubicadas en topografía de cumbre redondeada y en topografía escarpada presentan los menores valores de crecimiento y productividad, con valores inferiores a 20 m de  $IS_{10}$  y 16  $m^3/ha/año$  de IMA en volumen total. Estos sitios se encuentran ubicados en Cahabón en Alta Verapaz y El Estor en Izabal.

Pedregosidad superficial: Para esta variable se encontraron diferencias significativas para crecimiento a un  $p = 0.045$ , encontrándose los mejores sitios en lugares con poca (< a 30 %) y mediana (30 a 60 %) pedregosidad. Los más bajos crecimientos se encontraron diferenciados en el tercer nivel de esta variable que corresponde a alto porcentaje de pedregosidad (> 60 %). Los análisis de varianza se muestran en el anexo 5A. Esto se debe a que en el suelo no se encuentra suficiente espacio para el crecimiento radicular de las plantas, lo cual repercute directamente en la absorción de agua y nutrientes del suelo.

Inundación: Esta variable pretendió establecer el comportamiento del crecimiento y la productividad de teca con respecto a periodos de inundación en el terreno. No fue posible encontrar diferencias entre los periodos de inundación probados, debido a que se encontró 101

sitios que nunca se inundan, 3 que se inundan una vez al año y solamente 1 sitio que se inunda de 1 a 3 veces por año. Lo importante de tomar esta variable es que se visitaron lugares donde se inundan más de 3 veces por año y se había plantado teca, y al momento de la evaluación ya no se encontraba dicha especie debido a que no sobrevivió en estas condiciones. Además el único sitio que se encontró que se inunda de 1 a 3 veces por año presenta valores bajos de crecimiento y productividad, siendo estos 8.32 m de  $IS_{10}$  y 0.32  $m^3/ha/año$  de IMA en volumen total. Este último sitio se encuentra localizado en Fray Bartolomé de las Casas en Alta Verapaz.

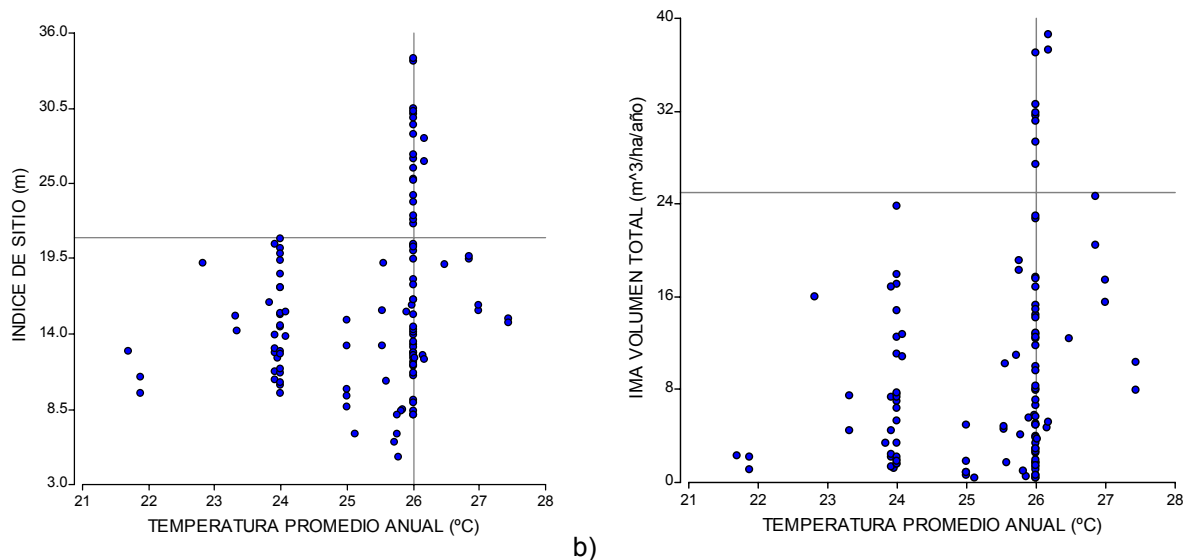
Es importante mencionar que la variable inundación y drenaje del terreno están muy relacionadas, debido que pueden existir sitios que se inundan pero que tengan buen drenaje que no causa limitaciones al crecimiento de teca. Por el contrario sitios que son propensos a inundación y además tienen problemas de drenaje si presentan limitaciones en el crecimiento de teca.

Otras variables: erosión, aspecto o exposición de la parcela, viento, posición de la parcela y el drenaje superficial no presentaron alguna característica en común o tendencia que permita inferir que son determinantes para el crecimiento y la productividad de plantaciones de teca en Guatemala.

#### **4.2.2 Variables climáticas**

Temperatura: esta variable está expresada en el promedio anual de temperatura en grados centígrados y a pesar de que no se encontró una alta correlación con el  $IS_{10}$  ( $r = 0.23$ ;  $p = 0.01$ ), se puede observar que los valores de  $IS_{10}$  aumentan a medida que se incrementa la temperatura, al igual que con la productividad expresada por el IMA en volumen total ( $r = 0.26$ ;  $p = 0.01$ ). Esta variable tiene mucha relación con respecto a la elevación sobre el nivel del mar, debido a que la temperatura disminuya a medida que aumente la elevación.

En la figura 13 se observa que los mejores crecimientos, con  $IS_{10}$  mayores a 21 m y las mejores productividades, mayores a 25  $m^3/ha/año$ , se encontraron en sitios con temperaturas cercanas a los 26° C. Los sitios con los mayores valores de productividad, se encuentran ubicados en Río Dulce, Livingstone en Izabal, Chahal en Alta Verapaz y Masagua en Escuintla; y presentan temperaturas medias anuales cercanas a 26 ° C.

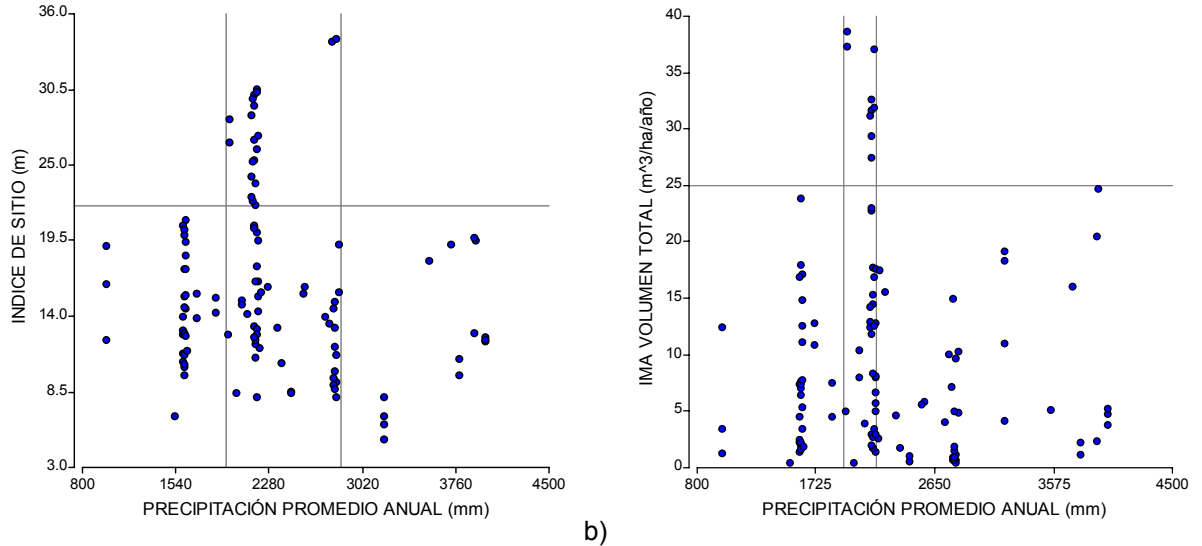


a) b)  
 Figura 13. Valores promedios de crecimiento (a) y productividad (b) en relación a la temperatura media anual, en plantaciones evaluadas de *Tectona grandis* en Guatemala.

Esta variable contribuye en parte a la productividad de teca, debido a que cercano a los 26° C, también se presentan crecimientos bajos.

**Precipitación:** Esta variable está expresada por el promedio anual de precipitación en milímetros. Esta variable no presentó una correlación estadísticamente significativa con respecto del crecimiento y la productividad, pero en el análisis gráfico (figura 14a), se puede apreciar que los mejores valores de  $IS_{10}$ , se presentaron en un rango de precipitación promedio anual entre 1940 y 2850 mm, por debajo y arriba de ese rango no se encontraron sitios con valores superiores a 22 m de  $IS_{10}$ .

Los sitios de mejor productividad se encontraron con valores promedios anuales de precipitación entre 1,940 y 2,200 mm (figura 14b). Dentro de este rango se encontraron todos los sitios con excelente productividad. No obstante, en este rango de precipitación también se presentan PPM con productividad baja, lo que indica que esta variable por si sola no determina el crecimiento de teca, sino contribuye con otras en la productividad.



a) b)  
 Figura 14. Valores promedios de crecimiento (a) y productividad (b) en relación a la precipitación media anual, en plantaciones evaluadas de *Tectona grandis* en Guatemala.

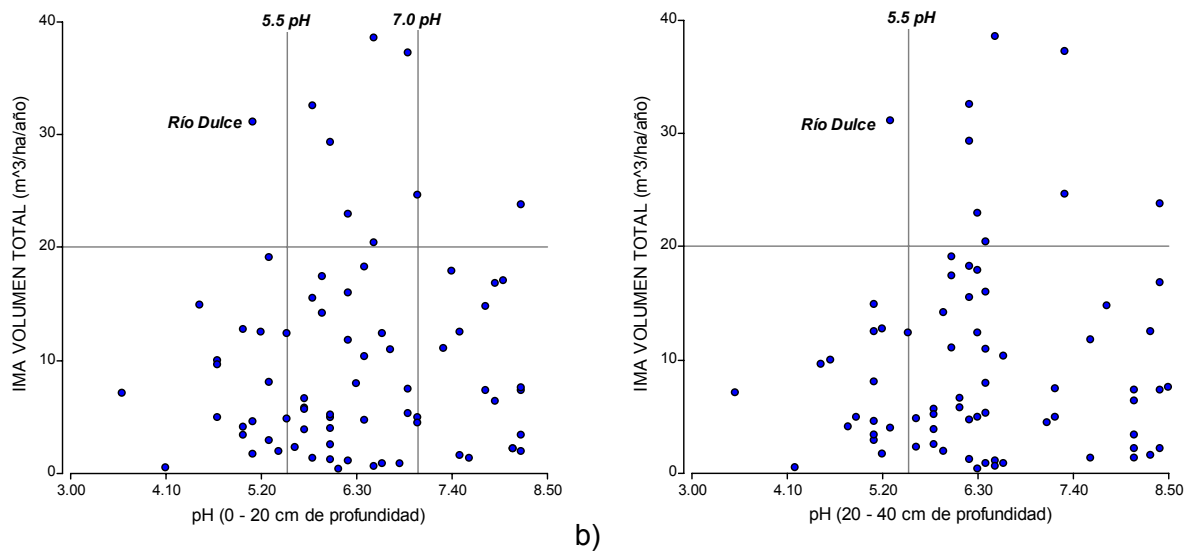
Los sitios, con un rango de precipitación entre 1940 y 2200 mm anuales, y que presentan los mejores crecimientos se ubican en Río Dulce, Livingstone en Izabal, Chahal en Alta Verapaz y Masagua en Escuintla.

#### 4.2.3 Variables de suelo

Reacción del suelo (pH): Se encontraron valores de pH entre 3.6 y 8.20, o sea fuertemente ácidos y moderadamente alcalinos (Velasco, 1991). En general, esta variable de suelo disminuye con respecto de la profundidad de suelo, encontrando valores de pH menores en la segunda profundidad evaluada.

Los mejores sitios de teca se encontraron por arriba de un valor de pH de 5.5, a excepción de una PPM ubicada en Río Dulce, Livingstone, Izabal. Para las dos profundidades evaluadas, como se muestra en la figura 15, se alcanzaron valores de IMA en volumen total por arriba de 20 m<sup>3</sup>/ha/año, en sitios por arriba de 5.5 de pH. La PPM que es la excepción presenta una productividad excelente, debido a que los valores de porcentaje de saturación de calcio (63.9 %) son altos. Este resultado es importante por que permite inferir que en suelos con pH menor a 5.5, se pueden obtener crecimientos excelentes de teca con tratamientos para aumentar el pH.





a) b)  
 Figura 15. Valores promedios de productividad a primera (a) y segunda (b) profundidad en relación al pH del suelo, en plantaciones de *Tectona grandis* en Guatemala.

Sitios con IMA en volumen superior a 25 m<sup>3</sup>/ha/año, se encontraron en un rango de pH entre 5.5 y 7, en PPM ubicadas en Chahal en Alta Verapaz, Masagua en Escuintla y Patulul en Suchitepéquez. En este rango de pH también se encontraron PPM con crecimientos bajos, lo que indica que esta es una variable que contribuye al crecimiento de teca, pero que no se puede utilizar como único parámetro para la elección del sitio.

Los sitios que presentan crecimientos menores y que presentan suelos con valores de pH menor a 5.5, se encuentran localizados en los municipios de Panzós, Fray Bartolomé de las Casas y Chahal en Alta Verapaz, y en Livingstone en Izabal. Estos sitios, con pH menor a 5.5, se consideran como sitios en los cuales la disponibilidad de elementos esenciales no es adecuada para el crecimiento óptimo de las plantas (Bertsch, 1995).

Mollinedo (2003) encontró en Panamá, que por debajo de 5.5 de pH, a primera profundidad (0 – 20 cm) se pueden obtener valores de IMA en volumen total hasta de 14 m<sup>3</sup>/ha/año. En este estudio se encontraron crecimientos hasta de 14 m<sup>3</sup>/ha/año, por debajo de 5.1 de pH, en Livingstone, Izabal.

Acidez del suelo: Esta se midió a través de dos variables, acidez intercambiable y porcentaje de saturación de acidez, la cual se obtuvo para sitios que presentaron valores de pH por debajo de 5.5.

En acidez intercambiable se observó que esta aumenta en la segunda profundidad para todos los casos, comportándose en forma similar que en la primera profundidad, donde tienden a disminuir los valores de  $IS_{10}$  cuando esta variable aumenta. En la figura 16 se observa esta tendencia, aunque los valores obtenidos en la correlación no fueron altos, se puede analizar de manera gráfica el comportamiento de las dos variables. No se encontraron valores por arriba de 15.5 m de  $IS_{10}$  en sitios que presentan más de 2.90 mili equivalentes / 100 mg de acidez intercambiable, en la primera profundidad evaluada (0 a 20 cm).

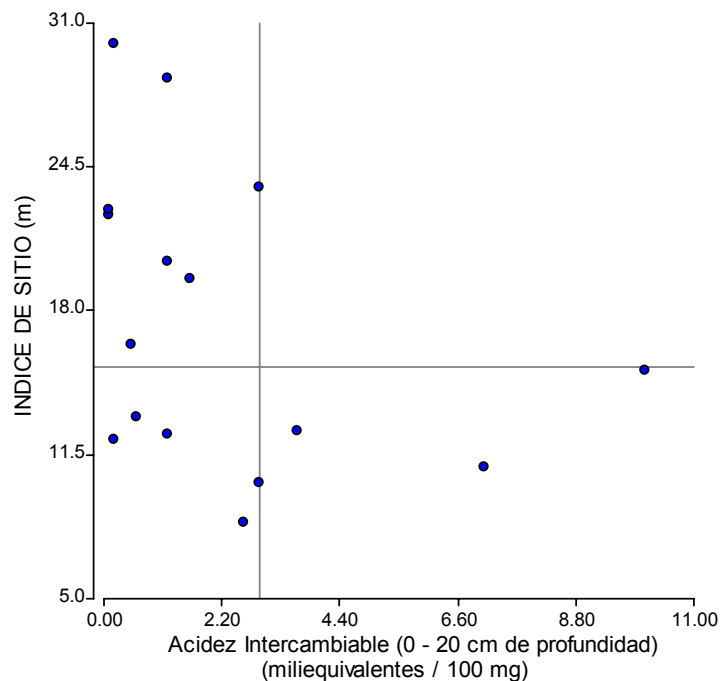


Figura 16. Valores promedios de  $IS_{10}$  para la primera profundidad de suelos en relación con valores de acidez intercambiable, en plantaciones de *Tectona grandis* en Guatemala, en sitios con pH menor a 5.5.

La acidez intercambiable también presenta la misma tendencia con respecto de la productividad, para las dos profundidades. No se encontraron valores mayores a  $13 \text{ m}^3/\text{ha}/\text{año}$ , de IMA en volumen total, en sitios con mayor de 1.30 mili equivalentes/100 mg de acidez intercambiable para la primera profundidad y con más de 1.80 mili equivalentes/100 mg de acidez intercambiable para la segunda profundidad de suelo evaluada. En la figura 17 se observan los valores de productividad de las PPM en relación con la acidez intercambiable.

Los sitios, en suelos con pH menor a 5.5, que presentan los menores valores de IMA en volumen total, con productividad baja, se ubican en Panzós y Chahal en Alta Verapaz y en Dolores en Petén.

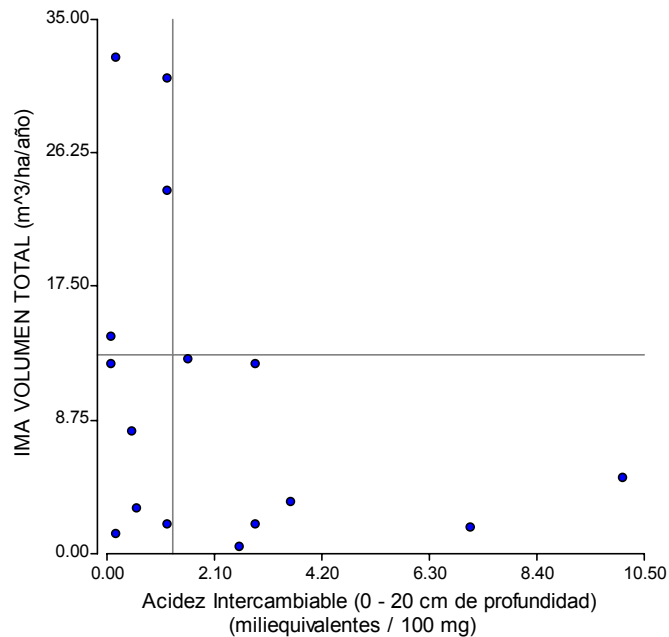


Figura 17. Valores promedio de productividad a primera profundidad en relación a valores de acidez intercambiable, en plantaciones de *Tectona grandis* en Guatemala, en sitios con pH menor a 5.5.

Los valores de productividad de teca tendieron a disminuir a medida que se incrementa el porcentaje de saturación de acidez en el suelo (Figura 18). En la primera profundidad de suelo, no se encontraron sitios con productividad alta y excelente, cuando el porcentaje de saturación de acidez excede de 19 %, como se observa en la figura 18; a excepción de una PPM ubicada en Río Dulce, Livingstone, Izabal.

En esta primera profundidad cuando analizamos valores superiores a 5 % de Saturación de acidez, no se encontraron valores de IMA en volumen total por arriba de 15 m<sup>3</sup>/ha/año. Este porcentaje de Saturación de acidez puede ser considerado como el valor a partir del cual se encuentra limitado el crecimiento de Teca. Esta variable puede modificarse por medio del encalado del suelo, como lo menciona Alvarado y Fallas (2004), por lo que es una variable posible de manejar siempre y cuando no se tengan valores extremos de acidez.

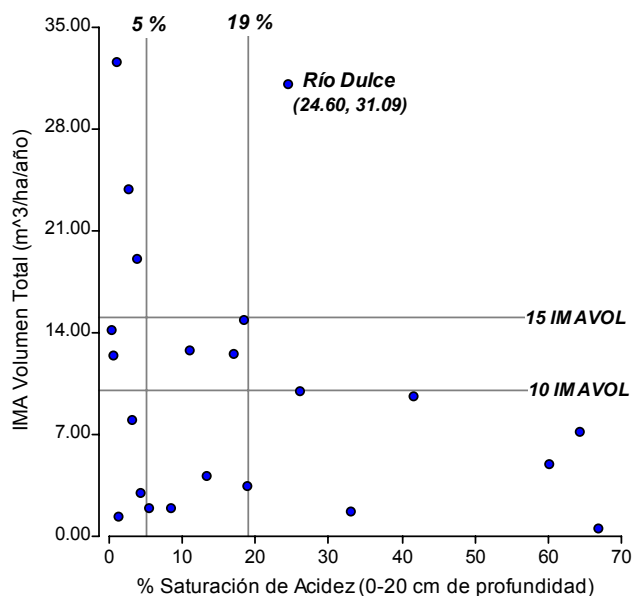
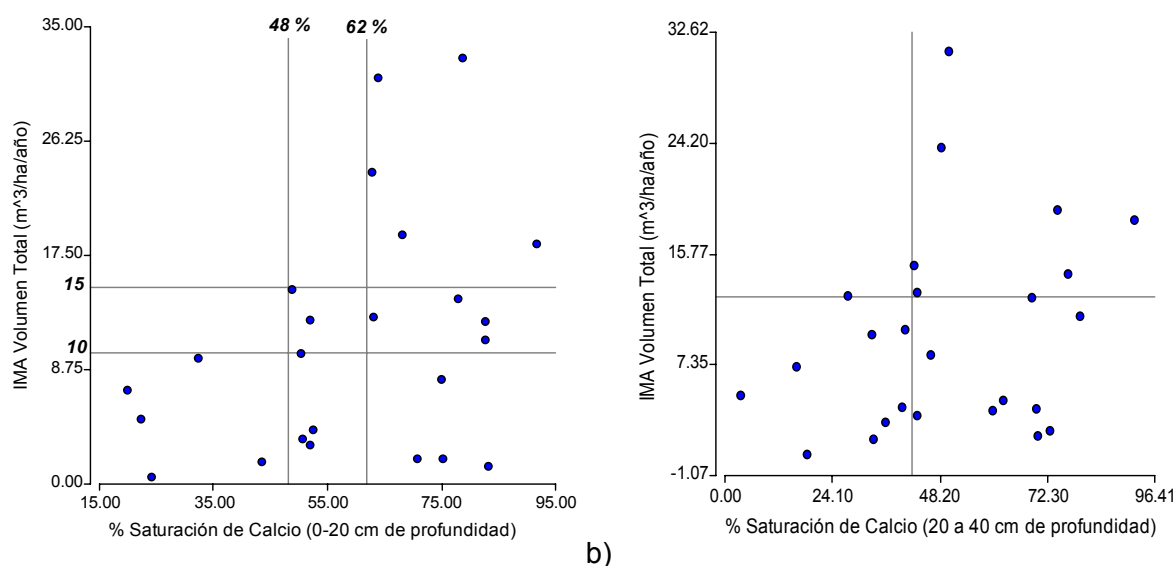


Figura 18. Valores promedio de productividad a primera profundidad con relación al porcentaje de saturación de acidez, en plantaciones de *Tectona grandis* en Guatemala, en sitios con pH menor a 5.5.

Bases intercambiables del suelo: Se tomaron en cuenta seis variables, el contenidos de Ca, porcentaje de saturación de Ca, contenidos de Mg, Na y K, la relación Ca/Mg. De estas variables los contenidos de Ca, Mg, Na, K y la relación Ca/Mg no presentaron relaciones estadísticamente significativas, ni algún comportamiento que permitiera explicar el crecimiento y la productividad de teca.

A pesar de que no se encontraron valores altos de correlación, la variable porcentaje de saturación de calcio presentó una relación positiva con respecto a la productividad de los sitios, para las dos profundidades, incrementando los valores de IMA en volumen total a medida que se incrementa esta variable (figura 19). Los valores de porcentaje de saturación de calcio disminuyeron conforme aumenta la profundidad del suelo, de manera inversa al porcentaje de saturación de acidez.

En la primera profundidad se observó que en sitios que presentan porcentaje de saturación de calcio menor del 48%, no se lograron productividades altas y excelentes, como se observa en la figura 19a. No se obtuvieron en este estudio valores de IMA en volumen total mayor a 15 m<sup>3</sup>/ha/año en sitios con porcentaje de saturación de calcio menor a 62 %.



a) b)  
 Figura 19. Valores promedio de productividad a primera (a) y segunda (b) profundidad en relación al porcentaje de saturación de calcio, en plantaciones de *Tectona grandis* en Guatemala, en sitios con pH menor a 5.5.

Los sitios que presentan mayor porcentaje de saturación de calcio se encuentran ubicados en Livingstone en Izabal, Chahal en Alta Verapaz y Dolores en Petén. Al igual que con variables anteriores también con valores por arriba de 62 % de saturación de calcio se encuentran PPM con valores de crecimiento bajo.

La segunda profundidad presentó sitios por debajo del 42 % de saturación de calcio, donde no se alcanzaron valores de IMA en volumen total por encima de los 12.5 m<sup>3</sup>/ha/año (figura 19b).

Analizando los resultados obtenidos para Costa Rica por Alvarado y Fallas (2004) y los obtenidos para Panamá por Mollinedo (2003), presentados en el Cuadro 15, para suelos con pH menores a 5.5, se observa la similitud de los valores de porcentaje de saturación de acidez y porcentaje de saturación de calcio, con los valores obtenidos con el presente estudio.

En el cuadro 15 se puede ver que los valores, encontrados en tres estudios para Centroamérica, de % de saturación de acidez, por los cuales el crecimiento de Teca se vio afectado, es un límite superior a 5 % en Guatemala, 5.8 % en Costa Rica y 8 % en Panamá.

Cuadro 15 Valores de saturación de acidez y calcio, en porcentaje, límites para el crecimiento adecuado de teca, en suelos con pH menor a 5.5, para Centro América.

<b>Variable</b>	<b>Este Estudio (Guatemala)</b>	<b>Panamá*</b>	<b>Costa Rica**</b>
<b>Saturación de Acidez (%)</b>	5.0	8.0	5.8
<b>Saturación de Calcio (%)</b>	62.0	40.0	67.5

\* Mollinedo, 2003,

\*\* Alvarado y Fallas, 2004.

Con respecto al porcentaje de saturación de calcio, se ha encontrado que el límite inferior que presenta teca para crecer de manera adecuada es de 62 % en Guatemala, 67.5 % en Costa Rica y 40 % en Panamá.

En el presente estudio, al poner un límite de productividad, expresado en IMA en volumen total, superior a 10 m<sup>3</sup>/ha/año, los valores de porcentaje de saturación de acidez y calcio varían. Se encontró que en suelos con Saturación de acidez de 19 % y Saturación de Calcio de 48 %, se pueden obtener crecimientos hasta este límite de productividad.

Fósforo (P), cobre (Cu), manganeso (Mn), zinc (Zn) Y hierro (Fe): Estas variables no presentaron ningún comportamiento de sus valores con respecto a los valores de crecimiento y productividad, en plantaciones de teca en Guatemala, para las dos profundidades de suelo probadas.

Otras variables del análisis: Materia orgánica, CIC, CICE y textura no presentaron valores que pudieran dar puntos claves para determinar diferencias entre el crecimiento y la productividad para el estudio en sitios plantados con teca en Guatemala.

Los resultados del porcentaje de saturación de bases mostraron, para las dos profundidades, que en sitios con valores menores al 43 %, se encuentran plantaciones con productividad baja. Esta característica de la dispersión de valores de productividad y porcentaje de saturación de bases se muestra en la figura 20.

Las PPM que presentan valores inferiores a 43 % de saturación de bases, se encuentran ubicadas en 2 sitios en Panzós y 1 sitio en Chahal en Alta Verapaz.

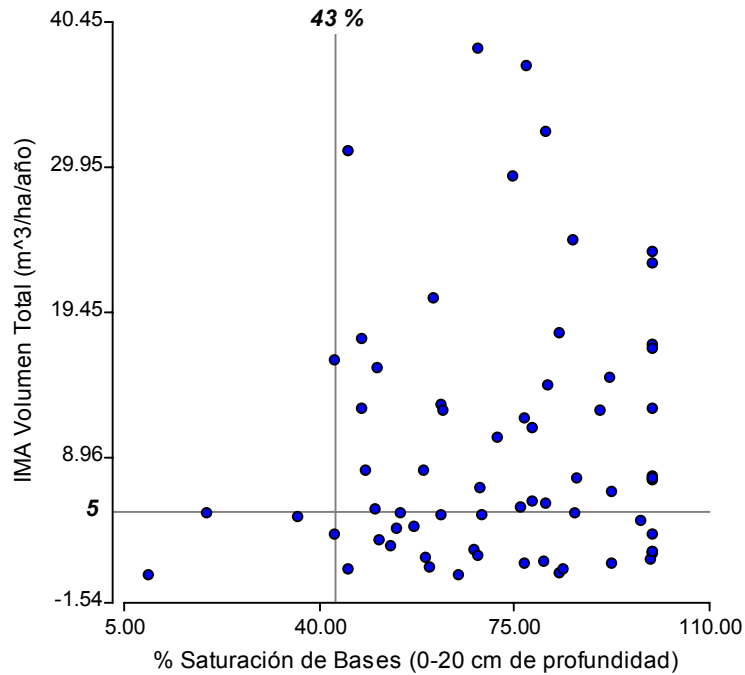


Figura 20. Valores promedio de productividad a primera profundidad con respecto al porcentaje de saturación de bases del suelo, en plantaciones de *Tectona grandis* en Guatemala.

Variables medidas directamente en el campo: La compactación del terreno presentó diferencias en cuanto a crecimiento y productividad en teca, evaluando tres niveles de compactación. El  $IS_{10}$ , presentó diferencias con un  $p = 0.0066$  con respecto a la compactación, encontrando los sitios mas altos con valores de 17.30 m en baja compactación, 13.37 m en media compactación y 12.09 m en alta compactación (anexo 6A). La productividad con un  $p = 0.0071$ , presentó diferencias con respecto a la compactación, encontrando sitios con productividad baja en terrenos con alta y media compactación (3.03 y 4.91  $m^3/ha/año$  respectivamente) y sitios con productividad media y alta en terrenos con baja o ninguna compactación (11.86  $m^3/ha/año$  en promedio). Esto se debe a que en suelos compactos se limita el crecimiento radicular de las plantas y por consiguiente disminuye la posibilidad de absorción de agua y nutrientes.

El grosor del horizonte orgánico, grosor del horizonte sáprico, la profundidad efectiva, drenaje interno y la pedregosidad interna no presentaron diferencias en cuanto a crecimiento y productividad en esta evaluación para plantaciones de teca.

#### **4.2.4 Relaciones entre variables silviculturales**

Variables de manejo de las plantaciones: Se tomaron en cuenta variables de manejo de la plantación, las cuales no presentaron diferencias en cuanto a crecimiento y productividad de teca. Se evaluaron el uso actual del terreno, podas, limpieas, deshijes, raleos y fertilización.

En general, se observó la falta de prácticas silviculturales en las plantaciones, las cuales tienen un efecto sobre la calidad de las mismas, vistas no solo desde el punto de vista productivo, sino de formación general de la cosecha futura. En general solamente en dos sitios se observó fertilización en plantaciones, pero sin un estudio previo de evaluación de una dosis ideal según el estado actual del suelo. El deshije y las podas de formación de estas plantaciones se hace necesario para contribuir a los buenos crecimientos encontrados, principalmente en aquellos sitios de alta y excelente productividad como prioridad uno, debido a que hay presencia de ramas basales demasiado gruesas en los fustes de los árboles, lo que disminuye la calidad de la plantación en relación al producto esperado de estas.

En el 100 % de las plantaciones se reportaron al menos dos limpieas en los primeros dos años del establecimiento de la Teca, aunque en algunos sitios es necesario efectuar una mayor cantidad de limpieas al año debido al rápido crecimiento de malezas dentro de los sitios plantados. En los sitios con mejor crecimiento, luego del segundo año, se presenta una cobertura de copas alta, lo cual disminuye el crecimiento de plantas en la parte inferior del dosel general de las plantaciones; en estos casos no se requieren ya de una alta cantidad de limpieas al año. En sitios con bajo crecimiento se hace necesario continuar con las limpieas, debido a que las plantas no deseables tienen competencia con el crecimiento de Teca.

Cuando se evaluaron los raleos, una muy poca cantidad de proyectos contaban con este tipo de operaciones silvícolas, siendo necesario efectuarlos en los sitios con altos crecimientos, mayores a 3 años, donde se pudo observar una alta competencia con respecto a las copas de las plantas. Aunque es conocido que una recesión en la expansión lateral de copas produce una reducción del crecimiento en diámetro, no se pudo observar diferencias en esta variable,



debido a la edad actual de las plantaciones y a la diversidad de los sitios evaluados. Se pudo observar que por la falta de raleos, en las plantaciones de mayor crecimiento, se empieza a presentar una recesión de copas en plantaciones mayores a 4 años, lo cual no ha mostrado diferencias en cuanto a crecimientos en Teca, pero si se observa un deterioro en cuanto a la calidad de la forma de los ejes de manera general.

Relaciones entre variables dasométricas: Las relaciones entre las variables de crecimiento y productividad fueron bastante altas, de acuerdo a los parámetros estadísticos analizados, como se muestra en la figura 21a, la relación  $IS_{10}$  e IMA en DAP, donde  $IS_{10} = 3.3282 + 5.7463*(IMA \text{ en DAP})$ , con un  $r^2 = 0.62$  ( $p < 0.0001$ ). La relación de  $IS_{10}$  con IMA en altura total es  $IS_{10} = 3.9342 + 6.3536*(IMA \text{ altura total})$ , con un  $r^2 = 0.72$  ( $p < 0.0001$ ), como se observa en la figura 21b. Para la elección de estos modelos se efectuó un análisis de residuos con el fin de eliminar aquellos puntos extraños dentro de la dispersión general de datos, por lo que no se incluyeron valores promedios de 6 PPM de dos sitios en Livingstone, Izabal.

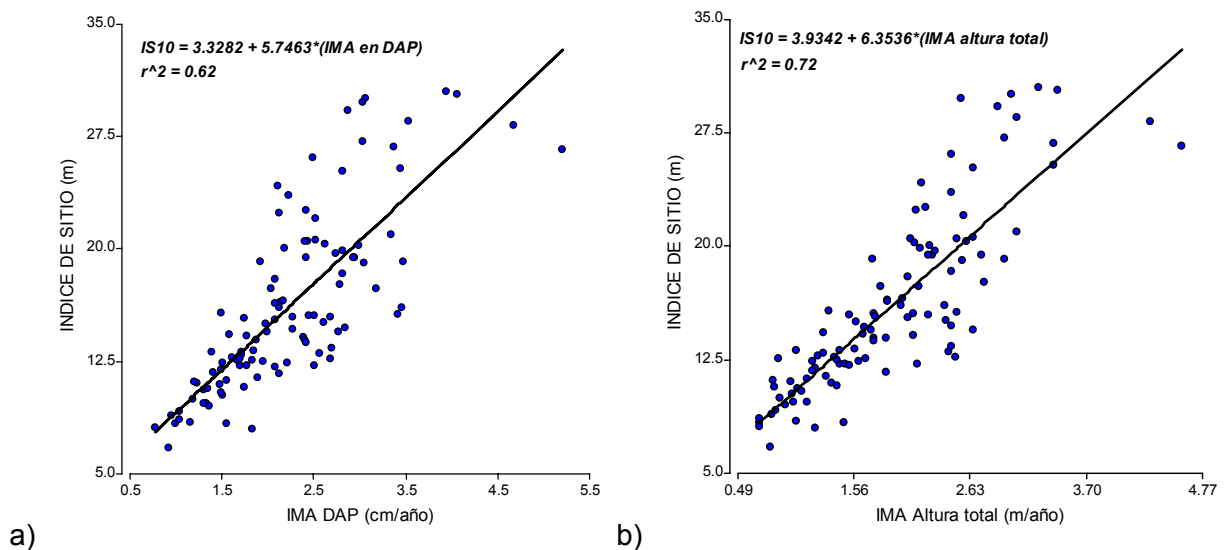
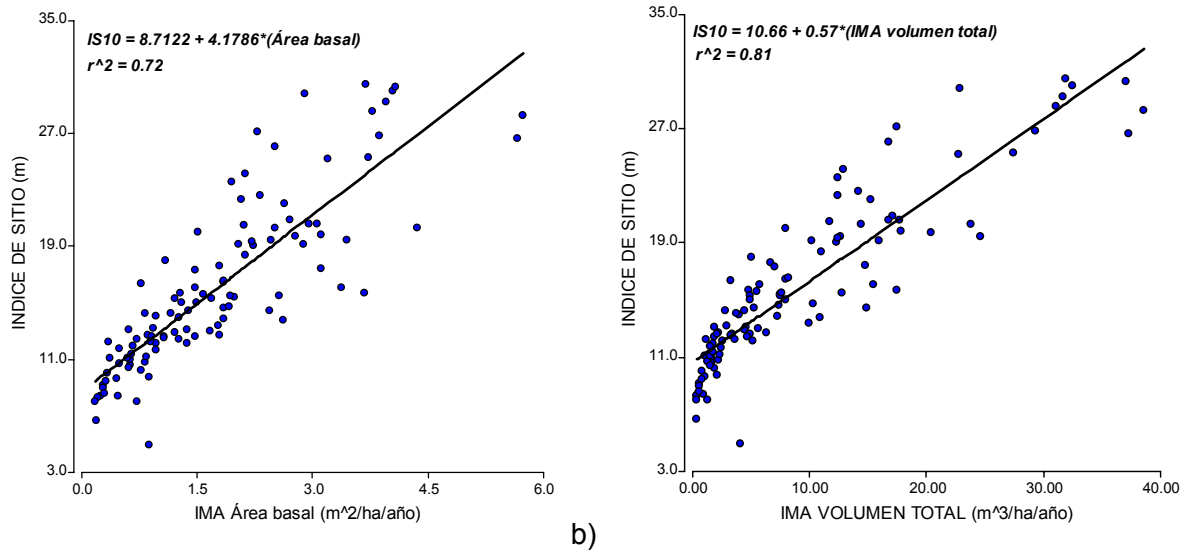


Figura 21. Relación  $IS_{10}$  e IMA en DAP (a) y altura total (b), en plantaciones de *Tectona grandis* evaluadas en Guatemala.

La relación entre  $IS_{10}$  con el IMA en Área Basal (figura 22a), con un valor  $r^2 = 0.72$  ( $p < 0.0001$ ) es  $IS_{10} = 8.7122 + 4.1786*(Área Basal)$ . El  $IS_{10}$  con el IMA en volumen total es  $IS_{10} = 10.66 + 0.57*(IMA \text{ volumen total})$ , con un  $r^2 = 0.81$  ( $p < 0.0001$ ), como se observa en la figura 22b. Para la elección de estos modelos se efectuó un análisis de residuos con el fin de eliminar

aquellos puntos extraños dentro de la dispersión general de datos, por lo que no se incluyeron valores promedios de 5 PPM de dos sitios en Livingstone, Izabal.



a) b)  
 Figura 22. Relación  $IS_{10}$  e IMA en área basal (a) y volumen total (b) en plantaciones de *Tectona grandis* evaluadas en Guatemala.

Las relaciones encontradas entre las diferentes variables de crecimiento se efectuaron principalmente relacionando el IMA en volumen total con los IMA en DAP, altura total y Área basal.

En la figura 23 se muestra la relación IMA en volumen total con el IMA en DAP, encontrando una ecuación donde  $IMAVOL = -12.1273 + 9.4493*(IMA \text{ en DAP})$ , con un  $r^2 = 0.78$  ( $p < 0.0001$ ). Para la elección de estos modelos se efectuó un análisis de residuos con el fin de eliminar aquellos puntos extraños dentro de la dispersión general de datos, por lo que no se incluyeron valores promedios de 3 PPM de dos sitios en Livingstone, Izabal.

La relación IMA volumen total e IMA en altura total, se muestra en la figura 24, obteniendo la ecuación  $IMAVOL = -0.6567 + 2.3104*(IMA \text{ altura total})^2$ , con un  $r^2 = 0.76$  ( $p < 0.0001$ ). Para la generación de esta ecuación no fue posible la extracción de datos extraños, debido a que pertenecían a diferentes sitios.

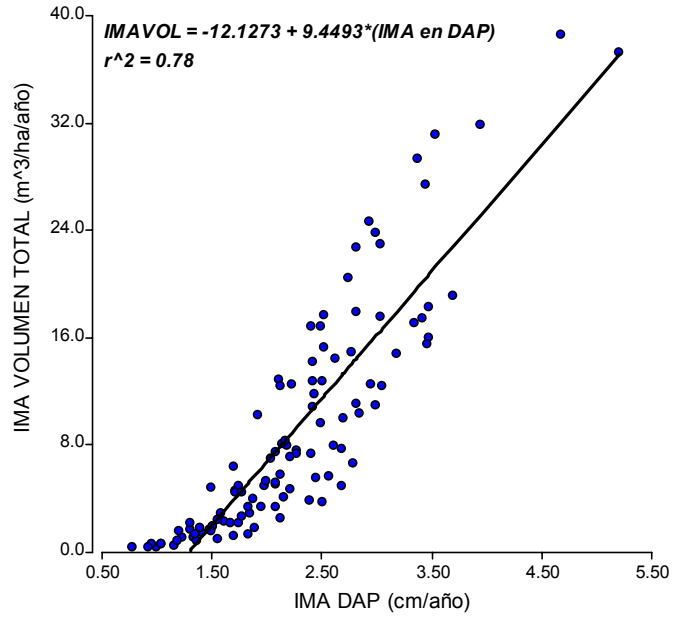


Figura 23. Relación IMA en volumen total e IMA en DAP en plantaciones de *Tectona grandis* evaluadas en Guatemala.

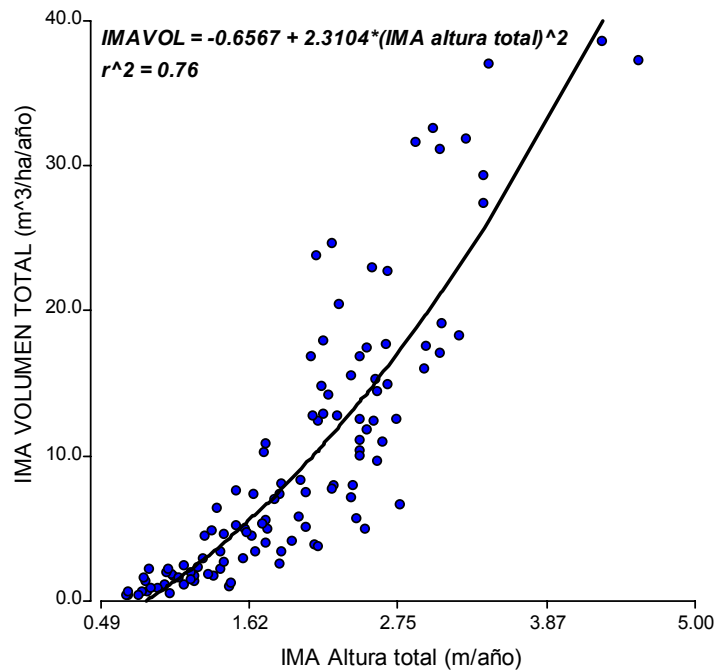


Figura 24. Relación IMA en volumen total e IMA en altura total en plantaciones de *Tectona grandis* evaluadas en Guatemala.

La mejor relación obtenida en estas variables es la de IMA en volumen total con el IMA en área basal, representada por la ecuación  $IMAVOL = -3.6754 + 7.5373 \cdot (IMA \text{ área basal})$ , con un  $r^2 =$

0.92 y un  $p < a 0.0001$ , la cual se muestra en la figura 25. Esto se da por que son dos variables de productividad, que incluyen la superficie del terreno como parámetro de similitud.

La relación IMA en área basal e IMA en volumen total es una variable importante, debida que a partir de una variable que se puede obtener de manera fácil en el campo (IMAAB), es posible inferir otra más compleja (IMAVOL). Es importante mencionar que este modelo explica el 92 % de los valores de IMA en volumen total a partir de valores de IMA en área basal en plantaciones forestales jóvenes de Teca en Guatemala.

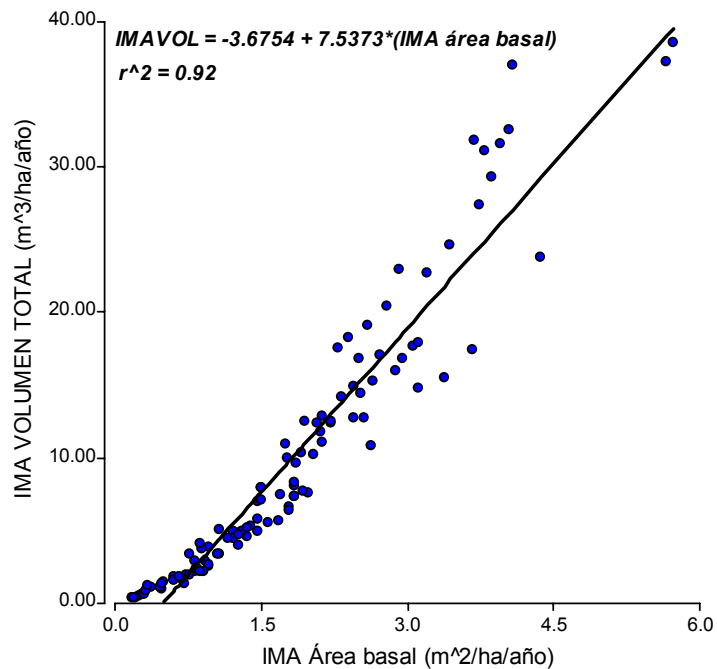


Figura 25. Relación IMA en volumen total e IMA en área basal, en plantaciones de *Tectona grandis* evaluadas en Guatemala.

#### 4.3 MODELOS DE PREDICCIÓN DE CRECIMIENTO Y PRODUCTIVIDAD

Para este paso se generó una matriz general de variables, donde se incluyeron en las primeras dos columnas las variables respuesta, que correspondieron a el Índice de Sitio y el IMA en volumen total promedio por PPM, estimados por el programa MIRA-SILV. En las columnas siguientes se listaron el total de variables fisiográficas, climáticas y de suelo(a las dos profundidades). En las filas de la matriz se colocaron cada uno de los casos o unidades experimentales evaluadas, que corresponden a las PPM.

De esta manera con ayuda del programa estadístico SAS, con el procedimiento regresión por pasos, se obtuvieron las variables que mas explican las variables dependientes, que para este caso es el  $IS_{10}$  y el IMAVOL.

#### **4.3.1 Índice de sitio**

Modelo general: En el primer análisis, con un total de 66 casos evaluados (unidades experimentales o PPM) se obtuvo que el mejor modelo que explica la variable  $IS_{10}$ , utiliza un total de 23 variables independientes, de las cuales 1 es fisiográficas, 3 son climáticas y 19 son de suelo. Con estas variables el modelo explica un 88 % de los valores de  $I.S._{10}$  ( $r^2 = 0.8790$  y  $p = 0.0849$ ). Los valores del análisis con el procedimiento regresión por pasos se observan en el anexo 7A. Cuando se probó el modelo por separado, obtenido hasta el paso 12, donde con 10 variables se explica un 55 % de los valores de  $I.S._{10}$ , fue necesario eliminar 2 casos con valores extremos (outliers), quedando el modelo con un  $n = 64$ , con valores de  $r^2$  ajustado = **0.4871** y un “ $p$ ” para el modelo en general  $< 0.0001$ . Los resultados del análisis de regresión se muestran en el anexo 8A.

Modelo con pH menores a 5.5: Cuando se tomaron en cuenta los sitios con pH menores a 5.5, un total de 11 casos evaluados (unidades experimentales o PPM) se obtuvo que el mejor modelo que explica la variable  $IS_{10}$ , utiliza un total de 11 variables independientes. Con estas variables el modelo explica casi el 100 % de los valores de  $I.S._{10}$  ( $r^2 = 0.99999$  y  $p = 0.0051$ ). Los valores del análisis con el procedimiento regresión por pasos se observan en el anexo 9A. Se probó el modelo por separado, obtenido hasta el paso 3, donde con 3 variables se explica mas del 80 % de los valores de  $I.S._{10}$ , quedando el modelo con valores de  $r^2$  ajustado = **0.7861** y un “ $p$ ” para el modelo en general = **0.0028**. Los resultados del análisis de regresión se muestran en el anexo 9A.

Modelos con pH mayores a 5.5: Al tomar en cuenta los sitios con pH superior a 5.5, con un total de 55 casos evaluados, se obtuvo que el mejor modelo que explica la variable  $IS_{10}$ , utiliza un total de 11 variables independientes. Con estas variables el modelo explica el 68 % de los valores de  $I.S._{10}$  ( $r^2 = 0.6806$  y  $p = 0.1032$ ). Los valores del análisis con el procedimiento regresión por pasos se observan en el anexo 10A. Se probó el modelo por separado, obtenido hasta el paso 6, donde con 6 variables se explica mas del 53.51 % de los valores de  $I.S._{10}$ ,

quedando el modelo con valores de  $r^2$  **ajustado** = **0.4770** y un “**p**” para el modelo en general < **0.0001**. Los resultados del análisis de regresión se muestran en el anexo 10A.

De manera general en esta evaluación no se encontraron modelos adecuados para explicar el índice de sitio, apoyados siempre con el procedimiento estadístico regresión por pasos en SAS, debido a que las variables que se eligieron para los modelos incluyen variables poco prácticas de tomar y variables que individualmente no presentan una relación estadísticamente significativa con respecto al índice de sitio.

#### **4.3.2 Productividad**

De igual forma que para los modelos de predicción de Índice de Sitio, los modelos de productividad, basados en el IMA en volumen total como variable respuesta, se analizaron primero los casos con valores completos (n = 66) y luego los casos para pH menor a 5.5.

Modelo general: Con un total de 66 casos evaluados se obtuvo que el mejor modelo, que explica la variable IMAVOL, utiliza un total de 14 variables independientes, de las cuales 1 es fisiográficas, 2 son climáticas y 11 son de suelo. Con estas variables el modelo explica un 74 % de los valores de **IMAVOL** ( $r^2 = 0.7429$  y  $p = 0.1056$ ). Los valores del análisis con el procedimiento regresión por pasos se observan en el anexo 11A. Se probó el modelo por separado, obtenido hasta el paso 7, donde con 7 variables se explica un 51 % de los valores de Productividad (IMAVOL), con valores de  $r^2$  **ajustado** = **0.4520** y un “**p**” para el modelo en general < **0.0001**. Los resultados del análisis de regresión se muestran en el anexo 12A.

Modelo con valores de pH menor a 5.5: Al tomar en cuenta los sitios con pH menor a 5.5, un total de 11 (unidades experimentales o PPM) se obtuvo que el mejor, para predicción de la productividad, utiliza un total de 11 variables independientes. Con estas variables el modelo explica casi el 100 % de los valores de **IMAVOL** ( $r^2 = 0.99999$  y  $p = 0.0319$ ). Los valores del análisis con el procedimiento regresión por pasos se observan en el anexo 13A. Se probó el modelo por separado, obtenido hasta el paso 3, donde con 3 variables se explica más del 85 % de los valores de **IMAVOL**, quedando el modelo con valores de  $r^2$  **ajustado** = **0.8548** y un valor de “**p**” para el modelo en general = **0.0007**. Los resultados del análisis de regresión se muestran en el anexo 13A.

Modelo con valores de pH mayor a 5.5: Al evaluar los sitios con pH mayor a 5.5, un total de 55, se obtuvo que el mejor, para predicción de la productividad, utiliza un total de 9 variables independientes. Con estas variables el modelo explica el 69.76 % de los valores de **IMAVOL** ( $r^2 = 0.6935$  y  $p = 0.1414$ ). Los valores del análisis con el procedimiento regresión por pasos se observan en el anexo 14A. También se probó el modelo por separado, obtenido hasta el paso 5, donde con 5 variables se explica mas del 55 % de los valores de **IMAVOL**, quedando el modelo con valores de  **$r^2$  ajustado = 0.5049** y un valor de “**p**” para el modelo en general < **0.0001**. Los resultados del análisis de regresión se muestran en el anexo 14A.

En esta evaluación no se encontraron modelos adecuados para explicar la productividad de teca, apoyados siempre con el procedimiento estadístico regresión por pasos en SAS, los cuales presentaron variables poco prácticas en la evaluación de sitios, además de no presentar relaciones directas con esta variable de manera individual.

## 5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

### 5.1 CRECIMIENTO Y PRODUCTIVIDAD:

- 1 El análisis de crecimiento y productividad efectuado en teca, permitió evaluar el estado actual de las plantaciones. Se evaluaron cuatro clases de sitio y cuatro clases de productividad, siendo la productividad, expresada en IMA en volumen total, la variable que expresa valores prácticos para interpretar en el crecimiento de teca.

Se encontró que el 38 % del total de los sitios evaluados se encuentran en terrenos con productividad baja, presentando valores promedio de IMA en DAP de 1.60 cm/año, IMA en altura total de 1.30 m/año, IMA en área basal de 0.75 m<sup>2</sup>/ha/año y productividad promedio en IMA en volumen total de 2.33 m<sup>3</sup>/ha/año. Esto nos muestra que estas plantaciones no se encuentran establecidas en sitios ideales para el crecimiento de teca.

El 35 % del total de los sitios se encontraron en terrenos de productividad alta y excelente, con valores promedio de productividad de 14.36 y 29.36 m<sup>3</sup>/ha/año de IMA en volumen total, respectivamente. El restante 26 % de los sitios se encuentran en terrenos con productividad media, con IMA en volumen promedio de 7.07 m<sup>3</sup>/ha/año.

- 2 Existen diferencias entre clasificar la calidad de las plantaciones por altura y por IMA en volumen total, sin embargo las dos formas de clasificar éstas, brindan herramientas para identificar bajos, medios, altos y excelentes crecimientos, por lo que en plantaciones jóvenes el uso de la altura total es una variable práctica que proporciona resultados aceptables para la clasificación o estratificación del crecimiento de las plantaciones en los primeros años de edad, cuando no existen altas diferencias en las densidades (árboles/ha).
- 3 Esta evaluación es importante por que permite mostrar lo indispensable que es la elección de los sitios con el fin de tener éxito en los proyectos de reforestación. Las plantaciones establecidas en sitios de productividad baja perfilan como proyectos que van a fracasar, debido a que presentan crecimientos y rendimientos muy por debajo de los esperados por los productores forestales, teniendo como resultado una pérdida de recursos, para el estado en el caso de proyectos de incentivos forestales y para el propietario en el caso de proyectos de reforestación privados.



Se recomienda seleccionar y plantar teca en sitios con alta a excelente productividad con el fin de tener altos valores de crecimiento en las plantaciones. También se menciona que en sitios con productividad media se pueden mejorar los valores de crecimiento, donde sea posible implementar tratamientos, principalmente de mejora de características físico-químicas de suelo.

- 4 Los sitios encontrados con productividad excelente son 5, ubicados 1 en Dolores, Petén; 1 en Chahal, Alta Verapaz; 1 en Río Dulce, Livingstone, Izabal, 1 en Patulul, Suchitepéquez y 1 en Masagua, Escuintla. Las fincas, en general, no presentaron una única clase de productividad, compartiendo, en la mayoría de los casos, sitios excelentes, altos y medios. Debido a este comportamiento se recomienda que no se debe de generalizar un sitio para la plantación de teca, teniendo que elegir aún dentro de cada finca los mejores terrenos para plantar esta especie.

## **5.2 VARIABLES DE SITIO QUE TIENEN RELACION CON EL CRECIMIENTO Y LA PRODUCTIVIDAD DE TECA:**

- 5 De acuerdo a los resultados analizados en las variables fisiográficas, se debería de elegir, de preferencia, sitios para plantar teca en terrenos que se encuentren a una elevación menor a 220 msnm, con una pendiente en el terreno que no exceda el 40 %, en sitios donde el paisajes va de terrenos ondulados a planos, con poca o mediana pedregosidad externa y que no presentan problemas de inundación en periodos largos de tiempo.

En estos sitios se esperaría que el productor obtenga productividades de altas a excelentes, pero no se deben tomar en cuenta únicamente estas variables para la elección de los sitios, sino también variables de suelo, que contribuyen en el crecimiento y la productividad. Esto debido a que en el estudio se encontraron PPM en estas condiciones que presentaron sitios con productividad baja y media.

- 6 La inundación del terreno es una variable que puede ser modificada, debido a que se pueden efectuar estructuras que permitan drenar el terreno y mejorar el crecimiento de teca, a partir de mejorar la aireación del suelo. Es importante citar que existen suelos que son propensos a inundación, como las terrazas aluviales, que presentaron los más altos crecimientos, pero con la ventaja de que estos suelos son bien drenados, o el agua

permanece en periodos muy cortos en el terreno, como los encontrados en Río Dulce, Livingstone, Izabal.

No se recomienda plantar teca en terrenos que presentan problemas de inundación por periodos largos de tiempo, y que además presentan problemas de drenaje, debido a que en estos sitios se disminuye en gran medida el crecimiento de teca por la limitante de crecimiento de raíces de la planta, que de igual forma limita la absorción de agua y nutrientes del suelo.

- 7 En terrenos con pendientes superiores a 40%, que pudieran utilizarse para plantar teca, con algunas prácticas de conservación de suelo, no se recomiendan, debido a que en la mayoría de estos sitios con el tiempo van quedando expuestos los horizontes ácidos inferiores, que son no aptos para el crecimiento de la especie.
- 8 Los sitios con mejor productividad se encontraron en terrenos que presentaron temperatura media anual cercana a los 26 grados centígrados y rangos de precipitación entre 1900 y 2850 mm anuales. No obstante estas variables por si solas no determinan a los sitios con mejores productividades, debido a que en estos lugares también se encontraron sitios con productividades bajas y medias, pero es de tomarlas en cuenta en conjunto con las otras variables.
- 9 Las variables de suelo permiten complementar los criterios para la elección de los sitios a plantar, encontrando como principal factor de elección la reacción del suelo, encontrando sitios con productividad alta y excelente en pH por arriba de 5.5. Por consiguiente se comprueba que la teca es una especie basófila que se debe plantar en suelos con porcentaje de saturación de bases por arriba a 43 %. Se deben de elegir suelos que presenten poca o ningún tipo de compactación, debido a que esta variable limita el crecimiento radicular de la especie, disminuyendo la posibilidad de absorción de nutrientes y agua del suelo.
- 10 La acidez del suelo es una variable que puede ser modificada y permitir mejores crecimientos de teca en estos sitios, esto se pudo observar en suelos con pH menor a 5.5, donde con valores por debajo de 2.90 meq/100 mg de acidez intercambiable y por debajo de 5 % de saturación de acidez se obtienen mejores crecimientos.

En estos suelos, con pH menor a 5.5, se obtienen buenos crecimientos cuando se presentan valores por encima de 62 % de saturación de calcio, lo que indica que este es un elemento necesario para el crecimiento de teca.

Los valores de acidez se pueden reducir con adiciones de cal, debido a que este elemento es necesario para mejorar el crecimiento de teca, por el contrario no se mejoran los sitios para crecimiento de la especie si se bloquea la acidez y no se aumenta el contenido de calcio.

- 11 Se efectuó el análisis por medio de ploteo de tendencias o dispersión de datos, debido que en la mayoría de las variables no fue posible encontrar diferencias o valores estadísticamente significativos, que permitieran efectuar una inferencia del crecimiento y la productividad de teca. Este análisis permite la separación de cuadrantes dentro del gráfico de dispersión, donde no se encuentran valores, permitiendo de esta manera definir valores o niveles críticos para el crecimiento y productividad.
- 12 Los tratamientos silviculturales no se están efectuando en las plantaciones de una manera adecuada, siendo necesario en todos los sitios efectuar podas de formación y deshijos para contribuir a la calidad de la madera futura, proveniente de estas plantaciones. Es necesario efectuar los raleos en las plantaciones, principalmente en aquellas que presentan los más altos valores de  $IS_{10}$  y productividad, para evitar una disminución en su crecimiento. En el presente estudio no se encontraron diferencias en crecimiento y productividad causadas por la aplicación o no de estas actividades, debido posiblemente a la edad de las plantaciones evaluadas y a la diversidad de sitios evaluados.

Se encontró en los sitios de alto y excelente crecimiento una disminución en la necesidad de efectuar limpiezas después de los 4 años de edad, debido a que la cobertura de copas es alta y las malezas disminuyen su crecimiento por la poca entrada de luz al dosel inferior de las plantaciones. A pesar de que disminuyen los costos por limpiezas en estos sitios, se hace necesario implementar raleos que permitan mantener el mismo ritmo de crecimiento y no permitir una competencia intraespecífica en las plantaciones.

- 13 Otra de las características para la elección del sitio que se observó en el transcurso de la investigación, es el acceso a las plantaciones, debido a que de nada sirve tener productividades altas y excelentes en lugares con muy difícil acceso, que podrían ser compensadas con sitios con productividad media con buenos accesos.

Esta característica es de mucha importancia, debido que se encontraron bastantes plantaciones en lugares que tienen difícil acceso y esto implica dificultades en la ejecución de actividades silviculturales intermedias, además de que incrementará los costos para el productor en el futuro para la corta final del producto.

- 14 Es importante para la elección del sitio priorizar las variables necesarias para la implementación de plantaciones, debido a que hay unas que nunca se podrán modificarse. Las variables que se deben de priorizar como punto de partida serian la elevación, temperatura, precipitación y el tipo de paisaje. Luego se pretende listar las variables que pudieran modificarse, aunque incrementa los costos de la producción forestal, estas son el drenaje y la compactación del terreno, que con labores de suelo se puede mejorar el crecimiento de la planta. La acidez en el suelo es una de las variables que es relativamente fácil de neutralizar, cuando no se presentan valores extremos. La fertilidad de los suelos en la actualidad, es una variable posible de manejar, y en la actualidad muchos silvicultores ya implementan programas de fertilización no solo para mejorar las condiciones del suelo sino con el objeto de reducir los turnos de corta de las plantaciones forestales.
- 15 Se encontraron relaciones importantes entre las variables de crecimiento, pudiendo inferir y calificar a una plantación existente a partir de variables que son fáciles de medir, como lo es a partir del DAP, altura total o área basal inferir valores de  $IS_{10}$  o de IMA en volumen total. Es importante que un silvicultor o un programa de incentivos forestales cuente con las herramientas que permitan calificar a las plantaciones y conocer que productividades esta teniendo y poder decidir sobre estos proyectos.
- 16 Es bueno para los productores y técnicos forestales conocer diferentes sitios con diferente productividad, de manera que al ver las condiciones en que esta creciendo teca se forme la idea y vaya mejorando el criterio a la hora de decidir por la elección de sitios a plantar o a implementar en proyectos de incentivos forestales.
- 17 Sería interesante aplicar esta metodología para determinar, al igual que este estudio, las características que determinan el crecimiento y productividad de otras especies, en especial cuando se tienen definidas especies prioritarias para programas de incentivos forestales, con el fin de garantizar los logros de estos.

18 Es importante tomar en cuenta todas las variables disponibles a evaluar en un sitio elegido para plantar cualquier especie, debido a que de esto depende el éxito de los proyectos de reforestación. Esto garantiza la adecuada inversión del silvicultor y del estado en proyectos de reforestación privados y de incentivos forestales en Guatemala, debido a la gran diversidad de clases de sitio y productividades encontradas en el presente estudio

### **5.3 MODELOS DE PREDICCIÓN DE ÍNDICE DE SITIO Y PRODUCTIVIDAD DE TECA:**

19 Debido a la gran variabilidad de sitios evaluados y a los amplios rangos de las variables encontradas no fue posible generar modelos adecuados, desde el punto de vista técnico, que permitan predecir con buena precisión el crecimiento y la productividad de teca para Guatemala.

Se recomienda aumentar el número de PPM a la base total generada, con la finalidad de obtener mayor cantidad de unidades experimentales, que permita encontrar más valores en variables de suelo principalmente, para la generación de estos modelos, así como la evaluación de plantaciones de otras localidades y de mayor edad.

## 6 LITERATURA CITADA

- Alfaro, M. 1983. Relación entre factores edáficos e índice de sitio para *Cupressus lusitanica* (Mill) en el valle central, Costa Rica. Tesis Licenciatura. Universidad Nacional. Heredia, CR. 132 p.
- Alvarado, A. y Fallas, J.L. 2004. La saturación de acidez y el encalado sobre el crecimiento de la teca (*Tectona grandis* L.f.) en suelos ácidos de Costa Rica. San José, CR. Agronomía Costarricense. 28(1): 81-87p.
- Ávila Folgar, R. I. 2003. Evaluación del estado y crecimiento inicial de cuatro especies prioritarias (*Pinus maximinoi* H.E. Moore, *Pinus caribaea*, *Pinus oocarpa* Schiede y *Tectona grandis* L.f.), del Programa de Incentivos Forestales en la región 2, en los departamentos de Alta y Baja Verapaz, Guatemala. Tesis M. Sc. Turrialba, CR. CATIE. 154 p.
- Bacilieri, R.; Alloysius, D. y Lapongan, J. 1998. Growth Performance of Teak. In Proceeding of the Seminar on High Value Timber Species for plantation Establishment-Teak and Mahoganies, 1-2 December 1998. Tawau, Sabah. 27-34 p. (JIRCAS Working Report no. 16)
- Barros, F. de N. 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.
- Bebarta, K.C. 1999. Teak: Ecology, Silviculture, Management and profitability. International Book Distributors. India. 379 p.
- 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. 2000. Timber quality of teak from manager tropical plantations with special referente to Indian plantations. Bois et Forêts des Tropiques. 263(1):6-15.
- Briscoe, C.B. 1995. Silvicultura y manejo de teca, melina y pochote. CATIE / MADELEÑA. Serie técnica. Informe técnico No. 270. Turrialba, C.R. 43 p.
- Castañeda Salguero, C.; Alvarado, S. y Zamora, R. 2003. Informe final: Caracterización técnica de las plantaciones establecidas con el programa de incentivos forestales en Guatemala. INAB, Guatemala, GT. 73 p.
- Chávez, E. y Fonseca, W. 1991. Teca: *Tectona grandis* L.f., especie de árbol de uso múltiple en América Central. Proyecto Madeleña CATIE-ROCAP. Serie técnica, Informe técnico 179. 47 p.

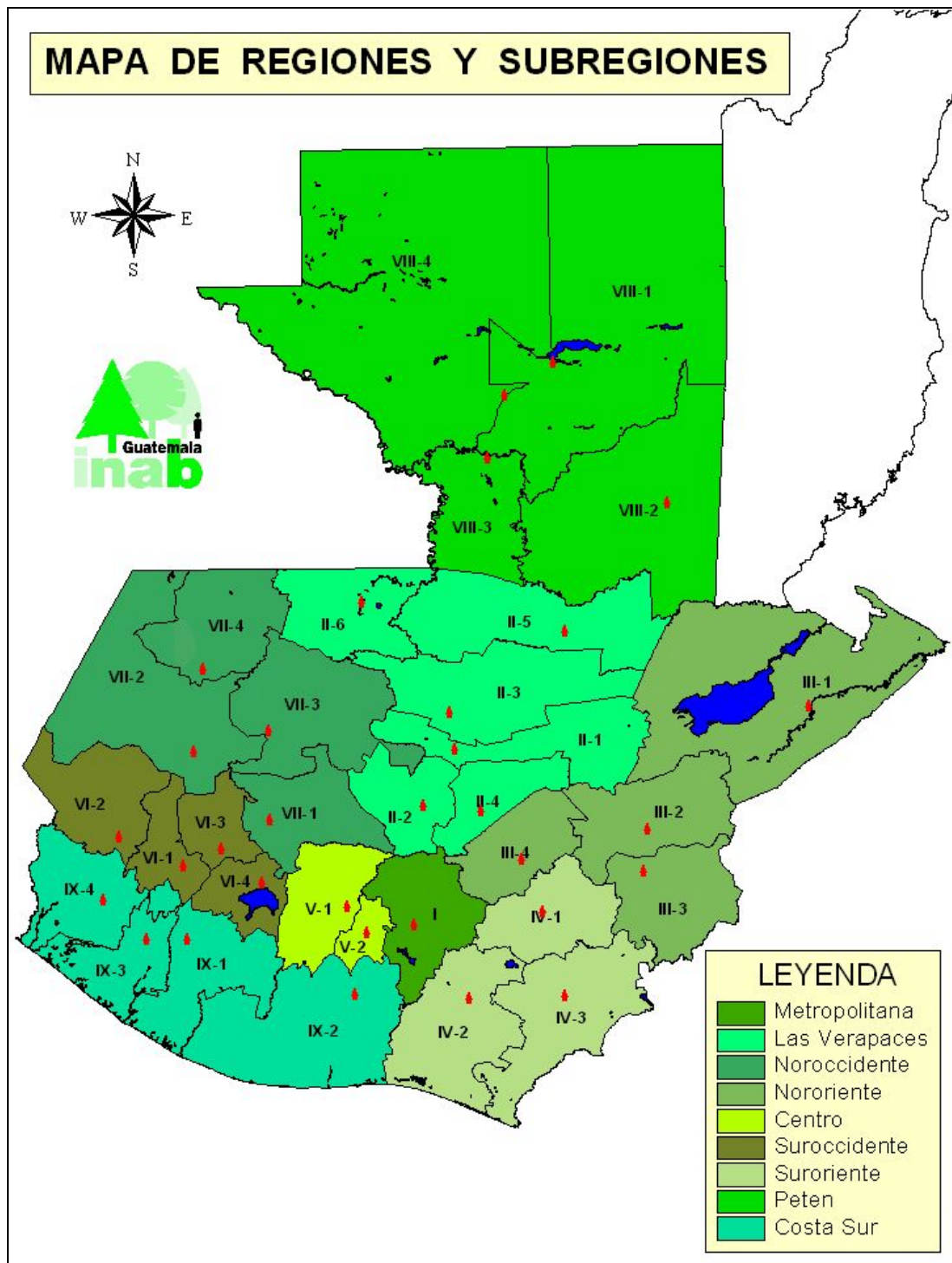
- De Camino, R.V.; Alfaro, M.M. y Sage, L.F. 2002. Teak (*Tectona grandis*) in Central America. Ed. Forest Plantation Working Papers, Working Paper 19. Forest Resources Development Service, Forest Resources Division. FAO, Rome (unpublished)
- Enters, T. 2000. Terrenos, tecnología y productividad de las plantaciones de teca en Asia sudoriental. Roma, IT. FAO, Unasyuva 51(201): 55-61 p.
- FAO (Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación). 1977. Elaboración de una tabla de volumen y un estudio de incremento para Teca (*Tectona grandis*) en El Salvador. Documento de trabajo No. 14 FO:DP ELS/73/004. 53 p.
- . 2002. evaluación de los recursos forestales mundiales 2002. Roma, IT, FAO. 468 p. (Informe principal. Estudio FAO Montes, no. 140).
- Francis, J.K. 1995. Forest plantations in Puerto Rico. *In* Tropical Forests: Management and Ecology. Ecology Studies v. 112. Lugo & Lowe editors. New York, E.U. 210-223p.
- Gálvez, J.; Buch, M.; Revolorio, A. y López P., J. 2002. El programa de incentivos forestales de Guatemala como instrumento de política forestal: una revisión basada en el estudio de las principales modalidades de aplicación. *In* II Congreso Forestal Latinoamericano (2002, Guatemala). Bienes y Servicios del Bosque fuente de desarrollo sostenible. (memoria) 1 disco compacto, 8 mm.
- Galloway, G.; Alomoto, V. y Maldonado, E. 1991. Estudio de algunas especies forestales en la región costera del Ecuador (Borrador). DESFIL/AID. Sub secretaria forestal y de recursos naturales renovables. Ecuador. 160 p.
- Galloway, G; Ugalde, L. y Vasquez, W. 2001. Importance of density reductions in tropical plantations: experiences in Central America. *In* Forests, Trees and Livelihoods. Vol. 11:3 217-232 p.
- Gonzales Suarez. 2003. Productividad de Teca. Proyectos bosques tropicales de Sudamérica. Quito, EQ. Consultado el 3 de Agosto de 2003. En línea en <http://www.bosquestropicales.com/html/Espanol/productividad.html>.
- Hernández, R.; Torres, A.; Márquez, O. y Franco, W. 1993. Contenido foliar de nutrimentos y crecimiento en plantaciones de Teca en Ticoporo, Venezuela. Costa Rica. Revista Turrialba. 43(1): 11-15 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.
- Kadambi, K. 1993. Silvicultura & Management of Teak. Natraj Publishers. New Delhi. 137 p.

- Keogh, R.M. 1979. El Futuro de la Teca en la América Tropical: Estudio sobre *Tectona grandis* en el Caribe, Centro América, Venezuela y Colombia. Roma, IT. FAO, Unasylva 31(126): 13-19 p.
- 1980. Teca (*Tectona grandis*): Crecimiento del volumen y prácticas de raleo en el caribe, Centro América, Venezuela y Colombia. In Simposio IUFRO/MAB/ SERVICIO FORESTAL: Producción de madera en los neotropicos por medio de plantaciones. Río Piedras, PR. 8-12 sep. 1980. 62-75p.
- Lamprecht, H. 1990. Silvicultura en los trópicos. Traducido por Antonio Carrillo. GTZ. Eschborn. 335 p.
- Mollinedo García, 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 M. Sc. Turrialba, CR. CATIE. 89 p.
- Montero Mata, 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 en Ciencias. Universidad Austral de Chile, Facultad de Ciencias Forestales. Valdivia, Ch. 111p.
- Montero, M.; Ugalde, L. y Kanninen, M. 2001. Relación del índice de sitio con los factores que influyen en el crecimiento de *Tectona grandis* L.F. y *Bombacopsis quinata* (Jacq.) Dugand, en Costa Rica. Turrialba, Costa Rica. CATIE, Revista Forestal Centroamericana. 35: 13-28 p.
- Moya, R. 2002. Influencia del cambium, tasa de crecimiento y nivel de precipitación sobre la densidad básica de la teca en Costa Rica. Madera y Bosques. 8(1):39-49 p.
- Nair, C.T y Souvannavong, O. 2000. Nuevos temas de investigación en la ordenación de la teca. Roma, IT. FAO, Unasylva 51(201): 3-13 p.
- Padilla Mena, L.F. 1977. Análisis de germinación de teca (*Tectona grandis*), especie con grandes posibilidades de reforestación en Guatemala. Tesis Ing. Agr. Guatemala, Universidad de San Carlos de Guatemala, Facultad de Agronomía.
- PAFG (Plan de Acción Forestal para Guatemala, GM). 2002. Documentación y evaluación de cinco modalidades de aplicación del Programa de Incentivos Forestales de Guatemala. PAFG, FAO/GCP/GUA/008/NET. 61 p.
- Pérez Cordero, 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 M. Sc. Turrialba, Costa Rica. CATIE.

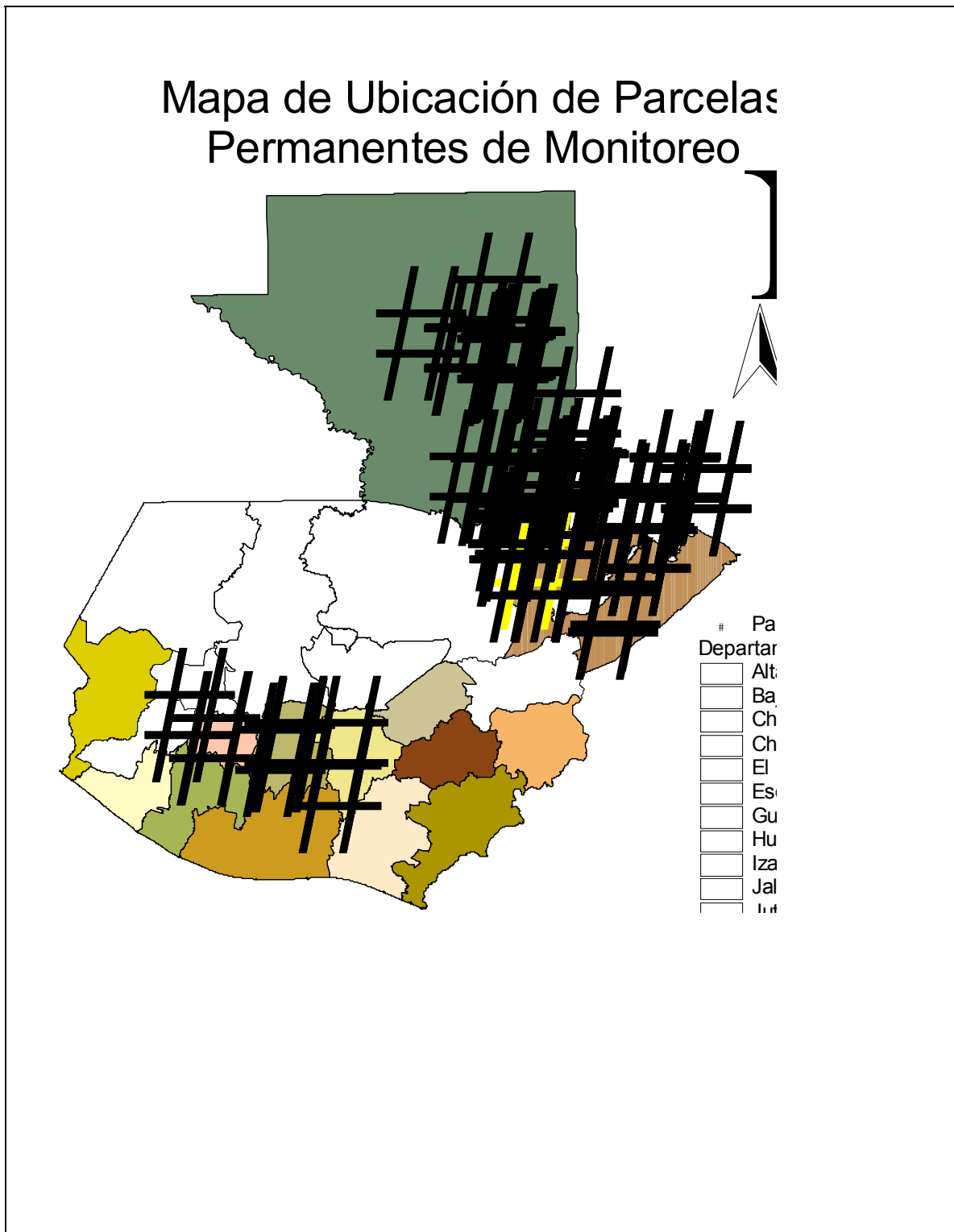


- Rao, Y.S. 1991. Keynote address. *In* Teak: Proceedings of the international teak symposium, thiruvananthapuram, Kerala, India. 2-4 December 1991. Eds. Basha, S.C.; Mohanan, C.; Sankar, S. Kerala, India. /Kerala Forest Department & Kerala Forest Research Institute./ 1-6 p.
- Ugalde, Arias, L. A. 1997. Teca (*Tectona grandis* L.F.): Resultado de investigación silvicultural del Proyecto MADELEÑA en América Central. CATIE, Turrialba, Costa Rica. 63 p.
- 2001. Guía para el establecimiento y medición de parcelas para el monitoreo y evaluación del crecimiento de árboles en investigación y en programas de reforestación con la metodología del sistema MIRA-SIL. CATIE. Turrialba, Costa Rica. 14 p.
- 2002. Monitoreo y evaluación del crecimiento de especies nativas con la utilización del sistema MIRA-SIL. *In* Taller-Seminario: Especies Forestales Nativas (4-5 abril, Costa Rica). (memoria) 77-79 p.
- 2003. 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)
- Vallejos Barra, OS. 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 Magister Scientiae. CATIE. Turrialba, CR. 147p.
- Vallejos Barra, O. y Ugalde Arias, 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, 22 al 28 de noviembre.
- Vásquez, W; Ugalde, L.A. 1994. Rendimiento y calidad de sitio para *Gmelina arborea* Roxb., *Tectona grandis* L.F., *Bombacopsis quinatum* (Jacq.) Dugand y *Pinus caribaea* en Guanacaste, Costa Rica. Informe final, Convenio de Cooperación Proyecto Forestal Chorotega (IDA/FAO). Proyecto Madeleña-3. Turrialba, CR. 132p.
- 1995. Rendimiento y calidad de sitio para *Gmelina arborea*, *Tectona grandis*, *Bombacopsis quinatum* y *Pinus caribaea* en Guanacaste, Costa Rica. Convenio de Cooperación entre el Proyecto MADELEÑA 3/Proyecto Forestal Chorotega (IDA/FAO/HOLANDA). Serie Técnica, Informe Técnico No. 256. 33p.
- Velasco Molina, H.A. 1991. Uso y manejo del suelo. Primera edición. Ed. Limusa. México. 191 p.

ANEXO 1A Mapa de regiones forestales de Guatemala, basado en la regionalización del servicio forestal –INAB-



ANEXO 2A Mapa de ubicación de las Parcelas Permanentes de Monitoreo de Teca evaluadas para Guatemala.



ANEXO 3A Análisis de varianza para clases de sitio y clases de productividad en plantaciones de *Tectona grandis* en Guatemala.

POR CLASE DE SITIO:

Variable	N	R <sup>2</sup>	R <sup>2</sup> Aj	CV
INDSITIO	113	0.86	0.86	15.08

**Cuadro de Análisis de la Varianza (SC tipo I)**

F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
Modelo	4037.64	3	1345.88	227.71	<0.0001
CS_ISITIO	4037.64	3	1345.88	227.71	<0.0001
Error	644.24	109	5.91		
Total	4681.88	112			

**Test: Tukey Alfa:=0.05 DMS:=1.93903**

Error: 5.9104 gl: 109

CS ISITIO	Medias	n	
BAJO	11.87	68	A
MEDIO	18.07	18	B
ALTO	21.25	11	C
EXCELENTE	28.50	16	D

Letras distintas indican diferencias significativas ( $p \leq 0.05$ )

PARA CLASES DE PRODUCTIVIDAD:

Variable	N	R <sup>2</sup>	R <sup>2</sup> Aj	CV
IMAVOL	113	0.92	0.92	28.00

**Cuadro de Análisis de la Varianza (SC tipo I)**

F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
Modelo	8847.58	3	2949.19	404.35	<0.0001
CS_PROD	8847.58	3	2949.19	404.35	<0.0001
Error	795.00	109	7.29		
Total	9642.58	112			

**Test: Tukey Alfa:=0.05 DMS:=1.98285**

Error: 7.2936 gl: 109

CS PROD	Medias	n	
BAJO	2.33	49	A
MEDIO	7.07	21	B
ALTO	14.36	29	C
EXCELENTE	29.36	14	D

Letras distintas indican diferencias significativas ( $p \leq 0.05$ )

ANEXO 4A Análisis de varianza para crecimiento y productividad por los distintos niveles de paisaje evaluados en plantaciones de *Tectona grandis* en Guatemala.

ANÁLISI DE VARIANZA PARA EL CRECIMIENTO (IS<sub>10</sub>)

Variable	N	R <sup>2</sup>	R <sup>2</sup> Aj	CV
INDSITIO	105	0.23	0.20	32.95

Cuadro de Análisis de la Varianza (SC tipo I)

F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
Modelo	855.19	5	171.04	6.06	0.0001
PAISAJE	855.19	5	171.04	6.06	0.0001
Error	2793.79	99	28.22		
Total	3648.98	104			

Test: Tukey Alfa:=0.05 DMS:=7.17394

Error: 28.2201 gl: 99

PAISAJE	Medias	n	
Terraza aluvial	29.78	3	A
Colinas fragmentadas	17.46	2	B
Ondulado	17.05	49	B
Plano	15.55	35	B
Fuerte escarpado	12.74	7	B
Colinas	11.92	9	B

Letras distintas indican diferencias significativas (p<= 0.05)

ANÁLISI DE VARIANZA PARA PRODUCTIVIDAD (IMA VOLUMEN TOTAL)

Variable	N	R <sup>2</sup>	R <sup>2</sup> Aj	CV
IMAVOL	105	0.25	0.22	87.25

Cuadro de Análisis de la Varianza (SC tipo I)

F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
Modelo	2396.91	5	479.38	6.77	<0.0001
PAISAJE	2396.91	5	479.38	6.77	<0.0001
Error	7013.55	99	70.84		
Total	9410.46	104			

Test: Tukey Alfa:=0.05 DMS:=11.36659

Error: 70.8440 gl: 99

PAISAJE	Medias	n	
Terraza aluvial	33.33	3	A
Plano	10.20	35	B
Ondulado	9.70	49	B
Colinas fragmentadas	7.46	2	B
Fuerte escarpado	3.61	7	B
Colinas	2.65	9	B

Letras distintas indican diferencias significativas (p<= 0.05)

ANEXO 5A Análisis de varianza productividad por la topografía del terreno, crecimiento por pedregosidad superficial, evaluada en plantaciones de *Tectona grandis* en Guatemala.

Análisis de Varianza para IMA en volumen total:

Variable	N	R <sup>2</sup>	R <sup>2</sup> Aj	CV
IMAVOL	105	0.14	0.10	93.41

**Cuadro de Análisis de la Varianza (SC tipo I)**

F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
Modelo	1289.77	4	322.44	3.97	0.0049
TOPOG	1289.77	4	322.44	3.97	0.0049
Error	8120.69	100	81.21		
Total	9410.46	104			

**Test:LSD Fisher Alfa:=0.05 DMS:=6.92268**

Error: 81.2069 gl: 100

TOPOG	Medias	n	
plana	12.10	66	A
pendiente inferior	6.56	16	B
pendiente media	4.99	10	B
cumbre redonda	3.39	5	B
escarpada	3.23	8	B

Letras distintas indican diferencias significativas ( $p \leq 0.05$ )

Análisis de Varianza par IS<sub>10</sub>:

Variable	N	R <sup>2</sup>	R <sup>2</sup> Aj	CV
INDSITIO	105	0.06	0.04	35.98

**Cuadro de Análisis de la Varianza (SC tipo I)**

F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
Modelo	215.42	2	107.71	3.20	0.0449
PEDREGSUP	215.42	2	107.71	3.20	0.0449
Error	3433.56	102	33.66		
Total	3648.98	104			

**Test:Tukey Alfa:=0.05 DMS:=5.54607**

Error: 33.6623 gl: 102

PEDREGSUP	Medias	n	
poco	16.52	96	A
medio	16.44	4	A
alto	9.79	5	B

Letras distintas indican diferencias significativas ( $p \leq 0.05$ )

ANEXO 6A Análisis de varianza para IS10 y Productividad, con distintas clases de compactación del terreno, evaluada en plantaciones de *Tectona grandis* en Guatemala.

Análisis de Varianza par IS<sub>10</sub>:

Variable	N	R <sup>2</sup>	R <sup>2</sup> Aj	CV
INDSITIO	66	0.15	0.12	31.53

**Cuadro de Análisis de la Varianza (SC tipo I)**

F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
Modelo	281.34	2	140.67	5.44	0.0066
compactación	281.34	2	140.67	5.44	0.0066
Error	1628.44	63	25.85		
Total	1909.78	65			

**Test: Tukey Alfa:=0.05 DMS:=4.35536**

Error: 25.8483 gl: 63

compactación	Medias	n		
alta	12.09	9	A	
media	13.37	9	A	B
baja	17.30	48		B

Letras distintas indican diferencias significativas (p<= 0.05)

Análisis de Varianza para IMA en volumen total:

Variable	N	R <sup>2</sup>	R <sup>2</sup> Aj	CV
IMAVOL	66	0.15	0.12	91.30

**Cuadro de Análisis de la Varianza (SC tipo I)**

F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
Modelo	830.24	2	415.12	5.35	0.0071
compactación	830.24	2	415.12	5.35	0.0071
Error	4886.68	63	77.57		
Total	5716.93	65			

**Test: Tukey Alfa:=0.05 DMS:=7.54475**

Error: 77.5664 gl: 63

compactación	Medias	n		
alta	3.03	9	A	
media	4.91	9	A	B
baja	11.86	48		B

Letras distintas indican diferencias significativas (p<= 0.05)

ANEXO 7A Sumario de la selección de variables que explican el IS<sub>10</sub> con el procedimiento STEPWISE, de SAS, evaluadas en plantaciones de *Tectona grandis* en Guatemala, para un n = 66.

The REG Procedure  
 Model: MODEL1 PARA GL TOTALES 65  
 Dependent Variable: INDSITIO INDSITIO

Summary of Stepwise Selection

Step	Variable Entered	Variable Removed	Label	Number Vars In	Partial R-Square	Model R-Square	C (p)	F Value	Pr > F
1	NA2M100G		NA2M100G	1	0.1034	0.1034	.	7.38	0.0085
2	ZN1PPMQ		ZN1PPMQ	2	0.0675	0.1709	.	5.13	0.0270
3	MN1PPMQ		MN1PPMQ	3	0.0605	0.2313	.	4.88	0.0309
4	P2PPMQ		P2PPMQ	4	0.0446	0.2760	.	3.76	0.0571
5	HorizsapriQ		HorizsapriQ	5	0.0341	0.3100	.	2.96	0.0904
6	PPPROMQ		PPPROMQ	6	0.0438	0.3538	.	4.00	0.0502
7	MG2M100G		MG2M100G	7	0.0606	0.4144	.	6.00	0.0173
8	ARENA2		ARENA2	8	0.0490	0.4634	.	5.20	0.0263
9	PPPROM		PPPROM	9	0.0460	0.5094	.	5.25	0.0257
10	MG2M100MQ		MG2M100MQ	10	0.0311	0.5405	.	3.72	0.0588
11	PENDQ		PENDQ	11	0.0248	0.5653	.	3.08	0.0850
12		MN1PPMQ	MN1PPMQ	10	0.0130	0.5523	.	1.61	0.2094
13	K2M100M		K2M100M	11	0.0205	0.5728	.	2.59	0.1133
14	PH2Q		PH2Q	12	0.0175	0.5903	.	2.26	0.1383
15		NA2M100G	NA2M100G	11	0.0154	0.5749	.	1.99	0.1638
16	CA1M100MQ		CA1M100MQ	12	0.0389	0.6138	.	5.33	0.0249
17	K2M100GQ		K2M100GQ	13	0.0225	0.6362	.	3.21	0.0789
18	MG2M100GQ		MG2M100GQ	14	0.0308	0.6670	.	4.71	0.0346
19		PENDQ	PENDQ	13	0.0086	0.6585	.	1.31	0.2577
20		MG2M100MQ	MG2M100MQ	12	0.0129	0.6456	.	1.97	0.1669
21	MG1M100G		MG1M100G	13	0.0312	0.6767	.	5.02	0.0294
22	MO1PQ		MO1PQ	14	0.0470	0.7237	.	8.67	0.0049
23	PENDQ		PENDQ	15	0.0177	0.7414	.	3.41	0.0706
24	ARENA1		ARENA1	16	0.0179	0.7593	.	3.65	0.0619
25	SB1PQ		SB1PQ	17	0.0281	0.7874	.	6.35	0.0151
26		ARENA2	ARENA2	16	0.0027	0.7847	.	0.61	0.4378
27	MO2PQ		MO2PQ	17	0.0251	0.8098	.	6.32	0.0153
28		ZN1PPMQ	ZN1PPMQ	16	0.0063	0.8035	.	1.59	0.2131
29	TEMPROMQ		TEMPROMQ	17	0.0204	0.8238	.	5.55	0.0226
30	ASNMQ		ASNMQ	18	0.0125	0.8363	.	3.60	0.0640
31	LIMO2		LIMO2	19	0.0105	0.8468	.	3.15	0.0827
32	PH1Q		PH1Q	20	0.0081	0.8549	.	2.51	0.1198
33	ZN1PPMQ		ZN1PPMQ	21	0.0077	0.8626	.	2.46	0.1241
34	CAMG2M100M		CAMG2M100M	22	0.0074	0.8701	.	2.47	0.1237
35	FE2PPMQ		FE2PPMQ	23	0.0090	0.8790	.	3.11	0.0849

Los valores 1 representan a las variables de primera profundidad (0 a 20 cm)

Los valores 2 representan a las variables de segunda profundidad (20 a 40 cm)

Las variables que terminan con la letra "Q" son variables que están elevadas al cuadrado.



ANEXO 8A Análisis de regresión para el modelo de predicción de IS<sub>10</sub>, evaluado en plantaciones de *Tectona grandis* en Guatemala.

Variable	N	R <sup>2</sup>	R <sup>2</sup> Aj	ECMP
INDSITIO	64	0.5685	0.4871	22.2443

**Coefficientes de regresión y estadísticos asociados**

Coef	Est.	EE	LI (95%)	LS (95%)	T	p-valor	Cp	Mallows
const	-5.0298	6.8457	-18.7605	8.7010	-0.7347	0.4657		
NA2M100G	12.5207	5.5353	1.4183	23.6232	2.2620	0.0278	15.0403	20.5256
ZN1PPMQ	0.3985	0.1218	0.1542	0.6428	3.2719	0.0019	13.4239	24.5013
P2PPMQ	-0.4658	0.2501	-0.9674	0.0358	-1.8627	0.0681	18.2433	23.7753
HorizsapriQ	1.1443	0.2979	0.5468	1.7418	3.8414	0.0003	20.0066	15.5982
PPPROMQ	-2.9E-06	1.0E-06	-4.9E-06	-8.9E-07	-2.8948	0.0055	14.0403	16.2595
MG2M100G	-0.5882	0.1571	-0.9033	-0.2731	-3.7438	0.0004		
ARENA2	0.1433	0.0449	0.0532	0.2334	3.1901	0.0024		
PPPROM	0.0121	0.0051	0.0019	0.0223	2.3843	0.0207		
MG2M100MQ	0.0175	0.0087	0.0002	0.0349	2.0243	0.0480		
PENDQ	-0.0010	0.0004	-0.0019	-0.0002	-2.5217	0.0147		

**Cuadro de Análisis de la Varianza (SC tipo III)**

F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
Modelo	1057.6329	10	105.7633	6.9832	<0.0001
NA2M100G	77.4915	1	77.4915	5.1165	0.0278
ZN1PPMQ	162.1363	1	162.1363	10.7054	0.0019
P2PPMQ	52.5482	1	52.5482	3.4696	0.0681
HorizsapriQ	223.4860	1	223.4860	14.7561	0.0003
PPPROMQ	126.9178	1	126.9178	8.3800	0.0055
MG2M100G	212.2819	1	212.2819	14.0163	0.0004
ARENA2	154.1264	1	154.1264	10.1765	0.0024
PPPROM	86.1001	1	86.1001	5.6849	0.0207
MG2M100MQ	62.0604	1	62.0604	4.0977	0.0480
PENDQ	96.3055	1	96.3055	6.3588	0.0147
Error	802.7031	53	15.1453		
Total	1860.3360	63			

Los valores 1 representan a las variables de primera profundidad (0 a 20 cm)

Los valores 2 representan a las variables de segunda profundidad (20 a 40 cm)

Las variables que terminan con la letra "Q" son variables que están elevadas al cuadrado.

**ANEXO 9A** Sumario de la selección de variables que explican el IS<sub>10</sub> con el procedimiento STEPWISE, de SAS y Análisis de regresión para los modelos de predicción de IS<sub>10</sub>, evaluados en plantaciones de *Tectona grandis* en Guatemala, en sitios con pH menores a 5.5, para un n = 11.

Summary of Stepwise Selection

Step	Variable Entered	Variable Removed	Label	Number Vars In	Partial R-Square	Model R-Square	C(p)	F Value	Pr > F
1	ARENA1		ARENA1	1	0.3740	0.3740	.	6.57	0.0263
2	CA2M100GQ		CA2M100GQ	2	0.2845	0.6585	.	8.33	0.0162
3	PSCA1		PSCA1	3	0.1912	0.8498	.	11.46	0.0081
4	LIMO2Q		LIMO2Q	4	0.0649	0.9146	.	6.08	0.0390
5	K1PPM		K1PPM	5	0.0238	0.9384	.	2.71	0.1438
6	CA1M100M		CA1M100M	6	0.0393	0.9778	.	10.63	0.0173
7	ARENA2		ARENA2	7	0.0169	0.9947	.	15.85	0.0105
8	ACINT1M100MQ		ACINT1M100MQ	8	0.0035	0.9982	.	7.94	0.0479
9		PSCA1	PSCA1	7	0.0000	0.9982	.	0.09	0.7820
10		LIMO2Q	LIMO2Q	6	0.0010	0.9972	.	2.79	0.1556
11	ZN1PPMQ		ZN1PPMQ	7	0.0016	0.9988	.	6.61	0.0500
12	ZN1PPM		ZN1PPM	8	0.0006	0.9993	.	3.31	0.1429
13	CA2M100MQ		CA2M100MQ	9	0.0005	0.9999	.	10.81	0.0462
14	K1M100G		K1M100G	10	0.0001	1.0000	.	10.30	0.0849
15	K1M100MQ		K1M100MQ	11	0.0000	1.0000	.	15443.1	0.0051

**Análisis de regresión lineal  
PARA PH MENORES A 5.5**

Variable	N	R <sup>2</sup>	R <sup>2</sup> Aj	ECMP
INDSITIO	11	0.8503	0.7861	36.3392

**Coefficientes de regresión y estadísticos asociados**

Coef	Est.	EE	LI (95%)	LS (95%)	T	p-valor
<u>CpMallows</u>						
const	0.8917	3.0275	-6.2672	8.0506	0.2945	0.7769
ARENA1	0.3055	0.0672	0.1465	0.4645	4.5435	0.0027
CA2M100GQ	-0.0034	0.0024	-0.0091	0.0023	-1.4105	0.2013
PSCA1	0.1530	0.0556	0.0216	0.2845	2.7527	0.0284

**Cuadro de Análisis de la Varianza (SC tipo III)**

F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
Modelo	328.2384	3	109.4128	13.2538	0.0028
ARENA1	170.4139	1	170.4139	20.6433	0.0027
CA2M100GQ	16.4232	1	16.4232	1.9894	0.2013
PSCA1	62.5545	1	62.5545	7.5776	0.0284
Error	57.7863	7	8.2552		
Total	386.0247	10			

ANEXO 10A Sumario de la selección de variables que explican el IS<sub>10</sub> con el procedimiento STEPWISE, de SAS y Análisis de regresión para los modelos de predicción de IS<sub>10</sub>, evaluados en plantaciones de *Tectona grandis* en Guatemala, en sitios con pH mayores a 5.5, para un n = 55.

Summary of Stepwise Selection

Step	Variable Entered	Variable Removed	Label	Number Vars In	Partial R-Square	Model R-Square	C(p)	F Value	Pr > F
1	NA2M100G		NA2M100G	1	0.1653	0.1653	.	10.50	0.0021
2	ZN1PPMQ		ZN1PPMQ	2	0.0867	0.2520	.	6.03	0.0175
3	CA1M100M		CA1M100M	3	0.1040	0.3560	.	8.24	0.0060
4	Profefec		Profefec	4	0.0750	0.4310	.	6.59	0.0133
5	PEND		PEND	5	0.0636	0.4946	.	6.17	0.0165
6	CAMG2M100MQ		CAMG2M100MQ	6	0.0406	0.5351	.	4.19	0.0462
7	CA1M100GQ		CA1M100GQ	7	0.0310	0.5662	.	3.36	0.0730
8	MG2M100G		MG2M100G	8	0.0198	0.5860	.	2.20	0.1445
9	MN1PPM		MN1PPM	9	0.0253	0.6113	.	2.93	0.0938
10	MG2M100GQ		MG2M100GQ	10	0.0292	0.6405	.	3.58	0.0652
11	MN2PPMQ		MN2PPMQ	11	0.0282	0.6687	.	3.65	0.0626
12		CA1M100GQ	CA1M100GQ	10	0.0087	0.6600	.	1.13	0.2946
13	P2PPM		P2PPM	11	0.0206	0.6806	.	2.77	0.1032

**Análisis de regresión lineal  
PARA PH MAYORES A 5.5**

Variable	N	R <sup>2</sup>	R <sup>2</sup> Aj	ECMP
INDSITIO	55	0.5351	0.4770	20.2145

**Coefficientes de regresión y estadísticos asociados**

Coeff	Est.	EE	LI (95%)	LS (95%)	T	p-valor	CpMallows
const	0.5049	2.7946	-5.1140	6.1238	0.1807	0.8574	
NA2M100G	16.4426	5.3813	5.6229	27.2624	3.0555	0.0037	15.1661
ZN1PPMQ	0.3860	0.1139	0.1571	0.6149	3.3902	0.0014	17.2792
CA1M100M	0.2871	0.0729	0.1405	0.4336	3.9390	0.0003	21.2193
Profefec	0.1977	0.0535	0.0901	0.3053	3.6933	0.0006	19.3828
PEND	-0.0920	0.0319	-0.1562	-0.0279	-2.8845	0.0059	14.1708
CAMG2M100MQ	-0.0054	0.0026	-0.0107	-0.0001	-2.0464	0.0462	10.1226

**Cuadro de Análisis de la Varianza (SC tipo III)**

F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
Modelo	838.6987	6	139.7831	9.2095	<0.0001
NA2M100G	141.7076	1	141.7076	9.3362	0.0037
ZN1PPMQ	174.4492	1	174.4492	11.4934	0.0014
CA1M100M	235.4988	1	235.4988	15.5156	0.0003
Profefec	207.0426	1	207.0426	13.6408	0.0006
PEND	126.2865	1	126.2865	8.3202	0.0059
CAMG2M100MQ	63.5610	1	63.5610	4.1876	0.0462
Error	728.5546	48	15.1782		
Total	1567.2533	54			

ANEXO 11A Sumario de la selección de variables que explican el IMA en volumen total con el procedimiento STEPWISE, de SAS, evaluadas en plantaciones de *Tectona grandis* en Guatemala, para un n = 66.

The REG Procedure  
 Model: MODEL1, PARA GL TOTALES 65.  
 Dependent Variable: IMAVOL IMAVOL

Summary of Stepwise Selection

Variable Step	Variable Entered	Variable Removed	Number Label	Partial Vars In	Model R-Square	R-Square	C(p)	F Value	Pr > F
1	NA2M100GQ		NA2M100GQ	1	0.1713	0.1713	.	13.23	0.0006
2	PEND		PEND	2	0.0907	0.2620	.	7.74	0.0071
3	ZN1PPMQ		ZN1PPMQ	3	0.0999	0.3619	.	9.71	0.0028
4	ARENA2Q		ARENA2Q	4	0.0426	0.4045	.	4.37	0.0409
5	PPPROMQ		PPPROMQ	5	0.0312	0.4358	.	3.32	0.0733
6	Profefec		Profefec	6	0.0433	0.4791	.	4.91	0.0306
7	HorizsapriQ		HorizsapriQ	7	0.0320	0.5110	.	3.79	0.0564
8	CA2M100MQ		CA2M100MQ	8	0.0279	0.5389	.	3.44	0.0686
9	CA1M100MQ		CA1M100MQ	9	0.0464	0.5853	.	6.26	0.0153
10	MO1P		MO1P	10	0.0266	0.6119	.	3.77	0.0574
11		Profefec	Profefec	9	0.0036	0.6083	.	0.50	0.4809
12	LIMO2Q		LIMO2Q	10	0.0232	0.6315	.	3.46	0.0681
13	PPPROM		PPPROM	11	0.0243	0.6558	.	3.81	0.0562
14	K1PPMQ		K1PPMQ	12	0.0195	0.6753	.	3.19	0.0798
15		NA2M100GQ	NA2M100GQ	11	0.0117	0.6636	.	1.91	0.1730
16	K1PPM		K1PPM	12	0.0212	0.6849	.	3.57	0.0642
17		LIMO2Q	LIMO2Q	11	0.0080	0.6769	.	1.35	0.2510
18	P2PPM		P2PPM	12	0.0180	0.6949	.	3.12	0.0829
19	HorizorgQ		HorizorgQ	13	0.0140	0.7089	.	2.50	0.1196
20	ARCILLA1Q		ARCILLA1Q	14	0.0180	0.7269	.	3.37	0.0723
21		MO1P	MO1P	13	0.0053	0.7216	.	1.00	0.3226
22	ARCILLA1		ARCILLA1	14	0.0174	0.7390	.	3.40	0.0709
23		HorizorgQ	HorizorgQ	13	0.0098	0.7292	.	1.91	0.1727
24	CA1M100GQ		CA1M100GQ	14	0.0137	0.7429	.	2.71	0.1056

Los valores 1 representan a las variables de primera profundidad (0 a 20 cm)

Los valores 2 representan a las variables de segunda profundidad (20 a 40 cm)

Las variables que terminan con la letra "Q" son variables que están elevadas al cuadrado.

ANEXO 12A Análisis de regresión para el modelo de predicción de Productividad, por medio del IMA en volumen total, evaluado en plantaciones de *Tectona grandis* en Guatemala.

**Análisis de regresión lineal**

Variable	N	R <sup>2</sup>	R <sup>2</sup> Aj	ECMP
IMAVOL	66	0.5110	0.4520	60.3505

**Coefficientes de regresión y estadísticos asociados**

Coef	Est.	EE	LI (95%)	LS (95%)	T	p-valor	Cp	Mallows
const	0.0621	3.0569	-6.0569	6.1811	0.0203	0.9839		
NA2M100GQ	23.1760	9.4203	4.3192	42.0329	2.4602	0.0169	12.9670	
PEND	-0.2022	0.0531	-0.3084	-0.0959	-3.8097	0.0003	21.2848	
ZN1PPMQ	0.7190	0.2054	0.3078	1.1302	3.5001	0.0009	19.0603	
ARENA2Q	0.0030	0.0009	0.0011	0.0049	3.2279	0.0021	17.2595	
PPPROMQ	-9.2E-07	3.2E-07	-1.6E-06	-2.8E-07	-2.8760	0.0056	15.1479	
Profefec	0.1848	0.0895	0.0057	0.3640	2.0653	0.0434	11.2100	
HorizsapriQ	0.9460	0.4859	-0.0267	1.9187	1.9469	0.0564	10.7430	

**Cuadro de Análisis de la Varianza (SC tipo III)**

F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
Modelo	2922.3449	7	417.4778	8.6601	<0.0001
NA2M100GQ	291.7809	1	291.7809	6.0526	0.0169
PEND	699.6745	1	699.6745	14.5139	0.0003
ZN1PPMQ	590.5872	1	590.5872	12.2510	0.0009
ARENA2Q	502.2771	1	502.2771	10.4191	0.0021
PPPROMQ	398.7297	1	398.7297	8.2711	0.0056
Profefec	205.6218	1	205.6218	4.2654	0.0434
HorizsapriQ	182.7193	1	182.7193	3.7903	0.0564
Error	2796.0232	58	48.2073		
Total	5718.3682	65			

ANEXO 13A Sumario de la selección de variables que explican el IMAVOL con el procedimiento STEPWISE, de SAS y Análisis de regresión para los modelos de predicción de IMAVOL, evaluados en plantaciones de *Tectona grandis* en Guatemala, en sitios con pH menores a 5.5, para un n = 11.

Summary of Stepwise Selection

Step	Variable Entered	Variable Removed	Label	Number Vars In	Partial R-Square	Model R-Square	C (p)	F Value	Pr > F
1	ZN2PPM		ZN2PPM	1	0.4296	0.4296	.	8.28	0.0150
2	CU2PPMQ		CU2PPMQ	2	0.2564	0.6859	.	8.16	0.0170
3	CAMG1M100MQ		CAMG1M100MQ	3	0.1650	0.8510	.	9.97	0.0116
4	CA1M100GQ		CA1M100GQ	4	0.0925	0.9434	.	13.08	0.0068
5	SB1PQ		SB1PQ	5	0.0318	0.9753	.	9.01	0.0199
6	ARENA2		ARENA2	6	0.0189	0.9941	.	19.30	0.0046
7	TEMPROM		TEMPROM	7	0.0046	0.9988	.	19.13	0.0072
8	MG1M100G		MG1M100G	8	0.0010	0.9998	.	22.32	0.0091
9	MG2M100GQ		MG2M100GQ	9	0.0001	0.9999	.	5.43	0.1022
10	ARENA1Q		ARENA1Q	10	0.0001	1.0000	.	20.95	0.0446
11	FE2PPMQ		FE2PPMQ	11	0.0000	1.0000	.	396.78	0.0319

**Análisis de regresión lineal**

Variable	N	R <sup>2</sup>	R <sup>2</sup> Aj	ECMP
IMAVOL	11	0.8984	0.8548	19.1739

**Coefficientes de regresión y estadísticos asociados**

Coef	Est.	EE	LI (95%)	LS (95%)	T	p-valor	Cp	Mallows
const	10.6923	3.1731	3.1892	18.1953	3.3697	0.0119		
CAMG1M100MQ	0.4283	0.0921	0.2105	0.6460	4.6506	0.0023	22.0498	
CU2PPMQ	4.6203	1.1670	1.8607	7.3798	3.9590	0.0055	16.8397	
ZN2PPM	-29.7187	7.0413	-46.3687	-13.0686	-4.2206	0.0039	18.7119	

**Cuadro de Análisis de la Varianza (SC tipo III)**

F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
Modelo	684.5853	3	228.1951	20.6236	0.0007
CAMG1M100MQ	239.3122	1	239.3122	21.6283	0.0023
CU2PPMQ	173.4288	1	173.4288	15.6740	0.0055
ZN2PPM	197.1039	1	197.1039	17.8136	0.0039
Error	77.4534	7	11.0648		
Total	762.0388	10			

ANEXO 14A Sumario de la selección de variables que explican el IMAVOL con el procedimiento STEPWISE, de SAS y Análisis de regresión para los modelos de predicción de IMAVOL, evaluados en plantaciones de *Tectona grandis* en Guatemala, en sitios con pH mayores a 5.5, para un n = 55.

Summary of Stepwise Selection

Step	Variable Entered	Variable Removed	Label	Number Vars In	Partial R-Square	Model R-Square	C(p)	F Value	Pr > F
1	NA2M100G		NA2M100G	1	0.2424	0.2424	.	16.96	0.0001
2	K2PPM		K2PPM	2	0.1305	0.3729	.	10.82	0.0018
3	K2M100GQ		K2M100GQ	3	0.0559	0.4287	.	4.99	0.0299
4	CA1M100M		CA1M100M	4	0.0442	0.4729	.	4.19	0.0460
5	CIC1M100GQ		CIC1M100GQ	5	0.0779	0.5508	.	8.50	0.0054
6	PEND		PEND	6	0.0429	0.5937	.	5.07	0.0289
7	CU2PPM		CU2PPM	7	0.0470	0.6407	.	6.15	0.0168
8	CAMG1M100MQ		CAMG1M100MQ	8	0.0375	0.6783	.	5.37	0.0250
9	FE2PPM		FE2PPM	9	0.0153	0.6935	.	2.24	0.1414

### Análisis de regresión lineal PARA PH MAYORES A 5.5

Variable	N	R <sup>2</sup>	R <sup>2</sup> Aj	ECMP
IMAVOL	55	0.5508	0.5049	56.5715

### Coefficientes de regresión y estadísticos asociados

Coef	Est.	EE	LI (95%)	LS (95%)	T	p-valor	Cp	Mallows
const	-10.3603	3.5124	-17.4188	-3.3018	-2.9496	0.0049		
NA2M100G	31.1228	9.6776	11.6749	50.5707	3.2160	0.0023	15.1556	
K2PPM	0.1121	0.0298	0.0523	0.1720	3.7647	0.0004	18.9096	
K2M100GQ	-9.4078	3.4633	-16.3675	-2.4481	-2.7165	0.0091	12.2515	
CA1M100M	0.6142	0.1684	0.2757	0.9526	3.6467	0.0006	18.0527	
CIC1M100GQ	-0.0029	0.0010	-0.0048	-0.0009	-2.9149	0.0054	13.3466	

### Cuadro de Análisis de la Varianza (SC tipo III)

F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
Modelo	2691.0323	5	538.2065	12.0148	<0.0001
NA2M100G	463.2896	1	463.2896	10.3424	0.0023
K2PPM	634.8841	1	634.8841	14.1730	0.0004
K2M100GQ	330.5482	1	330.5482	7.3791	0.0091
CA1M100M	595.7158	1	595.7158	13.2987	0.0006
CIC1M100GQ	380.6037	1	380.6037	8.4965	0.0054
Error	2194.9634	49	44.7952		
Total	4885.9957	54			