

CENTRO AGRONÓMICO TROPICAL DE INVESTIGACIÓN Y ENSEÑANZA

SUBDIRECCIÓN GENERAL ADJUNTA DE ENSEÑANZA

PROGRAMA DE POSGRADO

CRECIMIENTO INICIAL DE LAS ESPECIES *Casuarina equisetifolia*
L. ex J.R. Forst. & G. Forst. Y *Casuarina cunninghamiana*
Miq. EN PLANTACION EN AMERICA CENTRAL.

Tesis sometida a consideración del Comité Técnico Académico
del Programa de Estudios de Posgrado en Ciencias Agrícolas y
Recursos Naturales del Centro Agronómico Tropical de
Investigación y Enseñanza, para optar al grado de

MAGISTER SCIENTIAE

POR

JOSE ANIBAL MARCHENA MATOS

Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza

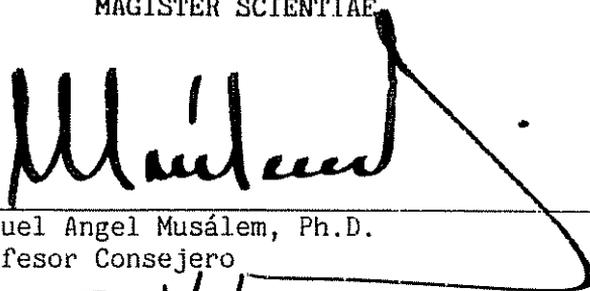
Turrialba, Costa Rica

1990

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

MAGISTER SCIENTIAE

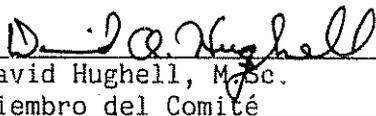
COMITE ASESOR:



Miguel Angel Musálem, Ph.D.
Profesor Consejero



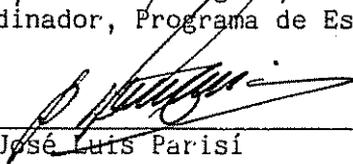
Rodolfo Salazar, Ph.D.
Miembro del Comité



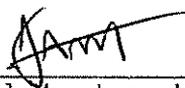
David Hughell, M.Sc.
Miembro del Comité



Ramón Lastra Rodríguez, Ph.D.
Coordinador, Programa de Estudios de Posgrado



Dr. José Luis Parisi
Subdirector General Adjunto de Enseñanza



José Aníbal Marchena Matos
Candidato

AGRADECIMIENTOS

El autor desea expresar su agradecimiento al Dr. Miguel Angel Musálem por su gran ayuda y acertada orientación en el desarrollo de este trabajo durante mi permanencia en este Centro.

Al Dr. Rodolfo Salazar y al M.Sc. David Hughell, miembros del comité asesor de tesis, por sus valiosas ayudas en la elaboración de este documento.

Al Ing. Valentín Jiménez por su acertada asistencia y colaboración.

Al Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza (CATIE) por haberme concedido la oportunidad de completar estudios de Posgrado.

A la Overseas Development Administration (ODA), que por medio de su aporte, financió mis estudios de Maestría.

A todo el personal de la Biblioteca Conmemorativa Orton por su valiosa cooperación y asistencia en los dos años de estudios.

Al personal del Proyecto MADELEÑA en América Central y a todas las personas que de una u otra manera me brindaron su apoyo y cooperación.

BIOGRAFIA

El autor nació en Azua de Compostela, República Dominicana.

Realizó sus estudios de Bachillerato en el Instituto Superior de Agricultura, Santiago, República Dominicana.

En 1973 ingresó a la Escuela Agrícola Panamericana, Honduras, donde se graduó de Agrónomo en 1975. Ingresó a la Facultad de Educación Agrícola de la Universidad Mundial Dominicana donde recibió el título de Licenciado.

De 1980 a 1988 laboró en la Dirección Regional Central, Secretaría de Estado de Agricultura, donde ocupó cargos en la Unidad de Recursos Naturales y en el Proyecto Sabana Yegua de conservación de suelos y aguas.

En setiembre de 1988 ingresó al Programa de Posgrado del CATIE en Turrialba, Costa Rica, donde obtuvo el grado de Magister Scientiae en Octubre de 1990.

INDICE

	Página
RESUMEN.....	ix
SUMMARY.....	xi
LISTA DE CUADROS.....	xiii
LISTA DE FIGURAS.....	xvi
LISTA DE ANEXO.....	xviii
1. INTRODUCCION.....	1
1.1 Objetivos.....	3
1.1.1 General.....	3
1.1.2 Específicos.....	3
2. REVISION DE LITERATURA.....	4
2.1 Las especies.....	4
2.1.1 Taxonomía y distribución de las especies <u>Casuarina equisetifolia</u> Forst. & Forst. y <u>Casuarina cunninghamiana</u> Miq.....	4
2.1.1.1 <u>Casuarina equisetifolia</u> Forst. & Forst.....	4
2.1.1.2 <u>Casuarina cunninghamiana</u> Miq.....	4
2.1.2 Descripción de las especies <u>Casuarina</u> <u>equisetifolia</u> Forst. & Forst. y <u>Casuarina</u> <u>cunninghamiana</u> Miq.....	5
2.1.2.1 <u>Casuarina equisetifolia</u> Forst. & Forst.....	5
2.1.2.2 <u>Casuarina cunninghamiana</u> Miq.....	6
2.1.3 Requerimientos ambientales de las especies <u>Casuarina equisetifolia</u> Forst. & Forst. y <u>Casuarina cunninghamiana</u> Miq.....	6
2.1.3.1 <u>Casuarina equisetifolia</u> Forst. & Forst.....	6

2.1.3.2	<u>Casuarina cunninghamiana</u> Miq.....	8
2.1.4	Regeneración y producción de las especies <u>Casuarina equisetifolia</u> Forst. & Forst. y <u>Casuarina cunninghamiana</u> Miq.....	9
2.1.4.1	<u>Casuarina equisetifolia</u> Forst. & Forst.....	9
2.1.4.2	<u>Casuarina cunninghamiana</u> Miq.....	9
2.1.5	Crecimiento de las especies <u>Casuarina</u> <u>equisetifolia</u> Forst. & Forst. y <u>Casuarina</u> <u>cunninghamiana</u> Miq. en algunos países tropicales y subtropicales.....	11
2.1.5.1	<u>Casuarina equisetifolia</u> Forst. & Forst.....	11
2.1.5.2	<u>Casuarina cunninghamiana</u> Miq.....	11
2.1.6	Usos de las especies <u>Casuarina equisetifolia</u> Forst. & Forst. y <u>Casuarina cunninghamiana</u> Miq.....	11
2.1.6.1	<u>Casuarina equisetifolia</u> Forst. & Forst.....	11
2.1.6.2	<u>Casuarina cunninghamiana</u> Miq.....	14
2.2	Parcelas permanentes y parcelas temporales.....	15
2.2.1	Parcelas permanentes.....	15
2.2.2	Parcelas temporales.....	15
2.3	Modelos de crecimiento y rendimiento.....	15
2.3.1	Consideraciones.....	15
2.3.2	Clasificación de modelos de crecimiento.....	18
2.4	Estimación indirecta del índice de sitio.....	19
3.	MATERIALES Y METODOS.....	21
3.1	Localización del área de estudio.....	21
3.2	Metodología.....	21
3.2.1	Organización de la información.....	21
3.2.2	Uso y evaluación de la serie de ecuaciones presentadas.....	26

3.2.3	Estimación de la producción en volumen y biomasa de árboles individuales.....	27
3.2.4	Estimación directa del índice de sitio.....	28
3.2.5	Correlación entre el índice de sitio y los factores ambientales.....	31
3.2.6	Ecuaciones para estimar los parámetros de la masa forestal.....	32
3.2.7	Incorporación de la serie de ecuaciones al modelo global y confección de tablas de rendimiento.....	33
3.2.8	Verificación del modelo.....	33
4.	RESULTADOS Y DISCUSION.....	35
4.1	<u>Casuarina equisetifolia</u> Forst. & Forst.....	35
4.1.1	Estimación de la producción en volumen y biomasa de árboles individuales.....	35
4.1.2	Estimación directa del índice de sitio.....	44
4.1.3	Correlación entre el índice de sitio y los factores ambientales.....	44
4.1.4	Ecuaciones para estimar los parámetros de la masa forestal.....	48
4.1.5	Tablas de rendimiento.....	49
4.1.6	Verificación del modelo.....	52
4.2	<u>Casuarina cunninghamiana</u> Miq.....	59
4.2.1	Estimación directa del índice de sitio.....	61
4.2.2	Ecuaciones para estimar los parámetros de la masa forestal.....	61
4.2.3	Tablas de rendimiento.....	65
4.2.4	Verificación del modelo.....	65
4.3	Comparación del comportamiento de las especies <u>Casuarina equisetifolia</u> Forst. & Forst. y <u>Casuarina cunninghamiana</u> Miq. con otras similares en América Central.....	72

4.3.1	Diámetro y altura media.....	73
4.3.2	Producción en volumen y biomasa de árboles individuales.....	73
4.3.3	Incremento medio anual (IMA).....	74
5	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	75
6	LITERATURA CITADA.....	78
7	ANEXO.....	83

MARCHENA MATOS, J.A. 1990. Crecimiento inicial de las especies Casuarina equisetifolia L. ex J.R. Forst. & G. Forst. y Casuarina cunninghamiana Miq en plantación en América Central.

PALABRAS CLAVES: Casuarina equisetifolia, Casuarina cunninghamiana, índice de sitio, modelos de crecimiento y rendimiento, estimación de volumen, estimación de biomasa.

RESUMEN

Casuarina equisetifolia L. ex J. R. Forst. & G. Forst. y Casuarina cunninghamiana Miq están despertando interés en todo el mundo ya que son especies bastante libres de enfermedades, prosperan en suelos poco fértiles no aptos para el desarrollo de otras especies y producen múltiples bienes y servicios.

El presente trabajo hace una revisión sobre el crecimiento y rendimiento que han mostrado estas dos especies, en parcelas permanentes de crecimiento, instaladas en los países de la región centroamericana por los Proyectos Leña y Fuentes Alternas de Energía (LEÑA), y Cultivo de Árboles de Uso Múltiple (MADELEÑA), de CATIE-ROCAF junto con las instituciones nacionales encargadas de administrar los recursos forestales de los países de América Central y Panamá.

Con base a los datos de 28 parcelas de Casuarina cunninghamiana y 38 de Casuarina equisetifolia, fueron desarrollados modelos matemáticos para predecir el crecimiento y rendimiento de ambas especies hasta edades de 6 y 5 años, respectivamente.

Para desarrollar los modelos se empleó una metodología práctica. Para la estimación de la producción en volumen ($m^3/\text{Árbol}$) y biomasa ($kg/\text{árbol}$) de árboles individuales se aplicó el modelo logarítmico en función del diámetro y la altura. Para estimar el índice de sitio se aplicó el método de la curva guía con la regresión jerárquica y la ecuación de Schumacher. Para estimar la altura y el diámetro fué seleccionado el modelo logarítmico en función del índice de sitio y la edad. Se incorporó esta serie de ecuaciones al modelo global el cual, con la aplicación de la hoja electrónica, permitió la confección de tablas de rendimiento para las dos especies.

MARCHENA MATOS, J.A. 1990. Early growth of Casuarina equisetifolia L. ex J.R. Forst. & G. Forst. and Casuarina cunninghamiana Miq. in Central America.

KEY WORDS: Casuarina equisetifolia, Casuarina cunninghamiana, site index, growth and yield models, volume estimation, biomass estimation.

SUMMARY

There has been a growing interest world wide in the use of Casuarina equisetifolia Forst. & Forst. and Casuarina cunninghamiana Miq. because these species are nearly disease-free, can tolerate extremely infertile soils unsuitable for other species, and because they can produce a variety of products and services.

The main purpose of this research was to study the growth of these two species in permanent plots established by the Fuelwood and Alternative Energy Sources Project (1980-1985) and the Tree Crops Production Project (1986-1991), which were carried out by CATIE and RDCAP, with the cooperation of the national forestry agencies within each country. These plots are distributed in all the Central American countries and Panama.

Based on the information gathered from 28 C. cunninghamiana and 38 C. equisetifolia plots, mathematical models were developed to predict growth and yield characteristics of both species up to 5 and 6 years, respectively.

These models were developed using an empirical methodology. To estimate site index a guide curve method was applied using nested regression with Schumacher's transformation. A logarithmic model was used to estimate height and diameter as a function of site index and age. Production volume ($m^3/tree$) and individual tree biomass ($kg/tree$) was modeled as a logarithmic function of diameter and height. These smaller models were then incorporated into a global model and, using an electronic spreadsheet, yield tables were prepared for both species.

LISTA DE CUADROS

Cuadro No		Página
1.	Requerimientos ambientales de las especies <u>Casuarina equisetifolia</u> Forst. & Forst. y <u>Casuarina cunninghamiana</u> Miq.....	10
2.	Crecimiento de <u>Casuarina equisetifolia</u> Forst. & Forst. en algunos países tropicales y subtropicales.....	12
3.	Crecimiento de <u>Casuarina cunninghamiana</u> Miq. en algunos países tropicales y subtropicales.....	13
4.	Ubicación de los ensayos y parcelas de <u>Casuarina equisetifolia</u> Forst. & Forst. en América Central...	23
5.	Ubicación de los ensayos y parcelas de <u>Casuarina cunninghamiana</u> Miq. en América Central.....	24
6.	Ambito de las variables incluidas para los resúmenes por medición para las parcelas de <u>Casuarina equisetifolia</u> Forst. & Forst. en América Central.....	36
7.	Ambito de diámetros y alturas de los datos de árboles individuales utilizados para desarrollar las ecuaciones para estimar el volumen, biomasa total y peso de leña de <u>Casuarina equisetifolia</u> Forst. & Forst. en América Central.....	38
8.	Coeficientes de regresión y determinación de los modelos para estimar la producción por árbol de <u>Casuarina equisetifolia</u> Forst. & Forst. en América Central.....	39
9.	Tabla de volumen total con corteza por árbol de <u>Casuarina equisetifolia</u> Forst. & Forst. en América Central.....	40
10.	Tabla de volumen total sin corteza por árbol de <u>Casuarina equisetifolia</u> Forst. & Forst. en América Central.....	41

11.	Tabla de producción de biomasa seca total por árbol (fuste+ramas+follaje) de <u>Casuarina equisetifolia</u> Forst. & Forst. en América Central...42
12.	Tabla de producción de leña seca por árbol (fuste+ramas) de <u>Casuarina equisetifolia</u> Forst. & Forst. en América Central.....43
13.	Valores de los coeficientes para estimar el índice de sitio de las parcelas de <u>Casuarina equisetifolia</u> Forst. & Forst. en América Central...45
14.	Matriz de correlación de los factores del sitio con el índice de sitio de los factores que presentaron una correlación significativa para <u>Casuarina equisetifolia</u> Forst. & Forst. en América Central.....47
15.	Ecuaciones utilizadas para estimar la altura media y el diámetro de <u>Casuarina equisetifolia</u> Forst. & Forst. en América Central.....50
16.	Serie de ecuaciones que comprende el modelo global para predecir el crecimiento y rendimiento de <u>Casuarina equisetifolia</u> Forst. & Forst. en América Central.....51
17.	Predicción del rendimiento de <u>Casuarina equisetifolia</u> Forst. & Forst. en América Central.....53
18.	Resultados de la verificación de los modelos para estimar la altura, el diámetro y el peso seco de leña de <u>Casuarina equisetifolia</u> Forst. & Forst. en América Central.....58
19.	Ambito de las variables incluidas para los resúmenes por medición para las parcelas de <u>Casuarina cunninghamiana</u> Miq. en América Central.....60
20.	Valores de los coeficientes para estimar el índice de sitio de las parcelas de <u>Casuarina cunninghamiana</u> Miq. en América Central.....62
21.	Serie de ecuaciones que comprende el modelo global para predecir el crecimiento y rendimiento de <u>Casuarina cunninghamiana</u> Miq. en América Central.....64

22.	Predicción del rendimiento de <u>Casuarina</u> <u>cunninghamiana</u> Miq. en América Central.....	66
23.	Resultados de la verificación de los modelos para estimar la altura, el diámetro y el peso seco de leña de <u>Casuarina</u> <u>cunninghamiana</u> Miq. en América Central.....	71

LISTA DE FIGURAS

Figura No	Página
1.	Mapa de localización de las parcelas de <u>Casuarina equisetifolia</u> Forst. & Forst. y <u>Casuarina cunninghamiana</u> Miq. en América Central...22
2.	Curvas de índice de sitio de 11, 9 y 7 m a la edad base de 5 años para <u>Casuarina equisetifolia</u> Forst. & Forst. y los datos de resúmenes por medición de 38 parcelas permanentes.....46
3.	Desarrollo en diámetro con la edad, de <u>Casuarina equisetifolia</u> Forst. & Forst. para los índices de sitio de 11, 9 y 7 m a la edad base de 5 años y densidad de plantación de 2500 árboles/ha en América Central.....54
4.	Desarrollo en altura media con la edad, de <u>Casuarina equisetifolia</u> Forst. & Forst. para los índices de sitio de 11, 9 y 7 m a la edad base de 5 años y densidad de plantación de 2500 árboles/ha en América Central.....55
5.	Rendimiento de volumen con corteza de <u>Casuarina equisetifolia</u> Forst. & Forst. para los índices de sitio de 11, 9 y 7 m a la edad base de 5 años y densidad de plantación de 2500 árboles/ha en América Central.....56
6.	Rendimiento de peso seco de leña de <u>Casuarina equisetifolia</u> Forst. & Forst. para los índices de sitio de 11, 9 y 7 m a la edad base de 5 años y densidad de plantación de 2500 árboles/ha en América Central.....57
7.	Curvas de índice de sitio de 10, 8 y 6 m a la edad base de 5 años para <u>Casuarina cunninghamiana</u> Miq. y los datos de resúmenes por medición de 28 parcelas permanentes.....63
8.	Desarrollo en diámetro con la edad, de <u>Casuarina cunninghamiana</u> Miq. para los índices de sitio de 10, 8 y 6 m a la edad base de 5 años y densidad de plantación de 2500 árboles/ha en América Central.....67

9. Desarrollo en altura media con la edad, de Casuarina cunninghamiana Miq. para los índices de sitio de 10, 8 y 6 m a la edad base de 5 años y densidad de plantación de 2500 árboles/ha en América Central.....68
10. Rendimiento de volumen con corteza de Casuarina cunninghamiana Miq. para los índices de sitio de 10, 8 y 6 m a la edad base de 5 años y densidad de plantación de 2500 árboles/ha en América Central.....69
11. Rendimiento de peso seco de leña de Casuarina cunninghamiana Miq. para los índices de sitio de 10, 8 y 6 m a la edad base de 5 años y densidad de plantación de 2500 árboles/ha en América Central.....70

LISTA DE ANEXO

Anexo No	Página
Anexo 1. Formularios empleados en la recolección de la información de campo.....	84
Anexo 2. Datos de análisis de suelo de experimentos de <u>Casuarina equisetifolia</u> Forst. & Forst. en América Central. Profundidad 0-40 cm.....	89
Anexo 3. Hoja de verificación de los modelos de <u>Casuarina equisetifolia</u> Forst. & Forst. en América Central.....	90
Anexo 4. Hoja de verificación de los modelos de <u>Casuarina cunninghamiana</u> Miq. en América Central.....	91
Anexo 5. Crecimiento e incrementos medios anuales en diámetro, altura media y altura dominante para las parcelas de <u>Casuarina equisetifolia</u> Forst. & Forst. e índices de sitio en América Central.....	92
Anexo 6. Crecimiento e incrementos medios anuales en diámetro, altura media y altura dominante para las parcelas de <u>Casuarina cunninghamiana</u> Miq. e índices de sitio en América Central.....	96

1. INTRODUCCION

En los trópicos cálido-húmedos existen, por lo general, condiciones muy favorables para las plantaciones forestales debido a que las condiciones climáticas son casi óptimas para una producción elevada de materia orgánica durante todo el año. Asimismo, existe un grupo de especies de crecimiento rápido, muy bien adaptadas a las condiciones difíciles del campo abierto, como lo son las casuarinas, eucaliptos, pinos, etc (Lamprecht, 1982).

En la zona tropical, se han establecido plantaciones forestales a un ritmo cada vez mayor, en particular desde 1970. Es probable que el índice aumente aún más, debido a la creciente demanda de leña y de madera para la industria, tanto rural como urbana, y el consumo familiar, y a la disminución del suministro obtenido en los bosques naturales, así como a la existencia de programas de extensión e incentivos financieros que contribuyen al incremento en la reforestación. En la mayoría de los casos, las especies arbóreas cultivadas son de turno corto, entre 5 y 20 años, y por lo general de crecimiento rápido para producir un volumen máximo, en lugar de piezas de gran tamaño (Pandey, 1987).

Las casuarinas están despertando interés en el mundo tropical ya que son especies resistentes a enfermedades,

prosperan en suelos poco fértiles no aptos para el desarrollo de otras especies, producen buen combustible, por su capacidad para estabilizar la arena y por su resistencia al viento. Se les considera como árboles de uso múltiple ya que producen múltiples bienes y servicios.

En los últimos años, en América Central y Panamá, ha habido una concientización mayor por la necesidad de plantar árboles, la cual ha ayudado a despertar el interés de donantes y agencias internacionales para financiar un mayor número de proyectos forestales. Sin embargo, existen muchos ejemplos de fracasos debido, especialmente, a la falta de información adecuada, de crecimiento y rendimiento que permitan predecir la producción en términos de volumen o biomasa a través del tiempo, y bajo condiciones diferentes de manejo (Hughell, 1990).

Los modelos de crecimiento y rendimiento son una herramienta eficiente en la planificación de la producción forestal, la investigación silvicultural y planificación, y la investigación ecológica y manejo ambiental (Alder, 1980).

Los Proyectos Leña y Fuentes Alternas de Energía (LERNA) y Cultivo de Árboles de Uso Múltiple (MADELEÑA) del Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza (CATIE), de Turrialba, Costa Rica, junto con las instituciones nacionales encargadas de administrar los recursos forestales de los países de América Central y

Panamá, han desarrollado desde 1980 investigación sobre la silvicultura, manejo y producción de especies de árboles de crecimiento rápido y uso múltiple (AUM) (CATIE, 1986).

1.1 Objetivos

1.1.1 General

Determinar y describir el comportamiento, en plantación, de las especies Casuarina equisetifolia Forst. & Forst. y Casuarina cunninghamiana Miq. en América Central.

1.1.2 Específicos

1. Desarrollar una ecuación para estimar el índice de sitio con base en la altura dominante y edad de los árboles en la masa forestal.

2. Correlacionar el índice de sitio calculado para cada parcela con los factores edáficos, climáticos y fisiográficos.

3. Desarrollar una ecuación para estimar la producción en volumen y biomasa con base en el diámetro y la altura.

4. Desarrollar una serie de ecuaciones que describa el desarrollo de la masa con la edad y el índice de sitio.

5. Incorporar las ecuaciones desarrolladas en un sistema que permita confeccionar tablas de rendimiento para las dos especies.

2. REVISION DE LITERATURA.

2.1 Las Especies.

2.1.1 Taxonomía y distribución de las especies Casuarina equisetifolia y C. cunninghamiana.

2.1.1.1 C. equisetifolia.

Nombre científico: Casuarina equisetifolia Forst. & Forst.

Familia: Casuarinaceae.

Sinónimo: Casuarina litorea.

Nombres comunes: casuarina, she oak, horsetail oak, Australian pine, ironwood, whistling pine, agoho (Las Filipinas), ru (Malasia), filao (Senegal), nokonoko (Fiji).

La C. equisetifolia es nativa de las costas tropicales, desde Bangladesh, Burma y las Islas de Andaman, hasta Indonesia, Filipinas, y algunas islas del Pacífico y el norte y este de Australia (Queensland y Nueva Gales del Sur). Fue introducida en la mayoría de las zonas tropicales y subtropicales y se le planta ampliamente en América Latina, desde México hasta Brasil y Argentina (CATIE, 1986).

2.1.1.2 C. cunninghamiana.

Nombre científico: Casuarina cunninghamiana Miq.

Familia: Casuarinaceae.

Nombres comunes: river she oak, creek oak, river oak, casuarina.

La C. cunninghamiana es nativa del este y norte de Australia, desde el norte de Queensland y el Territorio del Norte hasta el sur de Nueva Gales del Sur, generalmente a lo largo de los cursos de ríos y riachuelos de agua dulce, a ambos lados de la Gran Cordillera Australiana. Fue introducida en las regiones tropicales y subtropicales de América del Sur, sur de los Estados Unidos, África del Sur y Hawaii (CATIE, 1986).

2.1.2 Descripción de las especies C. equisetifolia y C. cunninghamiana.

Las casuarinas son especies no leguminosas capaces de fijar nitrógeno atmosférico mediante la relación simbiótica establecida entre las raíces de los árboles y el microorganismo del suelo del género Frankia (Torrey, 1983).

Muchos autores aseguran que "los sitios difíciles son el lugar para las casuarinas". La arena, el sol y la sal son parte del lugar donde se encuentran las casuarinas. Para adaptarse al ambiente seco, las casuarinas poseen una cutícula espesa y cerosa que cubre las ramas y una sección circular rugosa que reduce el área superficial expuesta al sol. Estas dos características ayudan al árbol a reducir la pérdida de agua (NRC, 1984).

2.1.2.1 C. equisetifolia.

C. equisetifolia ha sido reportada tanto monoica como dioica (Torrey, 1983). La polinización se efectúa por el viento y la floración toma lugar durante un período breve del año y es consistente año con año. La especie produce

semillas en abundancia desde los 5 años (Rockwood et al., 1985).

Es un árbol siempreverde de fuste recto y tamaño mediano a grande, de 15-30 m de altura o más y diámetro entre 20-50 cm o más, con ramillas delgadas aciculares que lo asemejan a pinos, de copa delgada que se hace ancha con la edad (CATIE, 1986).

La madera de la albura es rosada a marrón claro y la madera del duramen marrón oscuro. La madera es de grano recto y textura fina, raja fácilmente cuando seca, y es muy susceptible al ataque de termitas (NAS, 1983).

2.1.2.2 C. cunninghamiana.

En Australia, C. cunninghamiana es la especie del género que alcanza el mayor tamaño, obteniendo 20-35 m de altura y 0,5-1,5 m de diámetro (Doran y Hall, 1983).

Es un árbol siempreverde, de base ensanchada y sistema radicular poco profundo y bastante amplio. El fuste es recto, con numerosas ramas curvadas hacia abajo que forman una copa irregular y poco densa.

La madera de la albura es blanca y la del duramen pardo rojiza con radios anchos, sufre encogimiento durante el secado y no es durable en contacto con el suelo (NAS, 1980).

2.1.3 Requerimientos ambientales de las especies C.

equisetifolia y C. cunninghamiana.

2.1.3.1 C. equisetifolia.

Temperatura: en forma natural, C. equisetifolia crece en zonas cálidas tropicales y subtropicales con

temperaturas medias entre 10°C y 33°C. Resiste muy pocas heladas al año (NAS, 1983).

Precipitación: en su habitat natural la precipitación varía entre 700-2000 mm, especialmente entre 1000 y 1500 mm, con una estación seca de 6-8 meses. Mundialmente, se ha introducido en lugares con precipitaciones desde 200 a 5000 mm. En América Central se le ha plantado en sitios con precipitaciones de 900 a 2800 mm anuales con resultados aceptables (NAS, 1983).

Altitud: aunque en Australia se le encuentra desde el nivel del mar hasta 1000 m de altitud, en las regiones tropicales se le ha plantado hasta aproximadamente 2500 msnm. En América Central se le ha plantado hasta aproximadamente 1600 msnm (NAS, 1983).

Suelos: la literatura señala que C. equisetifolia crece en un rango amplio de suelos, desde calcáreos y ligeramente salinos, hasta ligeramente ácidos. Posee nódulos radiculares que contienen microorganismos que fijan el nitrógeno del aire. En América Central se le ha cultivado en suelos de los órdenes Alfisol, Ultisol e Inceptisol, con mejor comportamiento en el último. La especie presenta mal desarrollo en suelos pesados muy arcillosos como los Vertisoles (CATIE, 1986). La compactación en suelos sobrepastoreados no permite un buen desarrollo de la especie. En suelos sueltos, poco compactados, aunque con presencia de piedras, la especie se ha desarrollado bien en América Central, como en La Conora, Guatemala. No crece y muere en forma rápida en suelos pesados con drenaje deficiente (CATIE, 1986).

Salinidad: acepta salinidad del suelo y agua subterránea hasta cierto grado, pero su crecimiento se ve

afectado bajo condiciones excesivas de sal y de agua subterránea. Puede desarrollar bien en suelos alcalinos con un pH mayor de 9,5 (Yadav, 1983).

Vientos: posee gran capacidad para colonizar dunas de arena. Sobre el lado de sotavento, donde las condiciones son comparativamente mejores, las ramas más bajas tocan el suelo; en estos puntos se producen lesiones en la corteza debido a la acción dominante del viento y se emiten raíces. En estos puntos de enraizamiento se desarrollan ramas verticales. De esta manera, las ramas horizontales se alargan más de lo normal, firmemente fijadas al suelo en un número de puntos, y las verticales resultan en una masa cubierta de árboles. La reposición y caída periódica de las agujas y su descomposición lenta, dejan al suelo con una capa espesa de hojarasca. Las agujas largas se enredan y enmarañan proveyendo al suelo de un "fieltro" contra el azote del viento. Es una especie ideal para la estabilización de dunas de arena (Kondas, 1983).

2.1.3.2 C. cunninghamiana.

Temperatura: en el área de distribución natural la temperatura promedio máxima del mes más caliente varía entre 25°-40°C y el promedio mínimo entre 0°-15°C. La temperatura promedio anual varía entre 13° y 27°C. Puede soportar hasta 50 heladas por año (CATIE, 1986).

Precipitación: la precipitación varía entre 500 y 1500 mm anuales pero debido a que crece cerca a cursos de agua, la precipitación sola no es indicativa de la humedad disponible. En América Central se ha plantado en sitios con precipitación entre 900 y 2800 mm (CATIE, 1986).

Altitud: en condiciones naturales, la especie crece desde el nivel del mar hasta 1000 msnm. Se le ha

plantado hasta 2200 msnm. En América Central se le ha plantado entre 700 y 1200 msnm (CATIE, 1986).

Suelos: la literatura señala que C. cunninghamiana crece en un rango amplio de suelos, desde limosos de aluvión, hasta gravillosos incluyendo suelos pobres y sitios erodados. Cuando se localiza a la orilla de los ríos las raíces tienen acceso a las aguas corrientes o a nacimientos de la misma (CATIE, 1986).

Salinidad: es menos tolerante a las condiciones de salinidad que la C. equisetifolia (Turnbull, 1986).

Vientos: tolera el viento fuerte, caliente y salino, y su hábito de crecimiento hace aceptable su uso en cortinas rompeviento (Mendonza, 1983). El Cuadro 1 muestra, en forma resumida, los requerimientos ambientales para las dos especies.

2.1.4 Regeneración y producción de las especies C. equisetifolia y C. cunninghamiana.

2.1.4.1 C. equisetifolia.

Regeneración natural: la regeneración natural es factible siempre que no haya mucha competencia de malezas.

En las casuarinas, al fruto múltiple se le reconoce como "fruto" o "cono" y a la sámara como "semilla". Produce aproximadamente 760 000 semillas/kg (Turnbull y Martensz, 1983).

2.1.4.2 C. cunninghamiana.

Regeneración natural: la regeneración natural es abundante. También produce gran cantidad de brotes provenientes de raíces. En América Central no se dispone de experiencias al respecto (CATIE, 1986). Produce

Cuadro 1. Requerimientos ambientales de las especies Casuarina equisetifolia Forst. & Forst. y Casuarina cunninghamiana Miq.

Requerimiento	<i>C. equisetifolia</i>	<i>C. cunninghamiana</i>
Temperatura media anual (°C)	10-33	13-27
Precipitación (mm/año)	700-2000	900-2800
Déficit hídrico* (meses/año)	6-8	4-8
Altitud (msnm)	hasta 2500	hasta 2200
Zona de vida	bs-T a bh-MB	bs-P a bh-T
<u>Suelo</u>		
Profundidad efectiva	moderada a profunda	moderada a profunda
Textura	arenosos a francos	arenosos a franco-arenosos
Compactación	no compactados	no compactados
Drenaje	bueno	bueno
pH	5-9	5-9
Ordenes	Alfisol, Entisol Inceptisol, Ultisol	Alfisol, Entisol Inceptisol, Ultisol

Fuente: Martínez, H. (1987).

* Se refiere al balance hídrico climático, es decir, el número de meses en el cual la lluvia es menor que la evapotranspiración potencial.

aproximadamente 2 000 000 semillas/kg (Turnbull y Martensz, 1983).

2.1.5 Crecimiento de las especies C. equisetifolia y C. cunninghamiana en algunos países tropicales y subtropicales.

2.1.5.1 C. equisetifolia.

El Cuadro 2 muestra el crecimiento de la especie en algunos países tropicales y subtropicales. El análisis de este cuadro muestra que el mayor incremento medio anual en altura (2,8 m/año) lo alcanza la especie en Cauca, Colombia, y el menor (0,8 m/año) en Zambales, Filipinas. Por otro lado, el mayor incremento medio anual en diámetro (4,4 cm/año) lo alcanza la especie en West Bengal, India y el menor (0,8 cm/año) en Zambales, Filipinas.

2.1.5.2 C. cunninghamiana.

El Cuadro 3 muestra el crecimiento de la especie en algunos países tropicales y subtropicales. El análisis de este cuadro muestra que el mayor incremento medio anual en altura y diámetro (2,5 m/año y 3,5 cm/año, respectivamente) lo alcanza la especie en Santiago del Estero, Argentina y el menor (1,1 m/año y 0,6 cm/año, respectivamente) en Piedades Sur, Costa Rica.

2.1.6 Usos de las especies C. equisetifolia y C. cunninghamiana

2.1.6.1 C. equisetifolia.

Es considerada como una de las mejores leñas, con producción de poca ceniza, y tiene un poder calorífico de 20 700 kJ/kg (4 500 kcal/kg) y produce carbón de excepcional calidad (6 522 kcal/kg). Ha sido utilizada en forma directa

aproximadamente 2 000 000 semillas/kg (Turnbull y Martensz, 1983).

2.1.5 Crecimiento de las especies C. equisetifolia y C. cunninghamiana en algunos países tropicales y subtropicales.

2.1.5.1 C. equisetifolia.

El Cuadro 2 muestra el crecimiento de la especie en algunos países tropicales y subtropicales. El análisis de este cuadro muestra que el mayor incremento medio anual en altura (2,8 m/año) lo alcanza la especie en Cauca, Colombia, y el menor (0,8 m/año) en Zambales, Filipinas. Por otro lado, el mayor incremento medio anual en diámetro (4,4 cm/año) lo alcanza la especie en West Bengal, India y el menor (0,8 cm/año) en Zambales, Filipinas.

2.1.5.2 C. cunninghamiana.

El Cuadro 3 muestra el crecimiento de la especie en algunos países tropicales y subtropicales. El análisis de este cuadro muestra que el mayor incremento medio anual en altura y diámetro (2,5 m/año y 3,5 cm/año, respectivamente) lo alcanza la especie en Santiago del Estero, Argentina y el menor (1,1 m/año y 0,6 cm/año, respectivamente) en Piedades Sur, Costa Rica.

2.1.6 Usos de las especies C. equisetifolia y C.

cunninghamiana

2.1.6.1 C. equisetifolia.

Es considerada como una de las mejores leñas, con producción de poca ceniza, y tiene un poder calorífico de 20 700 kJ/kg (4 500 kcal/kg) y produce carbón de excepcional calidad (6 522 kcal/kg). Ha sido utilizada en forma directa

Cuadro 2. Crecimiento de Casuarina equisetifolia Forst. & Forst. en algunos países tropicales y subtropicales.

Sitio	Edad (meses)	Altura (m)	dap* (cm)	h IMA (m/año)	dap IMA (cm/año)
Guangdong, China1/	48	7,5	6,0	1,8	1,5
Zambales, Filipinas2/	36	2,5	2,6	0,8	0,8
Palai, Sri Lanka3/	84	---	26,4	---	3,7
West Bengal, India4/	96	17,0	35,5	2,1	4,4
Costa, Senegal5/	60	8,5	8,0	1,7	1,6
Puri, Orissa6/	60	8,7	5,1	1,7	1,0
Cauca, Colombia7/	36	8,6	9,0	2,8	3,0
Puerto Rico8/	96	15,0	13,0	1,8	1,6
Asia Tropical9/	72	6,0	21,0	1,0	3,5
Conora, Guatemala10/	57	7,0	5,0	1,5	1,0

* diámetro a 1,30 m.

Fuente:

1/ Turnbull, 1986

2/ Halos, 1983

3/ Vivekanandan, 1983

4/ Yadav, 1983

5/ Andéke-Lengui y Dommergues, 1983

6/ Verma et al, 1987

7/ Newman, 1981

8/ Wadsworth, 1960

9/ Letourneux, 1957

10/ CATIE, 1986.

Cuadro 3. Crecimiento de Casuarina cunninghamiana Miq en algunos países tropicales y subtropicales.

Sitio	Edad (meses)	Altura (m)	dap* (cm)	h IMA (m/año)	dap IMA (cm/año)
Valle Arriba, Honduras	19	2,3	1,7	1,4	1,1
Piedades Sur, Cost Rica	19	1,8	0,9	1,1	0,6
Piedades Nor, Cost Rica	24	3,3	2,1	1,7	1,1
Barbacoas, Cost Rica	19	2,8	---	1,8	---
Santiago del Estero Argentina	2/ 48	10	14	2,5	3,5
Zimbabwe	3/ 72	13	13	2,1	2,1
Perú	4/ 168	22	20	1,5	1,4
Hilo, Hawaii	5/ 60	11	11	2,2	2,2

* diámetro a 1,30 m

Fuente:

1/ CATIE, 1986

2/ Mendonza, 1983

3/ Torrey, 1983

4/ Wadsworth, 1960

5/ Yadav, 1983

como combustible de locomotoras. La corteza se usa para la obtención de taninos (contenido 6-8% de taninos) y el follaje puede ser utilizado como forraje. Se ha utilizado para control de erosión en costas y márgenes de ríos. Se utiliza como cortina rompeviento, para restaurar terrenos erodados y como cercos o setos vivos (CATIE, 1986).

La literatura reporta que el turno de la especie es de corto a mediano plazo (5-15 años) y que en los primeros 3-4 años se pueden hacer intervenciones para obtener leña, carbón y otros productos menores como mangos de herramientas, etc. Luego del quinto año, se pueden hacer intervenciones para obtener madera para postes de conducción eléctrica o telefónica, puntales de minas y remos. Para turnos mayores a 10 años, la literatura señala que la madera producida es muy dura, pesada (0,8-0,95 g/cm³) y difícil de aserrar, además, se raja fácilmente.

2.1.6.2 C. cunninghamiana.

Es excelente para leña y se ha usado para la quema en hornos de panadería. La madera tiene una densidad de 0,8-0,9 g/cm³ y se ha usado para cascos, mangos de hachas, yunta de bueyes y tornería ornamental. En Argentina se ha recomendado su uso en entarimado, cajas de empaques, enchapado. Los árboles jóvenes son pastoreados por el ganado en Australia y el follaje es utilizado como forraje en tiempos secos. Se ha sugerido que es tan bueno o mejor que otras especies comúnmente usadas como forraje como Acacia saligna o Prosopis juliflora. El hábito de crecimiento de la especie la hace recomendable para usos ornamentales y para protección del viento, fajas de protección y protección de los bancos de río. También es recomendable para la estabilización de dunas de arena (Turnbull, 1986).

2.2 Parcelas permanentes y parcelas temporales.

2.2.1 Parcelas permanentes. Las parcelas permanentes son unidades de investigación que se establecen para evaluar en forma periódica, y por el turno parcial o completo, el comportamiento de una especie en determinado sitio. A través de la evaluación periódica se busca conocer el desarrollo de la especie con el tiempo. Para conocer con más seguridad el comportamiento de una especie en un área, es necesario montar una red de parcelas en cada una de las distintas condiciones de sitio en que se encuentra creciendo la especie (Salazar, 1989).

2.2.2 Parcelas temporales. Son unidades de investigación que se establecen en forma ocasional y se evalúan solo una vez (Salazar, 1989). Tienen la desventaja que solamente se puede determinar el tamaño actual de los árboles y no su crecimiento.

2.3 Modelos de crecimiento y rendimiento.

2.3.1 Consideraciones. Como el rendimiento de una masa de árboles es muy variable y depende de diversos factores, es imprescindible considerarlos debidamente antes de aplicar modelo alguno de predicción del rendimiento. Según Pandey (1987), los principales factores de los cuales depende el rendimiento son:

a. Capacidad productiva del lugar. Influye tanto en el volumen producido por unidad de superficie como en la edad de incremento medio anual (IMA) máximo. En los lugares más deficientes se necesita más tiempo para alcanzar la edad de culminación del IMA en comparación con los lugares favorables.

b. Densidad de la masa. Es el número de plantas por unidad de superficie. El volumen de producción de una masa completamente poblada es superior al de otra escasamente poblada. La densidad de la masa influye también en la edad de culminación del IMA en un determinado lugar. La utilización de la productividad del lugar es más rápida en las plantaciones de alta densidad que en las de densidad escasa, por lo que el turno para una plantación densa sería más corto.

c. Tratamiento silvícola aplicado. Los tratamientos silvícolas aplicados en el manejo, como la escarda, el laboreo del suelo, el corte de las trepadoras, el aclareo, etc, desempeñan una función importante en la fase inicial de arraigo de las plantaciones, en el tamaño y la calidad de cada árbol producido, y en el rendimiento de la masa forestal. En los últimos años ha despertado especial interés el uso de fertilizantes y de riego en las plantaciones, y cabe prever un mayor rendimiento de madera.

En este documento se utilizan los términos **crecimiento** y **rendimiento**, y al diferenciarlos, se define **crecimiento** como el cambio en tamaño del parámetro durante un período de tiempo definido (también conocido como el incremento), y **rendimiento** como el crecimiento acumulado del parámetro desde edad 0 hasta la edad de evaluación (e.g. dap o área basal a una edad específica).

Segun Hughell (en prensa), la selección entre un modelo de crecimiento o de rendimiento depende principalmente de los objetivos del modelo y del tipo y calidad de los datos. Una consideración a tomar en cuenta es la razón entre el error de medición y la magnitud de los datos. Esta razón es varias veces más alta con datos de incrementos que los datos de rendimiento, ya que el error de medición de los datos tomados en el campo es constante

mientras el valor del incremento es una fracción del valor de rendimiento. En este caso, es necesario descartar la opción de analizar los datos de incrementos (Hughell, en prensa). Es necesario indicar la relación (compatibilidad) que existe entre las ecuaciones de crecimiento y de rendimiento ya que se basan en principios biológicos; la ecuación de crecimiento (e.g. una ecuación para estimar el ICA en diámetro), también define, mediante su integración, una ecuación de rendimiento (e.g. una ecuación para estimar el dap), y que ambas ecuaciones tienen un comportamiento lógico. Asimismo, la ecuación de rendimiento define, mediante su diferenciación, la ecuación de crecimiento.

De acuerdo con Schumacher (1939), el modelo se basa en la hipótesis de que el crecimiento relativo tiene una relación inversa con la edad al cuadrado.

$$d(Y)/d(\text{Edad}) = k \cdot (1/\text{Edad}^2) \quad (1)$$

Donde: Y = biomasa, volumen, dap u otro parámetro de la masa forestal.

$d(Y)/d(\text{Edad})$ = cambio en Y con respecto a la edad

k = constante

El integral con respecto a la edad de la Ecuación 1 produce la ecuación de rendimiento:

$$\ln(Y) = a + b/\text{Edad} \quad (2)$$

Donde a = constante

b = -k

Von Bertalanffy (1957) (Chapman-Richards), propone que el crecimiento es la respuesta de los procesos anabólicos

(de asimilación de biomasa) y catabólicos (de destrucción de biomasa), el cual se representa en el modelo:

$$d(Y)/d(\text{Edad}) = a*Y^m - b*Y \quad (3)$$

La integración de la Ecuación 3 produce la ecuación de rendimiento:

$$Y = A*(1 - e^{-k*\text{Edad}})^{1/(1-m)} \quad (4)$$

$$\text{Donde } A = (a/b)^{1/(1-m)}$$

$$k = b*(1-m)$$

a, b, m = coeficientes estimados por regresión.

2.3.2 Clasificación de modelos de crecimiento. Según Bruce y Wensel (1987), existen dos distinciones entre los modelos del crecimiento forestal:

a. Modelos de procesos. Simulan los procesos biológicos que convierten el CO₂, nutrientes y humedad en biomasa, mediante la fotosíntesis. Son modelos que pueden usar mediciones directas de crecimiento-precipitación temporal, horas de luz y otros detalles. Estos modelos pueden estimar la respuesta con una cantidad diferente de precipitación u otro cambio climático (cuando se añade una medida de aplicación de fertilizante al modelo).

b. Modelos empíricos. Se basan en mediciones periódicas de los árboles, y no hacen ningún intento para describir los factores que puedan afectar el crecimiento.

Este estudio, para la predicción del crecimiento y rendimiento de ambas especies, propone utilizar modelos empíricos ya que está basado en datos de campo, determinísticos, ya que el resultado es una sola respuesta, por integración, ya que determina directamente las condiciones de la masa arbórea sin tener que pasar por las condiciones de los años anteriores, y a nivel de rodal, ya que describen la masa arbórea en términos de promedios (en altura, diámetro, etc) por rodal (Hughell, en prensa).

2.4 Estimación indirecta del índice de sitio

Para estimar el índice de sitio donde todavía no existen árboles o los árboles presentes son demasiado jóvenes, es necesario recurrir a los métodos indirectos. Tales métodos estiman el índice de sitio con base en factores ambientales o de vegetación menor. La estimación indirecta del índice de sitio también es importante para describir el efecto de los factores ambientales sobre el crecimiento de las especies.

Para la estimación indirecta del índice de sitio se realizan correlaciones para seleccionar las variables más relacionadas con el índice de sitio, tomando en cuenta cuales variables son más fáciles de medir en el campo y, al mismo tiempo, evitar colinealidad (autocorrelación) entre las mismas (Hughell, en prensa). Aunque existe una gran cantidad de análisis muy sofisticados, para facilitar el trabajo se utiliza el Programa SAS (Statistical Analysis System) para desarrollar una matriz de correlación entre los índices de sitio y los factores del sitio y definir el grado de relación entre variables, usando las facilidades que ofrece el Centro de Cómputos del CATIE.

El método empírico se hace con base en el desarrollo de un modelo lineal (Hughell, en prensa):

modelo lineal: $IS = c0 + c1*X1 + c2*X2 + c3*X3...$ (5)

Donde: $c0, c1, c2$ = coeficientes estimados por regresión

$X1, X2, X3$ = variables ambientales

El método empírico ha sido utilizado en otros estudios. Navarro (1987), lo utilizó en la evaluación del crecimiento y rendimiento de Rombacopsis quinatum en 14 sitios en Costa Rica. Vásquez (1987), lo aplicó en el desarrollo de índices de sitio y selección de un modelo preliminar de rendimiento para Pinus caribaea en la Reserva Forestal La Yeguada, Panamá. Campos (1989), lo utilizó en la predicción de la productividad de Eucalyptus camaldulensis. Morrobel (1989), lo menciona en su trabajo sobre el comportamiento de Acacia mangium en diferentes sistemas de plantación manejados por pequeños agricultores en Zambrana, Cotuí, República Dominicana. Oliva (1990), lo aplicó en su trabajo sobre el comportamiento en plantación de Acacia mangium y Caesalpinia velutina en América Central.

Hughell (en prensa), al comentar sobre el modelo lineal (Ecuación 5), indica que este modelo supone que la relación entre el índice de sitio y cada variable es lineal y que muchas veces esta suposición no se puede justificar y presenta el ejemplo hipotético de una relación lineal entre el índice de sitio y el pH, y una relación real, donde de acuerdo a la relación lineal, a mayor pH menor crecimiento. Sin embargo, la relación real es tal que hay un ámbito de pH donde la especie crece bien y que bajo o sobre este ámbito el crecimiento es pobre. Comenta dicho autor, que como regla general, se deben tener varias veces el número de observaciones (parcelas) que el número de variables que se están probando y que muy pocas veces es posible cumplir con esta regla.

3. MATERIALES Y METODOS.

3.1 Localización del área de estudio

En América Central existe una red de parcelas permanentes de crecimiento y de ensayos, instaladas en todos los países por los Proyectos LERA (1980-1985) y MADELEÑA (1986-1991), de CATIE-ROCAP, establecidas en colaboración con las instituciones forestales de los países (Hughell, 1990).

Fueron identificadas 74 parcelas de Casuarina equisetifolia y 53 de C. cunninghamiana, con una edad mínima de 3 años, establecidas en América Central. Para este estudio, se utilizaron las plantaciones experimentales de ambas especies. La Figura 1 muestra la localización de las parcelas. En los Cuadros 4 y 5 se presentan algunas características de los sitios.

3.2 Metodología.

3.2.1 Organización de la información

La unidad básica de información para desarrollar los modelos son resúmenes por medición y por parcela, los cuales han sido generados con los datos de mediciones de árboles individuales por el sistema MIRA (Manejo de Información sobre Recursos Arbóreos) del Proyecto Madeleña.

Para analizar el crecimiento de ambas especies, se utilizó la información de campo de 117 mediciones en C. equisetifolia y 86 en C. cunninghamiana, recopilada a partir de 1982 por el personal de los Proyectos LERA y MADELEÑA en América Central, quienes midieron en todos los árboles el

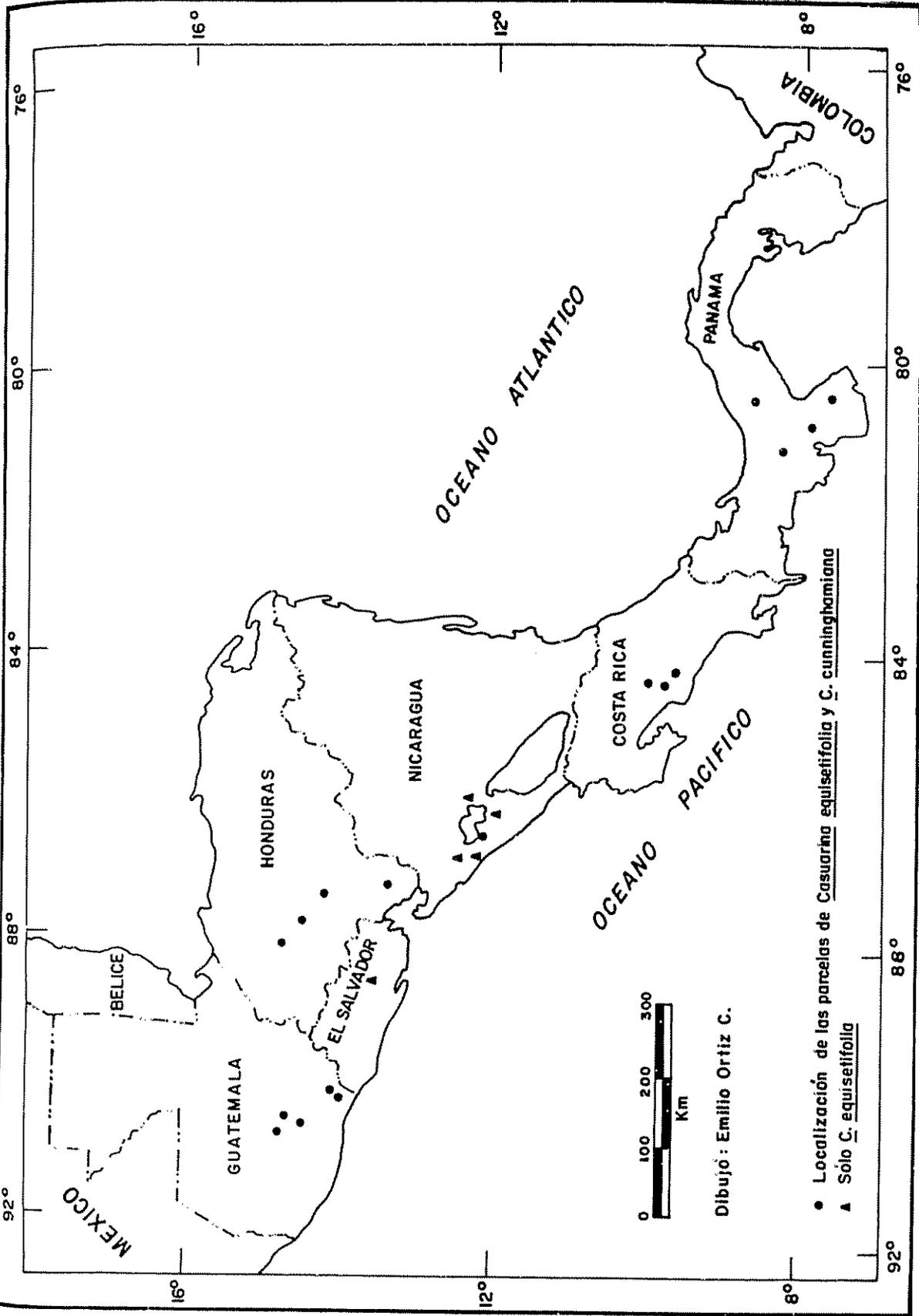


Figura 1. Mape de localización de las parcelas de *Casuarina equisetifolia* Forst. & Forst. y *Casuarina cunninghamiana* Miq en América Central. (Tomado de CATIE, 1986).

Cuadro 4. Ubicación de los ensayos y parcelas de Casuarina equisetifolia Forst.& Forst. en América Central.

No	Código de parcela(*)	Sitio	País (**)	Area de parcela (m ²)	Arboles parcela
1	CR045L17	443	CR	196	49
2	CR045L32	443	CR	196	49
3	CR070L44	453	CR	196	49
4	CR083L64	734	CR	196	49
5	CR181L42	747	CR	324	81
6	GT016L44	503	GT	100	25
7	GT016L51	503	GT	100	25
8	GT016L65	503	GT	100	25
9	GT035L67	602	GT	196	49
10	GT035L68	602	GT	196	49
11	GT035L91	602	GT	196	49
12	GT035L92	602	GT	196	49
13	GT036L69	602	GT	196	49
14	GT036L70	602	GT	196	49
15	GT036L93	602	GT	196	49
16	GT036L94	602	GT	196	49
17	HN048L05	108	HN	54	24
18	HN048L15	108	HN	54	24
19	HN048L25	108	HN	54	24
20	HN048L42	108	HN	54	24
21	HN048L52	108	HN	54	24
22	HN048L62	108	HN	54	24
23	HN048L72	108	HN	54	24
24	HN048L95	108	HN	54	24
25	HN119L02	163	HN	36	9
26	HN119L09	163	HN	36	9
27	HN119L16	163	HN	36	9
28	HN119L23	163	HN	36	9
29	HN119L30	163	HN	36	9
30	HN119L95	163	HN	36	9
31	NI026L03	109	NI	100	25
32	NI026L74	109	NI	100	25
33	NI032L13	209	NI	100	25
34	NI032L42	209	NI	100	25
35	NI033L55	516	NI	100	25
36	NI033L84	516	NI	100	25
37	NI056L00	210	NI	196	49
38	NI056L29	210	NI	196	49

(*) ID = Código de país + código de experimento + las dos últimas cifras del número serial de la parcela (sistema MIRA).

(**) CR = Costa Rica HN = Honduras
 GT = Guatemala NI = Nicaragua

Cuadro 5. Ubicación de los ensayos y parcelas de Casuarina cunninghamiana Miq en América Central.

No	Código de parcela(*)	Sitio	País (**)	Area de parcela (m ²)	Arboles parcela
1	CR043L15	721	CR	50	25
2	CR070L59	453	CR	196	49
3	CR071L51	454	CR	196	49
4	CR079L04	735	CR	196	49
5	CR137L00	454	CR	100	16
6	CR137L04	454	CR	100	16
7	CR137L06	454	CR	100	16
8	CR137L89	454	CR	100	16
9	CR137L92	454	CR	100	16
10	CR137L96	454	CR	100	16
11	CR137L99	454	CR	100	16
12	GT123L52	520	GT	64	16
13	HN047L12	107	HN	54	24
14	HN047L24	107	HN	54	24
15	HN047L67	107	HN	54	24
16	HN047L79	107	HN	54	24
17	HN048L06	108	HN	54	24
18	HN048L26	108	HN	54	24
19	HN048L53	108	HN	54	24
20	HN048L73	108	HN	54	24
21	HN061L30	119	HN	265	52
22	HN061L67	119	HN	265	52
23	HN112L45	112	HN	240	50
24	HN119L17	163	HN	36	9
25	HN119L31	163	HN	36	9
26	HN122L94	132	HN	204	50
27	PA076L42	205	PA	80	20
28	PA076L51	205	PA	80	20

(*) ID = Código de país + código de experimento + las dos últimas cifras del número serial de la parcela (sistema MIRA).

(**) CR = Costa Rica HN = Honduras
 GT = Guatemala PA = Panamá

diámetro a la altura del pecho (dap) y la altura total, considerándose esta última como la distancia desde el suelo hasta la yema terminal o lateral más alta.

Como en ambas especies se observa poca bifurcación, y para tener un parámetro de crecimiento diamétrico de comparación entre las parcelas que tuvieron diferentes números de ejes por cada árbol, se utiliza el diámetro cuadrático medio (dcm) por árbol (Ecuación 6). El dcm representa el diámetro del árbol con el área basal promedio del mismo.

$$\text{diámetro cuadrático medio} = \sqrt{\frac{\sum \text{dap}_{i,j}^2}{n_{\text{árbol}}}} \quad (6)$$

Para parcelas con árboles de un solo eje el dcm de la parcela es igual que el diámetro geométrico (Dg) de la parcela. En este estudio, se utiliza el término "dap" para referirse a este parámetro ya que la mayoría de árboles de las parcelas estudiadas tuvieron un solo eje. El Anexo 1 muestra los formularios empleados para obtener la información de campo los cuales fueron desarrollados por MADELEIRA.

Para depurar los datos originales, luego de generar el archivo de resúmenes de cada medición por parcela, se graficó con el paquete Lotus 123, los datos de cada variable contra la edad. Esto se hizo con la finalidad de evaluar la cobertura de los diferentes parámetros del rodal y para identificar las inconsistencias en los datos. De esta manera, se eliminaron las mediciones con menos de 12 meses de edad, las parcelas sin mediciones mayores de 36 meses, parcelas con condiciones sobrerrepresentadas en la muestra, parcelas bajo condiciones extremas no bien representadas en

la muestra y datos de parcelas con una sola medición. Es así como de las 74 parcelas originales de Casuarina equisetifolia y de las 53 de Casuarina cunninghamiana, en este trabajo, y luego de hacer varias depuraciones, solo se trabajó con 38 y 28 parcelas de ambas especies, respectivamente.

3.2.2 Uso y evaluación de la serie de ecuaciones presentadas

En este estudio, las ecuaciones presentadas se desarrollan con base en datos de parcelas de crecimiento (información empírica) y conocimientos biológicos del crecimiento de las especies (procesos lógicos del sistema), que estiman el valor de un parámetro de la masa arbórea, como la altura, el diámetro, la biomasa o el incremento en biomasa. Es necesario mencionar, que para tener una idea clara sobre el uso y evaluación de la serie de ecuaciones presentadas en este estudio, se tomaron en cuenta las siguientes consideraciones:

1. Coeficiente de determinación (R^2)

Este coeficiente indica el porcentaje de la variación en la variable dependiente descrito por el modelo, y, ayuda a comparar diferentes modelos con la misma variable dependiente.

2. Error estándar

El error estándar es importante como indicación de la significancia de cada coeficiente la cual se puede determinar mediante una prueba de t.

3. Análisis de residuales

Este análisis ayuda a determinar si los residuales de la regresión están o no correlacionados, normalmente distribuidos y si tienen varianza uniforme. Es importante graficar los residuos para asegurar una dispersión aleatoria alrededor de la línea de regresión.

3.2.3 Estimación de la producción en volumen y biomasa de árboles individuales.

Con base a aprovechamientos realizados por personal del proyecto MADELEÑA, se evaluó la producción de la especie C. equisetifolia en términos de biomasa seca y volumen del fuste. El análisis de biomasa se llevó a cabo con base a cuatro aprovechamientos (1 en Honduras, 1 en Guatemala, 1 en El Salvador y 1 en Costa Rica) de 3, 132, 18 y 9 árboles cada uno y 78, 107, 64 y 117 meses de edad respectivamente.

A cada árbol aprovechado se le midió la altura total, el dap y peso verde, determinándose el peso del fuste (diámetro mínimo de 5 cm), el peso verde de las ramas (diámetro mínimo de 2 cm) y del follaje por separado. El peso verde de cada sección del árbol se tomó directamente en el campo, con una balanza graduada en décimos de kilogramo usando la metodología descrita por MADELEÑA.

Para determinar el contenido de humedad de los árboles aprovechados, se muestrearon 3 árboles en el aprovechamiento de Honduras, 12 en el de Guatemala y 9 en el de Costa Rica. En cada uno se tomó en el campo una muestra de aproximadamente 300 g de materia fresca de los componentes fuste, ramas y follaje. Las muestras fueron pesadas y luego secadas al horno durante 72 horas a 80°C hasta peso constante. Por diferencia, se obtuvo el contenido de humedad

promedio para el fuste, las ramas y el follaje y los datos de biomasa seca.

Para determinar el volumen fueron cubicados los fustes de los árboles aprovechados en Guatemala; para ello se utilizó el formulario de tríos de MADEIRA (Anexo 1). Para la estimación del volumen y la producción de biomasa aérea seca por árbol se utilizó el paquete estadístico PSP (Palmer Statistical Package). Este paquete prueba simultáneamente 15 modelos matemáticos para predecir la producción en función del diámetro y la altura. Con base en los modelos seleccionados se desarrollaron tablas de volumen y producción de biomasa seca por árbol.

Para estimar la producción por árbol se utilizó información solo de C. equisetifolia ya que para la otra especie no existió la posibilidad de obtener datos de aprovechamientos. Se utilizó, para la estimación del volumen y biomasa seca en función del diámetro y la altura, una ecuación que se ajusta a los datos de las dos especies y ayuda a evitar problemas de heterogeneidad de varianza.

El Cuadro 4 presenta las parcelas de C. equisetifolia utilizadas para los análisis de crecimiento en diámetro y altura y, el Cuadro 5 las de C. cunninghamiana.

3.2.4 Estimación directa del índice de sitio.

El índice de sitio (IS) representa el potencial de la especie de crecer en diferentes sitios y, como norma, se define como la altura dominante que tiene o tendría un rodal a una edad base. En este caso la altura dominante se define como la altura promedio de los cien árboles más grandes por hectárea (Alder, 1980).

En este estudio se seleccionó una edad base de 5 años por estar bien representada en las observaciones de campo.

Esta edad base va de acuerdo con las edades base utilizadas en otros estudios similares (Hughell, 1990). Para C. equisetifolia se emplearon datos de 38 parcelas con edades que van de 12 a 106 meses y para C. cunninghamiana datos de 28 parcelas con edades que van de 12 a 80 meses (Cuadros 4 y 5).

Para desarrollar una ecuación que estime el IS con base en la edad y altura dominante se aplicó el método de la curva guía usando la ecuación de Schumacher (Alder, 1980):

$$\ln (H_{dom}) = a + b/(edad)^k \quad (7)$$

Donde H_{dom} = altura dominante (m)

\ln = logaritmo natural

a , b y k = coeficientes estimados por la regresión

edad = edad de las parcelas (meses)

Para obtener un ajuste superior se utilizó la regresión jerárquica y el Programa Regjer.Prg (Hughell, en prensa) en los datos de parcelas con varias mediciones. En esta regresión, la variación en altura entre las parcelas está incluida en el análisis, y por lo tanto, no entra como variación de error. Luego se aplicó el método de la curva guía para describir una familia de curvas de diferentes IS. Según este método, existen dos modelos para describir la familia de curvas de IS: el modelo a común y el modelo b común, los cuales describen familias de curvas polimórficas y anamórficas, respectivamente. Esta metodología ha sido descrita y utilizada por Alder (1980) y Hughell (1990).

Ambos modelos permiten estimar el IS con base en una altura dominante (H_d) dada (Ecuaciones 8 y 10), o estimar la

altura dominante con base en un IS dado (Ecuaciones 9 y 11) (Hughell, en prensa).

a común:

$$\ln (IS) = a + (edad/edad\ base)^k * [\ln(Hdom) - a] \quad (8)$$

$$\ln (Hdom) = a + (edad\ base/edad)^k * [\ln(IS) - a] \quad (9)$$

b común:

$$\ln (IS) = \ln(Hdom) + b * (1/edad\ base^k - 1/edad^k) \quad (10)$$

$$\ln (Hdom) = \ln(IS) + b * (1/edad^k - 1/edad\ base^k) \quad (11)$$

Donde: IS = índice de sitio (m)

Hdom = altura dominante (m)

ln = logaritmo natural

edad = edad de las parcelas (meses)

edad base = edad base para calcular el índice de sitio

a, b y k = coeficientes estimados por la regresión

La selección del modelo con mejor ajuste está basada en la suposición de que, el IS es una característica del sitio y de la especie, y que no cambia con la edad de la parcela. De esta manera, es posible comparar la diferencia entre los valores de IS calculados por la medición, contra los calculados por la parcela (con la edad más cercana a la edad base) para ambos modelos (aplicando las Ecuaciones 8 y 10) (Hughell, en prensa).

Dentro del método de la curva guía se seleccionó el modelo a común (Ecuación 8), por ser el que minimiza la diferencia entre los IS calculado para diferentes edades de

medición de la misma parcela (Hughell, 1990). Además, el modelo a común ha sido utilizado con éxito en otros estudios similares en América Central. Oliva (1990), lo utilizó para Acacia mangium y Caesalpinia velutina, y Hughell (1990), para Eucalyptus camaldulensis, Gliciridia sepium, Guazuma ulmitolia y Leucaena leucocephala con buenos resultados.

3.2.5 Correlación entre el índice de sitio y los factores ambientales

Con los resultados del análisis de suelo y factores ambientales de los sitios, a través de las matrices de correlación y los coeficientes encontrados, se identificaron algunos factores que influyen en el crecimiento de la especie Casuarina equisetifolia.

Para obtener las características del suelo, se usó el estudio de suelos que el Proyecto MADELEÑA realizó en 29 sitios para la especie C. equisetifolia (Anexo 2). El muestreo de suelos y la interpretación de las calicatas se realizó por horizonte en algunas calicatas y por profundidades en otras. Los datos de suelos, sitio y clima están grabados dentro del sistema MIRA.

Debido a la diversidad de horizontes y profundidades de las muestras en C. equisetifolia, se uniformizaron los resultados a una sola profundidad (0-40 cm). Con respecto a las variables climáticas y físicas se consideró la altitud (msnm), pendiente (%), temperatura media anual (°C), precipitación media anual (mm) y número de meses secos (precipitación menor a 100 mm).

En los análisis de suelo se determinó el contenido:

arcilla	(en porcentaje),
aluminio (Al)	(en meq/100 ml de suelo),

potasio intercambiable (KI) (en meq/100 ml de suelo),

fosforo (P) (en ppm),

capacidad de intercambio catiónico (CIC) (en meq/100 ml de suelo),

materia orgánica (MO) (en porcentaje) y

pH

3.2.6 Ecuaciones para estimar los parámetros de la masa forestal

Modelo a nivel de rodal

La información manejada por el modelo seleccionado es a nivel de rodal, en la cual se describe la masa arbórea en términos de promedios por rodal.

Se selecciona una serie de ecuaciones que describen el desarrollo de la masa y se ajustan a los datos de las dos especies.

Número de árboles/ha.

Utilizando la metodología de Hughell (en prensa), se procedió a estimar la densidad actual (N_{actual}) con base en la edad y densidad inicial ($N_{inicial}$).

$$N_{actual} = f(N_{inicial}, IS, edad \dots) \quad (12)$$

Donde IS = índice de sitio

$N_{inicial}$ = densidad inicial (árboles/ha)

N_{actual} = densidad actual (árboles/ha)

Altura media y diámetro

Después de evaluar diferentes modelos para estimar la altura media (h) y el diámetro (dap) con base en la edad y el IS, se utilizó una ecuación que se ajusta a los datos de las dos especies.

3.2.7 Incorporación de la serie de ecuaciones al modelo global y confección de tablas de rendimiento

El último paso en la metodología para construir el modelo para predecir el crecimiento y rendimiento es incorporar todas las ecuaciones al modelo global. En este caso, se utilizó también la metodología desarrollada por Hughell (en prensa) quien diseñó una hoja electrónica (con el paquete de computación "Lotus 123") que contiene las ecuaciones, las condiciones iniciales (IS y densidad) y la tabla de rendimiento. Esta hoja electrónica permite al usuario seleccionar las condiciones iniciales, recalcular una nueva tabla de acuerdo con estas condiciones, y también permite graficar los datos de la tabla.

3.2.8 Verificación del modelo

Según Bruce y Wensel (1988), se define la verificación como una comprobación del modelo con los mismos datos que fueron utilizados para construirlo, y se define validación como una comprobación del modelo con un grupo de datos independientes. En este estudio, los modelos solamente fueron verificados, debido al número limitado de observaciones. Esta comprobación consiste en una comparación entre los valores calculados por el modelo y los valores observados para cada medición. En este caso, para realizar las evaluaciones se utilizó la metodología desarrollada por Hughell (en prensa), quien diseñó una hoja electrónica con Lotus 123 (Anexos 3 y 4), la cual para cada medición estima

con el modelo los parámetros del rodal N_{actual} , dap, altura y producción (volumen o biomasa) y calcula la diferencia entre el valor observado (valor real) y este valor calculado.

Las estadísticas que resumen la verificación de los modelos son el número de mediciones analizadas, el promedio de las diferencias, la desviación estándar de las diferencias, y el coeficiente de variación (cv) con base en el valor medio observado (Ecuación 13).

$$cv = \frac{\text{desviación estándar de la diferencia}}{\text{promedio del observado}} \quad (13)$$

El valor del promedio de las diferencias indica si existe un sesgo (una tendencia a sub o sobreestimar los valores observados) en los valores calculados con el modelo. Con una muestra representativa este estadístico casi siempre es cero o muy cercano a ello, ya que se utilizan regresiones de mínimos cuadrados para construir el modelo. La desviación estándar representa la dispersión o precisión de las predicciones de las parcelas individuales alrededor del promedio. El coeficiente de variación representa la misma precisión o dispersión, pero en relación con el promedio de los valores observados. Este valor es útil para comparar la precisión de predecir entre diferentes parámetros del modelo o para comparar diferentes modelos (Hughell, en prensa).

4. RESULTADOS Y DISCUSION

En esta parte se presenta por separado los resultados para cada una de las especies, se discuten los resultados en conjunto y, posteriormente se compara con los resultados de especies similares de Arboles de Uso Múltiple en la región.

4.1 Casuarina equisetifolia

El Cuadro 6 presenta el rango de las variables depuradas incluídas en los resúmenes por medición por parcela de la especie en América Central.

El Cuadro 6 muestra que la edad promedio incluída en estos resúmenes por medición por parcela es de tres años, lo cual indica que las parcelas son muy jóvenes. Tanto la densidad inicial como la actual y el número de ejes son muy similares, esto indica que la mortalidad fué baja (19%), y que la especie usualmente presenta solo un eje por árbol. La especie presenta un crecimiento promedio en diámetro de 1,3 cm/año y en altura media de 1,5 m/año; asimismo, se observa una altura dominante promedio de 6,3 m.

4.1.1 Estimación de la producción en volumen y biomasa de árboles individuales.

Con base al aprovechamiento de los árboles, efectuado en Honduras, Guatemala, El Salvador y Costa Rica, se estimó la producción en volumen y biomasa, en función del diámetro y la altura, y se utilizó el modelo logarítmico (Ecuación 14).

Cuadro 6. Ambito de las variables incluidas para los resúmenes por medición para las parcelas de Casuarina equisetifolia Forst. & Forst. en América Central.

Variable	Promedio	Ambito	
		Mínimo	Máximo
Edad (meses)	36,5	12	106
N _{inicial} (n/ha)	2898	1600	4444
N _{actual} (n/ha)	2390	278	4444
N _{seca} (n/ha)	2525	278	5000
Supervivencia (%)	81	60	100
dap (cm)	4,0	1,2	11,1
Altura (m)	4,7	0,8	11,5
Altura dominante (m)	6,2	1,3	14,1
Indice de sitio (m)	10,4	4,6	14,0

$$\ln(W) = a + b \cdot \ln(dap) + c \cdot \ln(h) \quad (14)$$

Donde: W = volumen (m^3) o peso de biomasa seca (kg)

dap = diámetro a la altura del pecho (cm)

h = altura total (m)

\ln = logaritmo natural

a , b y c = coeficientes estimados por la regresión.

Se seleccionó este modelo por ser el que mejor se ajusta a los datos de las dos especies, es un modelo que ayuda a evitar problemas de heterogeneidad de varianza, y ha sido utilizado con éxito en otros estudios similares (Hughell, en prensa).

El Cuadro 7 presenta el ámbito de diámetros (dap) y alturas utilizado en el desarrollo de los modelos de volumen con y sin corteza, por árbol, peso de biomasa total y peso de leña. El uso de los modelos y las tablas de producción presentados en este documento se deben limitar al rango de diámetros y alturas utilizados para la construcción de los mismos y no pueden ser aplicados fuera de este rango.

El Cuadro 8 presenta los coeficientes de regresión correspondientes al ajuste de estos modelos para los volúmenes totales con y sin corteza, la producción de biomasa seca total (fuste+ramas+follaje) y la producción de biomasa leñosa seca (fuste+ramas). Con la aplicación de estos modelos, se confeccionaron las tablas de producción de volumen y peso de biomasa, que se presentan en los Cuadros 9, 10, 11 y 12. En este caso, los coeficientes de determinación resultaron altos, superiores al 0,97 para los volúmenes y al 0,94 para los pesos secos de la biomasa.

Cuadro 7. Ambito de diámetros y alturas de los datos de árboles individuales utilizados para desarrollar las ecuaciones para estimar el volumen, biomasa total y peso de leña de Casuarina equisetifolia Forst. & Forst. en América Central.

Modelo	Variable	Promedio	Ambito	
			Mínimo	Máximo
Volumenes (con y sin corteza)	dap (cm)	8,3	2,4	14,1
	altura (m)	12,1	4,2	16,9
Pesos (biomasa total y biomasa leñosa)	dap (cm)	8,9	2,1	18,1
	altura (m)	12,0	3,0	22,0

Cuadro 8 . Coeficientes de regresión y determinación de los modelos para estimar la producción por árbol de Casuarina equisetifolia Forst. & Forst. en América Central.

Tipo de producción estimada	n	a	b	c	R ²
<u>$\ln(W) = a + b*\ln(dap) + c*\ln(h)$</u> (14)					
Vol total con corteza	96	-9,0882	1,5402 (0,1055)*	0,9755 (0,1466)	0,97
Vol total sin corteza	96	-9,2112	1,5547 (0,1104)	0,9738 (0,1533)	0,97
Peso seco de biomasa total	126	-1,2425	1,8593 (0,0696)	0,2275 (0,1004)	0,94
Peso seco biomasa leñosa	126	-1,3471	1,6990 (0,0689)	0,3949 (0,0994)	0,94

W = volumen por árbol (m³) o peso de biomasa seca por árbol (kg)

dap = diámetro a la altura del pecho (cm)

h = altura total (m)

ln = logaritmo natural

a, b y c = coeficientes estimados por la regresión

R² = coeficiente de determinación

n = número de observaciones

* Los valores entre paréntesis corresponden al error estándar del coeficiente.

Cuadro 9. Tabla de volumen total con corteza por árbol de Casuarina equisetifolia Forst. & Forst. en América Central.

dap (cm)	Altura (m)				
	4	6	8	10	12
	Volumen total con corteza por árbol (m ³)				
4	0,003	0,005			
6	0,007	0,010	0,013		
8	0,010	0,016	0,021	0,026	0,031
10		0,022	0,030	0,037	0,044
12			0,039	0,049	

Cuadro 10. Tabla de volumen total sin corteza por árbol de Casuarina equisetifolia Forst. & Forst. en América Central.

dap (cm)	Altura (m)				
	4	6	8	10	12
	Volumen total sin corteza por árbol (m ³)				
4	0,003	0,005			
6	0,006	0,009	0,012		
8	0,009	0,014	0,019	0,024	0,028
10		0,020	0,027	0,034	0,040
12			0,036	0,045	

Cuadro 11. Tabla de producción de biomasa seca total por árbol (fuste+ramas+follaje) de Casuarina equisetifolia Forst. & Forst. en América Central.

dap (cm)	Altura (m)				
	4	6	8	10	12
	Biomasa seca total por árbol (kg)				
4	5,3	5,8			
6	11,3	12,4	13,2		
8	19,3	21,2	22,6	23,8	24,8
10		32,1	34,3	36,0	37,6
12			48,1	50,6	52,7

Cuadro 12. Tabla de producción de leña seca por árbol
(fuste+ramas) de Casuarina equisetifolia
Forst. & Forst. en América Central.

dap (cm)	Altura (m)				
	4	6	8	10	12
	Leña seca por árbol (kg)				
4	4,8	5,6			
6	9,6	11,3	12,6		
8	15,7	18,4	20,6	22,6	24,2
10		26,9	30,2	33,0	35,4
12			41,2	45,0	48,3

4.1.2 Estimación directa del índice de sitio

Para estimar el IS con base en la edad y altura dominante, se utilizó el método de la curva guía con la ecuación de Schumacher (Ecuación 7). Dentro del método de la curva guía se seleccionó el modelo a común (Ecuación 8) para estimar los IS.

La edad base utilizada fué de 5 años. El Cuadro 13 presenta los valores de los coeficientes a, b y k para *C. equisetifolia* estimados por la regresión. El Anexo 5 presenta los IS para cada parcela.

La Figura 2 muestra las tres curvas de IS de 11, 9 y 7 m para la edad base de 5 años para *C. equisetifolia* y los datos de resúmenes por medición de 38 parcelas permanentes. Estos valores de IS fueron seleccionados para representar sitios muy buenos, buenos y regulares, con relación a los estudiados.

4.1.3 Correlación entre el índice de sitio y los factores ambientales

El Cuadro 14 presenta la matriz de correlación entre los IS y los factores del sitio, con base en 13 observaciones. Es necesario indicar que estos son los factores que influyen en el crecimiento de la especie y que la matriz presenta los resultados con base en muy pocas observaciones. El resto de los datos analizados están en el Anexo 2.

La literatura indica que la especie puede crecer bien hasta los 2500 msnm y en un rango amplio de pH, desde ligeramente básicos hasta ligeramente ácidos. En este estudio, se encontró a la especie plantada entre los 0 a 1350 msnm y en un rango de pH de 4,7 a 7,3, por lo que, bajo estas condiciones, no presenta problemas mayores de adaptación.

Cuadro 13. Valores de los coeficientes para estimar el índice de sitio de las parcelas de Casuarina equisetifolia Forst. & Forst. en América Central.

Coeficiente	<u>Casuarina equisetifolia</u>
<u>$\ln(IS) = a + (edad/edad\ base)^k [\ln(Hdom) - a]$ (8)</u>	
a	6,1059
b	-8,8431
k	0,2000
R ²	0,91
n	117

IS = índice de sitio (m)
Hdom= altura dominante (m)
ln= logaritmo natural
edad= edad de las parcelas (meses)
edad base= edad base para calcular el índice de sitio
a, b y k= coeficientes estimados por la regresión
R²= coeficiente de determinación
n= número de observaciones.

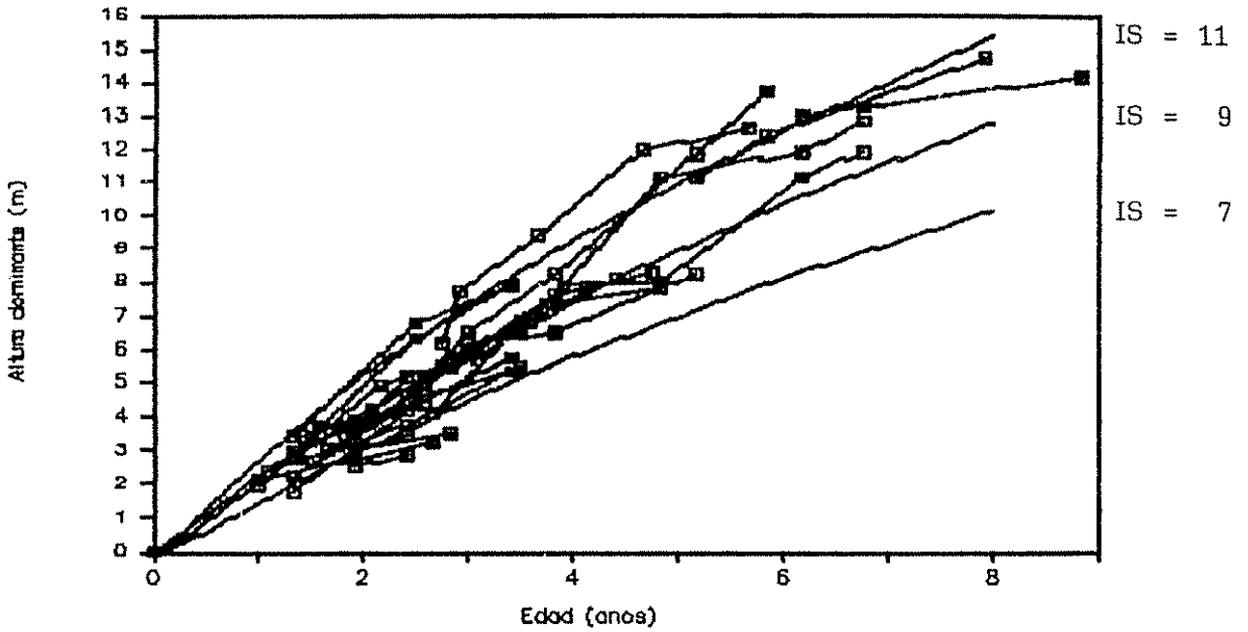


Figura 2. Curvas de índice de sitio de 11, 9 y 7 m a la edad base de 5 años para *Casuarina equisetifolia* Forst. & Forst. y los datos de resúmenes por medición de 38 parcelas permanentes.

Cuadro 14. Matriz de correlación de los factores del sitio con el índice de sitio de los factores que influyen en el crecimiento de Casuarina equisetifolia Forst. & Forst. en América Central.

Factores	IS	pH	Al	KI	Altitud
IS	1,00 (0,00)*				
pH	0,56 (0,04)	1,00 (0,00)			
Al	-0,20 (0,50)	-0,48 (0,09)	1,00 (0,00)		
KI	0,36 (0,22)	0,78 (0,00)	-0,19 (0,52)	1,00 (0,00)	
Altitud	-0,53 (0,06)	-0,56 (0,04)	-0,12 (0,67)	-0,58 (0,03)	1,00 (0,00)

n = 13

IS = índice de sitio

Al = aluminio

KI = potasio intercambiable.

* Los valores entre paréntesis se refieren al nivel de significación.

No se presenta un modelo matemático para estimar el IS en función de los factores del sitio debido a que en este estudio solamente se contó con 13 observaciones.

4.1.4 Ecuaciones para estimar los parámetros de la masa forestal

Número de árboles/ha.

En este estudio, no se observó la condición de autoraleo en las parcelas estudiadas y esto puede ser consecuencia de que no presentan una densidad de plantación bastante alta. Considerando que con un buen manejo la mortalidad es muy poca, la cual ocurre principalmente durante el primer año, se aplicó en el primer año la supervivencia promedio de las parcelas analizadas (Hughell, en prensa).

Se utilizó la supervivencia promedio para las 38 parcelas de C. equisetifolia, que fue de 81%, se dejó constante para los demás años y se seleccionó la Ecuación 15 porque presenta un buen ajuste a los datos y ha sido utilizada en otros estudios similares.

$$N_{\text{primer año}} = a * N_{\text{inicial}} \quad (15)$$

Donde a es el promedio de supervivencia.

$$a = 0,81$$

Altura media y diámetro

Para estimar la altura media y el diámetro, fueron seleccionados los modelos logarítmicos (Ecuaciones 16 y 17) porque presentaron un comportamiento lógico para la estimación de la altura media y el diámetro. Además, estos modelos facilitan el cálculo de los valores de los coeficientes a , b y c mediante una regresión múltiple. En las parcelas de estudio, y debido a que son muy jóvenes, las

ecuaciones seleccionadas describen el fenómeno biológico de crecimiento solo en la etapa de crecimiento rápido. Es necesario indicar que no se pueden utilizar estas ecuaciones de rendimiento para describir el crecimiento. Además, cabe mencionar que se probaron varios modelos y que, un modelo lógico y de amplio uso en otros estudios similares (Chapman-Richards), no presentó un buen ajuste a los datos.

$$\ln(H) = a+b*\ln(edad)+c*\ln(IS) \quad (16)$$

$$\ln(dap) = a+b*\ln(edad)+c*\ln(IS) \quad (17)$$

Donde: H = altura media (m)

dap = diámetro a la altura del pecho (cm)

IS = índice de sitio (m)

edad = edad de las plantaciones (meses)

a, b y c = coeficientes estimados por la regresión

ln = logaritmo natural

Los coeficientes de regresión, de determinación, errores estándar y número de observaciones de dichos modelos, se presentan en el Cuadro 15.

4.1.5 Tablas de rendimiento

El Cuadro 16 presenta la serie de ecuaciones que comprende el modelo global para predecir el crecimiento y rendimiento de C. equisetifolia en América Central. En este caso, se presentan los coeficientes de regresión encontrados con sus respectivos errores estándar, así como los coeficientes de determinación (R^2) y el número de observaciones.

Tomando como base los modelos desarrollados para estimar el crecimiento y la producción, fueron elaboradas

Cuadro 15. Ecuaciones utilizadas para estimar la altura media y el diámetro de Casuarina equisetifolia Forst. & Forst. en América Central.

Parámetro	Ecuación
	<u>$\ln(h)=a+b*\ln(edad)+c*\ln(IS)$</u> (16)
Estimación de la altura media (m)	$a=-3,1381$ (0,2374)* $R^2=0,84$ $b=0,9171$ (0,0471) $n=117$ $c=0,5948$ (0,1157)
	<u>$\ln(dap)=a+b*\ln(edad)+c*\ln(IS)$</u> (17)
Estimación del dap (cm)	$a=-2,9867$ (0,3025) $R^2=0,76$ $b=0,9331$ (0,0610) $n=117$ $c=0,4218$ (0,1491)

h= altura media (m)

dap= diámetro a la altura del pecho (cm)

ln= logaritmo natural

edad= edad de las parcelas

IS= índice de sitio

a, b y c= coeficientes estimados por la regresión.

R^2 = coeficiente de determinación

n= número de observaciones

* El valor en paréntesis es el error estándar del coeficiente

Cuadro 16. Serie de ecuaciones que comprende el modelo global para predecir el crecimiento y rendimiento de Casuarina equisetifolia Forst. & Forst. en América Central.

Parámetro	Ecuación
Estimación del índice de sitio (modelo "a común")	$\ln(IS) = a + [\ln(Hdom) - a] * (edad / edad\ base)^k$ $a = 6,1059 \quad edad\ base = 60\ meses$ $b = -8,8431 \quad R^2 = 0,91$ $k = 0,2 \quad n = 117$
Estimación del número de árboles por hectárea (N_{actual})	$N_{actual} = a * N_{inicial}$ $a = 0,81$
Estimación de la altura media (m)	$\ln(h) = a + b * \ln(edad) + c * \ln(IS)$ $a = -3,1381 \quad (0,2374) * \quad R^2 = 0,84$ $b = 0,9171 \quad (0,0471) \quad n = 117$ $c = 0,5948 \quad (0,1157)$
Estimación del dap (cm)	$\ln(dap) = a + b * \ln(edad) + c * \ln(IS)$ $a = -2,9867 \quad (0,3025) \quad R^2 = 0,76$ $b = 0,9331 \quad (0,0610) \quad n = 117$ $c = 0,4218 \quad (0,1491)$
Estimación del volumen con corteza (m^3/ha)	$\ln(W) = a + b * \ln(dap) + c * \ln(h)$ $a = -9,0882 \quad R^2 = 0,97$ $b = 1,5402 \quad (0,1055) \quad n = 96$ $c = 0,9755 \quad (0,1466)$
Estimación del peso seco de leña (tm/ha)	$\ln(PSL) = a + b * \ln(dap) + c * \ln(h)$ $a = -1,3471 \quad R^2 = 0,94$ $b = 1,6990 \quad (0,0689) \quad n = 126$ $c = 0,3949 \quad (0,0994)$

* El valor en paréntesis es el error estándar del coeficiente

tablas de rendimiento para C. equisetifolia; dichas tablas fueron hechas para 6 años de edad ya que solamente estas edades están bien representadas en la muestra de datos (Figura 2).

Las tablas fueron confeccionadas para una densidad (2500 árboles/ha), por ser la más representada en todas las parcelas, y para los IS 11, 9 y 7 m.

El Cuadro 17 muestra las tablas de rendimiento en volumen (m^3/ha) y leña seca (tm/ha) para C. equisetifolia en América Central. Las Figuras 3, 4, 5 y 6 muestran las curvas de crecimiento en diámetro, altura media y los rendimientos en volumen y peso seco de leña para tres IS (11, 9 y 7 m) y densidades de plantación de 2500 árboles/ha de C. equisetifolia.

4.1.6 Verificación del modelo

El Cuadro 18 presenta los resultados de la verificación del modelo global de predicción del crecimiento y rendimiento para C. equisetifolia. La verificación se realizó con los datos utilizados para la construcción del modelo y las estadísticas corresponden a la diferencia entre el valor observado (real) y el valor calculado (o predicho) con el modelo.

En este caso, la precisión para estimar el crecimiento de parcelas individuales es adecuada, ya que los coeficientes de variación (cv) de 22 a 31% son aceptables. Por otro lado, la poca precisión encontrada en la estimación del peso seco de leña (cv de 57%) es causada por el efecto complementario del desajuste para estimar los parámetros que se usan para calcular el peso (N_{actual} , dap y altura). Hay que tomar este nivel de precisión en cuenta en la aplicación del modelo para estimar el rendimiento en áreas específicas. Asimismo, sería interesante poder separar una muestra de 10-

Cuadro 17. Predicción del rendimiento para tres índices de sitio de *Casuarina equisetifolia* Forst. & Forst. en América Central.

IS = 11 N1 = 2500

Edad (años)	N (N/ha)	dap (cm)	ALT (m)	AB (m ² /ha)	VOL (m ³ /ha)	PSL (tm/ha)	ICA (tm/ha)	IMA (tm/ha)
1	2025	1,4	1,7	0,32	0,68	0,58	0,58	0,58
2	2025	2,6	3,3	1,15	3,40	2,25	1,67	1,12
3	2025	3,9	4,8	2,46	8,75	4,95	2,70	1,65
4	2025	5,1	6,2	4,20	17,11	8,67	3,72	2,17
5	2025	6,3	7,7	6,37	28,79	13,39	4,72	2,68
6	2025	7,5	9,1	8,95	44,05	19,10	5,71	3,18

IS = 9 N1 = 2500

Edad (años)	N (N/ha)	dap (cm)	ALT (m)	AB (m ² /ha)	VOL (m ³ /ha)	PSL (tm/ha)	ICA (tm/ha)	IMA (tm/ha)
1	2025	1,3	1,5	0,27	0,53	0,48	0,48	0,48
2	2025	2,4	2,9	0,97	2,66	1,86	1,38	0,93
3	2025	3,6	4,2	2,07	6,84	4,09	2,23	1,36
4	2025	4,7	5,5	3,55	13,37	7,16	3,07	1,79
5	2025	5,8	6,8	5,38	22,49	11,06	3,90	2,21
6	2025	6,8	8,0	7,56	34,41	15,78	4,72	2,63

IS = 7 N1 = 2500

Edad (años)	N (N/ha)	dap (cm)	ALT (m)	AB (m ² /ha)	VOL (m ³ /ha)	PSL (tm/ha)	ICA (tm/ha)	IMA (tm/ha)
1	2025	1,1	1,3	0,22	0,39	0,38	0,38	0,38
2	2025	2,2	2,5	0,79	1,95	1,46	1,08	0,73
3	2025	3,2	3,6	1,68	5,02	3,22	1,76	1,07
4	2025	4,2	4,8	2,87	9,81	5,64	2,42	1,41
5	2025	5,2	5,9	4,35	16,51	8,71	3,07	1,74
6	2025	6,2	6,9	6,11	25,26	12,42	3,71	2,07

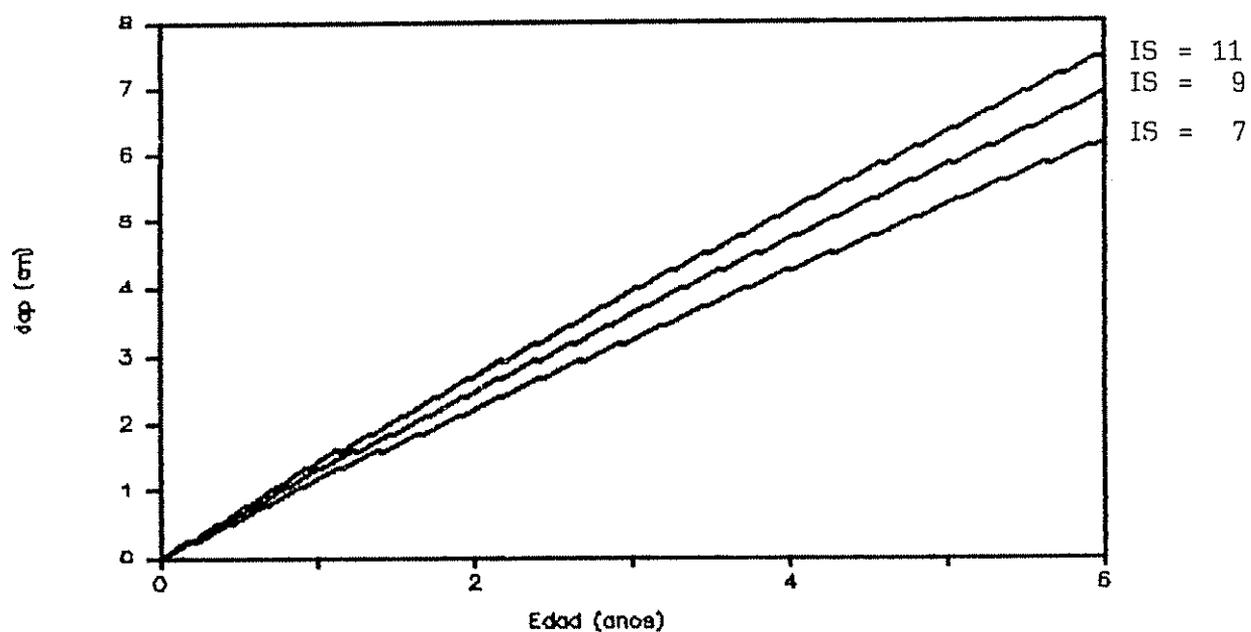


Figura 3. Desarrollo en diámetro con la edad, de Casuarina equisetifolia Forst. & Forst. para los índices de sitio de 11, 9 y 7 m a la edad base de 5 años y densidad de plantación de 2500 árboles/ha en América Central.

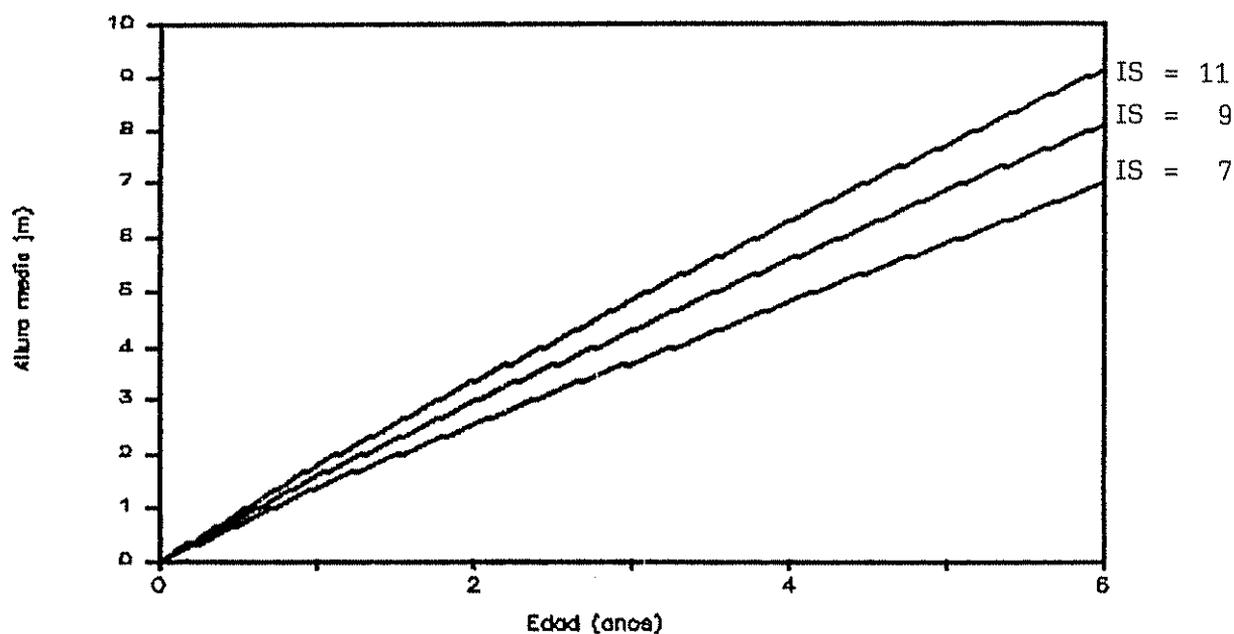


Figura 4. Desarrollo en altura media con la edad, de Casuarina equisetifolia Forst. & Forst. para los índices de sitio de 11, 9 y 7 m a la edad base de 5 años y densidad de plantación de 2500 árboles/ha en América Central.

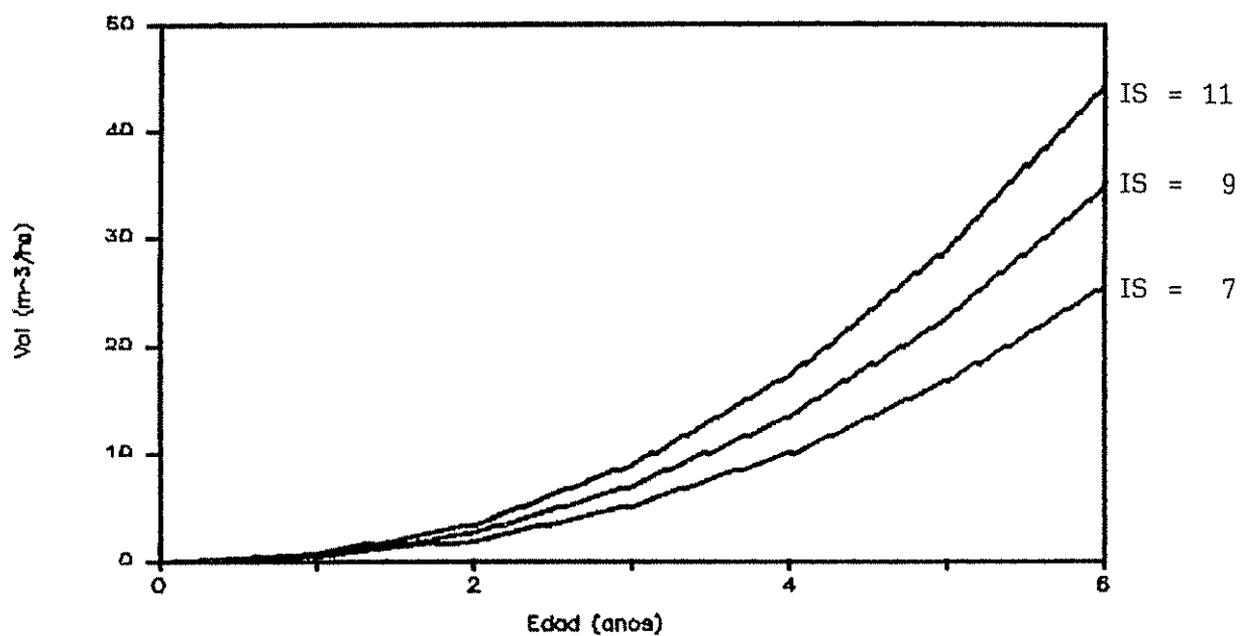


Figura 5. Rendimiento de volumen con corteza de Casuarina equisetifolia Forst. & Forst. para los índices de sitio de 11, 9 y 7 m a la edad base de 5 años y densidad de plantación de 2500 árboles/ha en América Central.

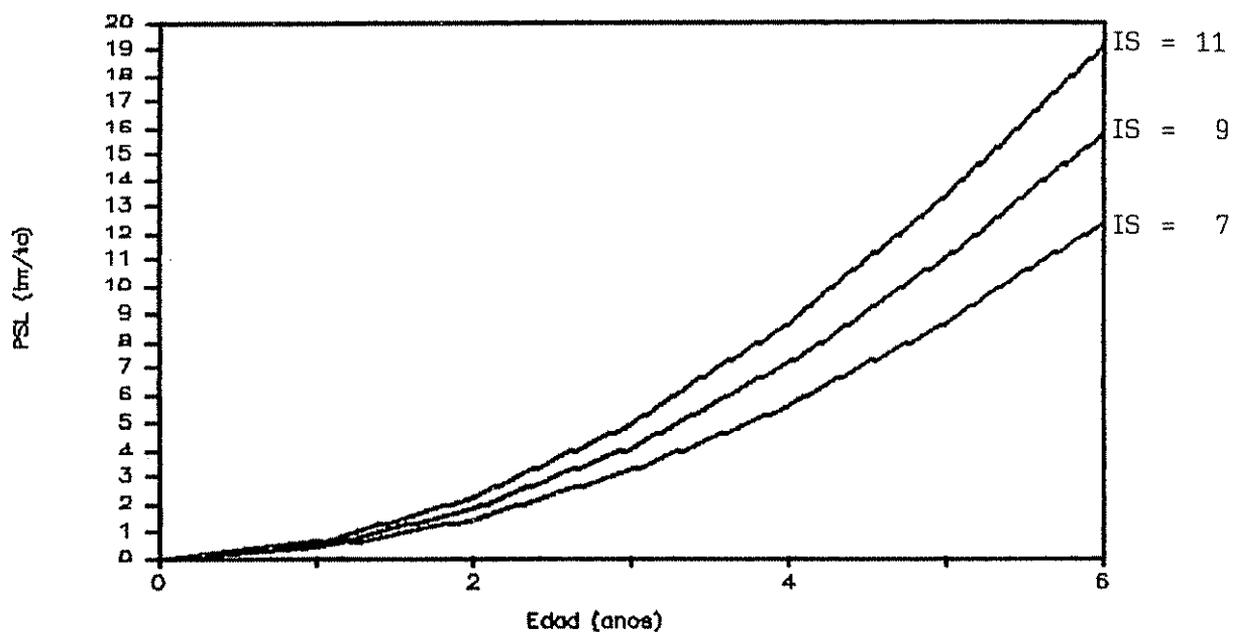


Figura 6. Rendimiento de peso seco de leña de Casuarina equisetifolia Forst. & Forst. para los índices de sitio de 11, 9 y 7 m a la edad base de 5 años y densidad de plantación de 2500 árboles/ha en América Central.

Cuadro 18. Resultados de la verificación de los modelos para estimar la altura, el diámetro y el peso seco de leña de Casuarina equisetifolia Forst. & Forst. en América Central.

Estadística*	Parámetros del crecimiento			
	Nactual (N/ha)	Altura (m)	dap (cm)	PSL (tm/ha)
Tamaño de la muestra	117	117	117	117
Promedio	-40,1	0,1	-0,1	-0,1
Desviación estándar	632,4	1,0	1,2	4,3
cv%	26	22	31	57

*Las estadísticas corresponden a las diferencias entre el valor calculado y el valor observado.

PSL = peso seco de leña

cv = coeficiente de variación = desviación estándar de la diferencia dividido por el valor medio.

15% de las parcelas antes de desarrollar el modelo para la validación posterior con datos independientes y observar como se comportaría el cv en la estimación del peso seco de leña. De esta manera, se podría determinar si la poca precisión encontrada es una característica de la muestra o de la especie y aceptar o rechazar el modelo.

4.2 *Casuarina cunninghamiana*

El Cuadro 19 presenta el rango de las variables incluídas para los resúmenes por medición para las parcelas de la especie en América Central.

El Cuadro 19 muestra que la edad promedio es de tres años lo que indica que las parcelas estudiadas son muy jóvenes. Tanto la densidad inicial como la actual y el número de ejes son muy similares, esto indica que la mortalidad fué baja (14%) y que la especie usualmente presenta solo un eje por árbol. La especie mostró un crecimiento promedio en diámetro de 1,2 cm/año y en altura media de 1,3 m/año y este crecimiento es inferior al encontrado en *C. equisetifolia* (1,3 cm/año y 1,5 m/año, respectivamente); asimismo, se observa una altura dominante promedio de 5,3 m. Comparando los valores de los Cuadros 6 y 19 para ambas especies, se observa que, en general, son similares, tanto en los rangos mínimos y máximos, como en los promedios.

En esta especie no se hicieron aprovechamientos, y al no poder contar con datos de campo suficientes para la estimación de la producción en volumen y biomasa de árboles individuales, se utilizó la información presentada en la Ecuación (14) y los Cuadros 8, 9, 10, 11 y 12 presentados para *Casuarina equisetifolia*. Asimismo, no se presenta una matriz de correlación entre los índices de sitio y los

Cuadro 19. Ambito de las variables incluidas para los resúmenes por medición para las parcelas de Casuarina cunninghamiana Miq. en América Central.

Variable	Promedio	Ambito	
		Mínimo	Máximo
Edad (meses)	36,5	12	106
N _{inicial} (n/ha)	2847	1600	4444
N _{actual} (n/ha)	2451	278	4444
N _{plantas} (n/ha)	2549	278	5000
Supervivencia (%)	86	64	100
dap (cm)	3,7	1,3	11,1
Altura (m)	4,1	0,8	11,5
Altura dominante (m)	5,3	1,3	14,1
Indice de sitio (m)	8,1	4,6	14,0

factores del sitio por ser insuficientes los datos disponibles.

4.2.1 Estimación directa del índice de sitio.

Dada la similitud en el comportamiento de ambas especies en América Central, en C. cunninghamiana se utilizaron los mismos modelos (Ecuaciones 7 y 8) que en C. equisetifolia para la estimación directa del IS.

El Cuadro 20 presenta los valores de los coeficientes a, b y k para C. cunninghamiana estimados por la regresión. Comparando los valores de los Cuadros 13 y 20 para ambas especies, se observa que el coeficiente a (intersección de la regresión) es mayor para C. equisetifolia (6,1059 versus 5,1152) y el coeficiente b (pendiente de la regresión) es mayor para C. cunninghamiana (-6,7658 versus -8,8431). Asimismo, el coeficiente de determinación (R^2) es mayor para C. cunninghamiana (0,93 versus 0,91) y el número de observaciones (n) es mayor para C. equisetifolia (117 versus 86).

La Figura 7 muestra las curvas de IS desarrolladas para 10, 8 y 6 m a la edad base de 5 años para C. cunninghamiana y los datos de resúmenes por medición de 28 parcelas permanentes. Comparando las Figuras 2 y 7, se pueden observar los diferentes rangos de IS encontrados para C. equisetifolia (11, 9 y 7 m) y para C. cunninghamiana (10, 8 y 6 m) respectivamente.

4.2.2 Ecuaciones para estimar los parámetros de la masa forestal.

El Cuadro 21 presenta la serie de ecuaciones desarrolladas que comprende el modelo global para predecir el crecimiento y rendimiento de C. cunninghamiana en América Central.

Cuadro 20. Valores de los coeficientes para estimar el índice de sitio de las parcelas de Casuarina cunninghamiana Miq. en América Central.

Coeficiente	<u>$\ln(IS)=a+(edad/edad\ base)^k*[\ln(Hdom)-a]$</u> (8)
	<u>Casuarina cunninghamiana</u>
a	5,1152
b	-6,7658
k	0,2000
R ²	0,93
n	86

IS =índice de sitio (m)
Hdom = altura dominante (m)
ln = logaritmo natural
edad = edad de las parcelas (meses)
edad base = edad base para calcular el índice de sitio
a, b y k = coeficientes estimados por la regresión
R² = coeficiente de determinación
n = número de observaciones

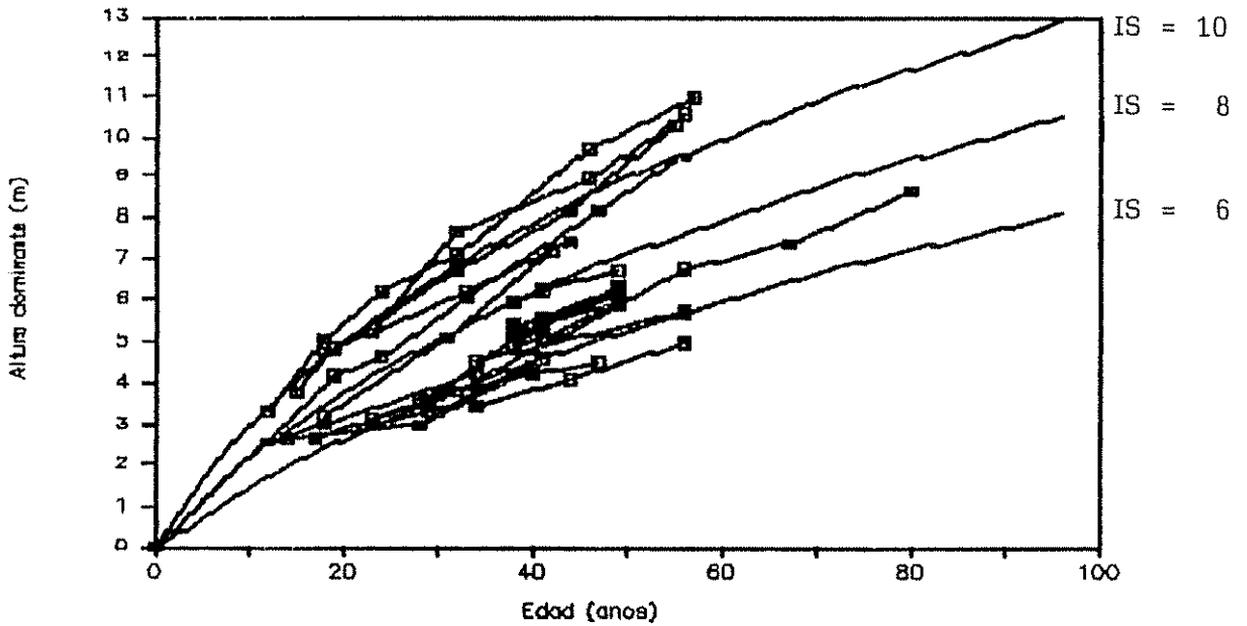


Figura 7. Curvas de índice de sitio de 10, 8 y 6 m a la edad base de 5 años para Casuarina cunninghamiana Miq. y los datos de resúmenes por medición de 28 parcelas permanentes.

Cuadro 21. Serie de ecuaciones que comprende el modelo global para predecir el crecimiento y rendimiento de Casuarina cunninghamiana Miq en América Central.

Parámetro	Ecuación
Estimación del índice de sitio (modelo "a común")	$\ln(IS) = a + [\ln(Hdom) - a] * (edad / edad\ base)^k$ $a = 5,1152 \quad edad\ base = 60\ meses$ $b = -6,7658 \quad R^2 = 0,93$ $k = 0,2 \quad n = 86$
Estimación del número de árboles por hectárea (Nactual)	$N_{actual} = a * N_{inicial}$ $a = 0,86$
Estimación de la altura media (m)	$\ln(h) = a + b * \ln(edad) + c * \ln(IS)$ $a = -2,8210 \quad (0,2442) * \quad R^2 = 0,79$ $b = 0,7475 \quad (0,0470) \quad n = 86$ $c = 0,7457 \quad (0,0752)$
Estimación del dap (cm)	$\ln(dap) = a + b * \ln(edad) + c * \ln(IS)$ $a = -5,1178 \quad (0,3423) \quad R^2 = 0,81$ $b = 1,1623 \quad (0,0659) \quad n = 86$ $c = 1,0760 \quad (0,1054)$
Estimación del volumen con corteza (m ³ /ha)	$\ln(W) = a + b * \ln(dap) + c * \ln(h)$ $a = -9,0882 \quad R^2 = 0,97$ $b = 1,5402 \quad (0,1055) \quad n = 96$ $c = 0,9755 \quad (0,1466)$
Estimación del peso seco de leña (tm/ha)	$\ln(PSL) = a + b * \ln(dap) + c * \ln(h)$ $a = -1,3471 \quad R^2 = 0,94$ $b = 1,6990 \quad (0,0689) \quad n = 126$ $c = 0,3949 \quad (0,0994)$

* El valor en paréntesis corresponde al error estándar del coeficiente

Como se nota, dada la similitud en el comportamiento de las especies C. equisetifolia y C. cunninghamiana en América Central, y las mismas limitaciones en términos de tamaño, edad de las parcelas estudiadas y representación en las muestras de los datos analizados, en este estudio se utilizaron las mismas ecuaciones para estimar el crecimiento y rendimiento de ambas especies.

4.2.3 Tablas de rendimiento

El Cuadro 22 muestra las tablas de rendimiento en volumen (m^3/ha) y leña seca (tm/ha) para C. cunninghamiana en América Central.

Comparando los Cuadros 17 y 22 se observa que para las mismas condiciones de crecimiento en ambas especies, y con un rango de índices de sitio diferente, al predecir el rendimiento a 5 años, la C. cunninghamiana presenta una mayor producción en volumen (33%) y peso seco de leña (35%). Esto se debe a que C. cunninghamiana presenta un mayor crecimiento en diámetro, aunque la C. equisetifolia muestra un mayor crecimiento en altura. Asimismo, la C. cunninghamiana presenta un IMA de 4,12, 2,57 y 1,39 tm/ha para los IS de 10, 8 y 6 m, respectivamente, a la edad de 5 años, mientras la C. equisetifolia presenta un IMA de 2,68, 2,21 y 1,74 tm/ha para los IS de 11, 9 y 7 m, respectivamente, a la misma edad.

Las Figuras 8, 9, 10 y 11 muestran el desarrollo de C. cunninghamiana en diámetro, altura media y los rendimientos en volumen y peso seco de leña para tres IS (10, 8 y 6 m) y densidad de plantación de 2500 árboles/ha, respectivamente.

4.2.4 Verificación del modelo

El Cuadro 23 presenta los resultados de la verificación del modelo global de predicción del crecimiento y rendimiento para C. cunninghamiana.

Cuadro 22. Predicción del rendimiento para tres índices de sitio de Casuarina cunninghamiana Miq. en América Central.

IS = 10 NI = 2500

Edad (años)	N (N/ha)	dap (cm)	ALT (m)	AB (m ² /ha)	VOL (m ³ /ha)	PSL (tm/ha)	ICA (tm/ha)	IMA (tm/ha)
1	2150	1,2	2,1	0,28	0,74	0,53	0,53	0,53
2	2150	2,8	3,5	1,39	4,26	2,57	2,04	1,29
3	2150	4,5	4,8	3,56	11,82	6,46	3,89	2,15
4	2150	6,4	5,9	6,96	24,40	12,41	5,95	3,10
5	2150	8,3	7,0	11,69	42,81	20,60	8,19	4,12

IS = 8 NI = 2500

Edad (años)	N (N/ha)	dap (cm)	ALT (m)	AB (m ² /ha)	VOL (m ³ /ha)	PSL (tm/ha)	ICA (tm/ha)	IMA (tm/ha)
1	2150	1,0	1,8	0,17	0,44	0,33	0,33	0,33
2	2150	2,2	3,0	0,86	2,50	1,60	1,27	0,80
3	2150	3,6	4,0	2,21	6,94	4,02	2,42	1,34
4	2150	5,0	5,0	4,30	14,33	7,73	3,71	1,93
5	2150	6,5	5,9	7,23	25,14	12,83	5,10	2,57

IS = 6 NI = 2500

Edad (años)	N (N/ha)	dap (cm)	ALT (m)	AB (m ² /ha)	VOL (m ³ /ha)	PSL (tm/ha)	ICA (tm/ha)	IMA (tm/ha)
1	2150	0,7	1,4	0,09	0,22	0,18	0,18	0,18
2	2150	1,6	2,4	0,46	1,26	0,87	0,69	0,44
3	2150	2,6	3,3	1,19	3,50	2,18	1,31	0,73
4	2150	3,7	4,0	2,32	7,22	4,20	2,02	1,05
5	2150	4,8	4,8	3,89	12,66	6,96	2,76	1,39

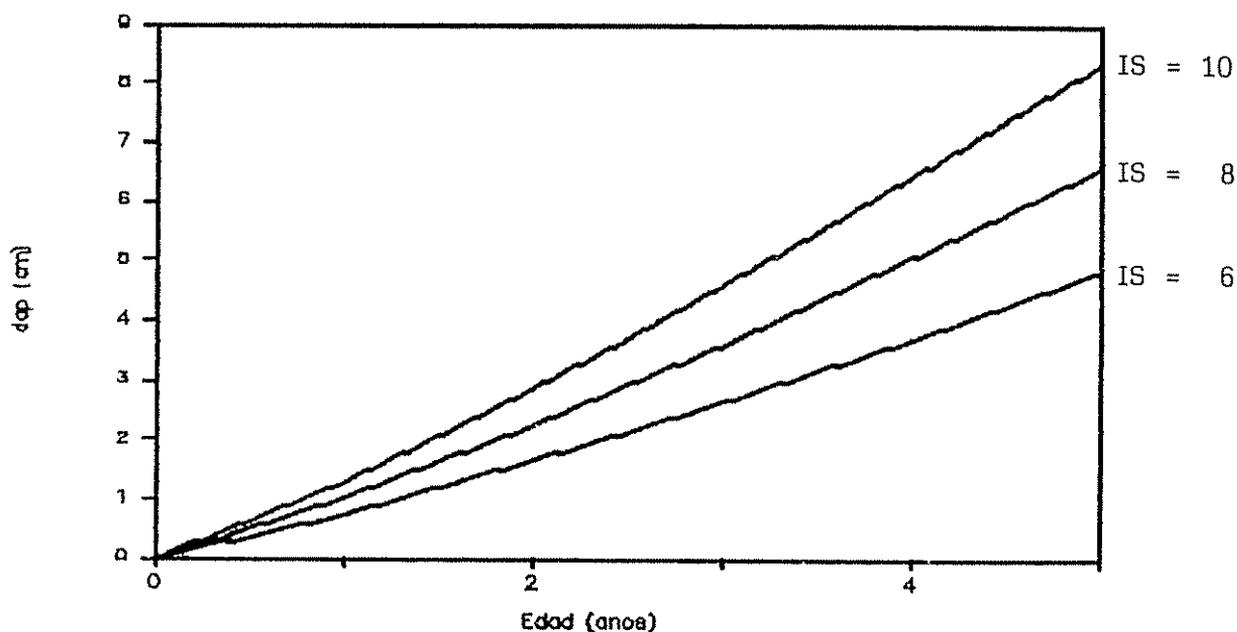


Figura 8. Desarrollo en diámetro con la edad, de Casuarina cunninghamiana Miq. para los índices de sitio de 10, 8 y 6 m a la edad base de 5 años y densidad de plantación de 2500 árboles/ha en América Central.

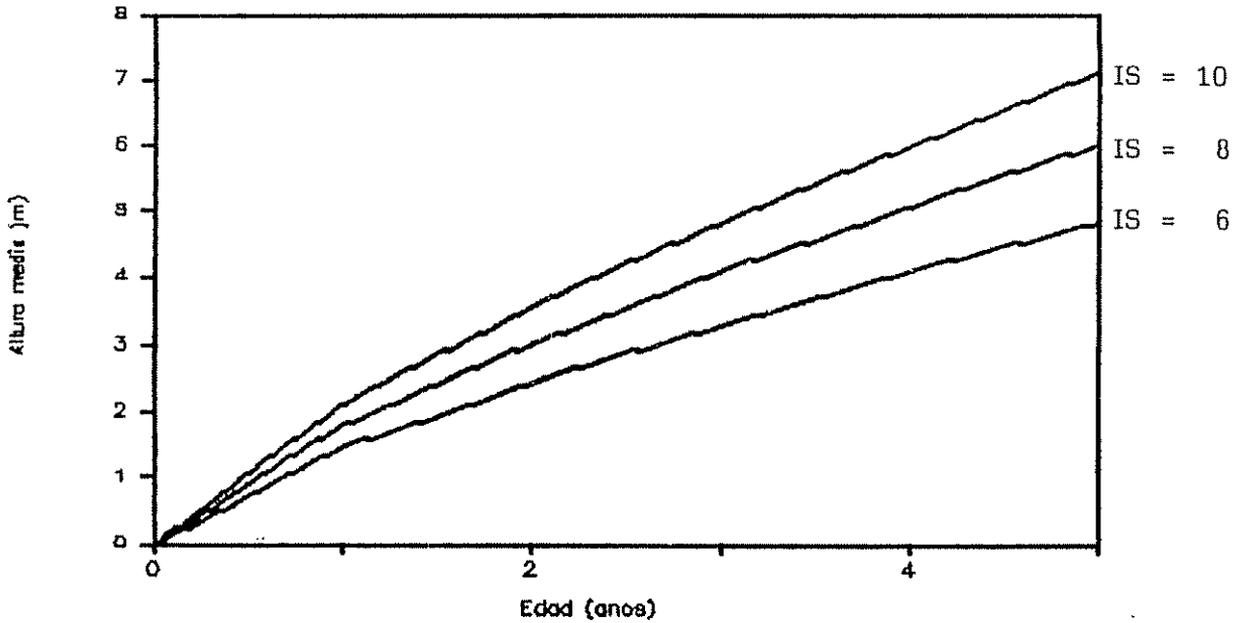


Figura 9. Desarrollo en altura media con la edad, de Casuarina cunninghamiana Miq. para los índices de sitio de 10, 8 y 6 m a la edad base de 5 años y densidad de plantación de 2500 árboles/ha en América Central.

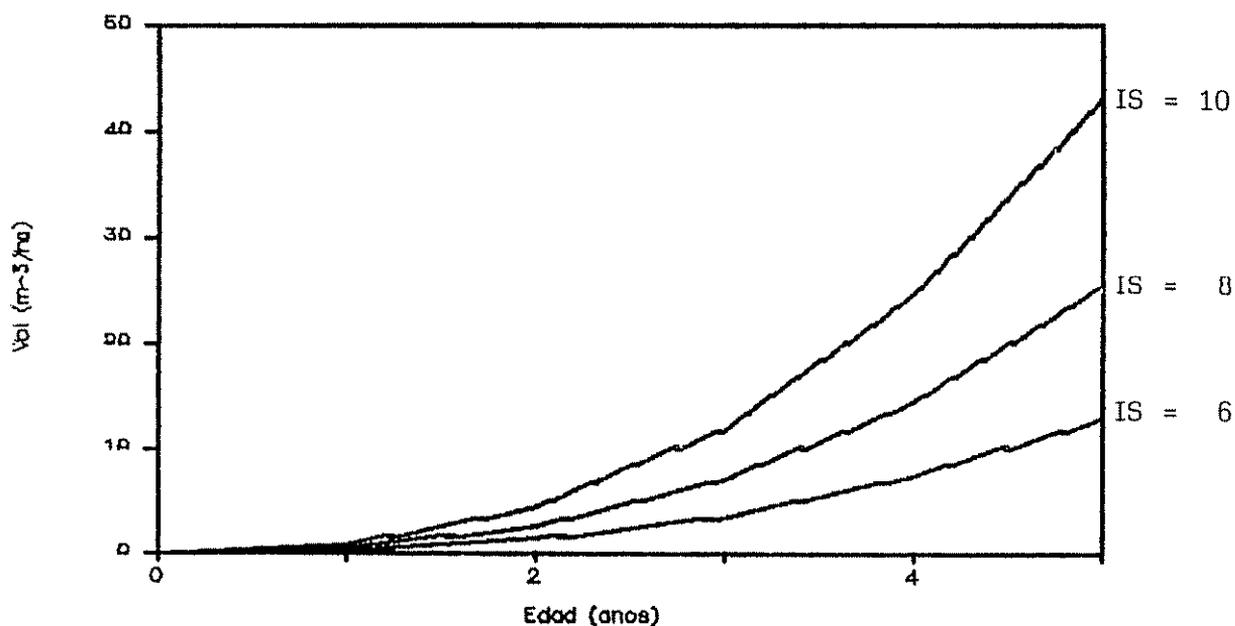


Figura 10. Rendimiento de volumen con corteza de Casuarina cunninghamiana Miq. para los índices de sitio de 10, 8 y 6 m a la edad base de 5 años y densidad de plantación de 2500 árboles/ha en América Central.

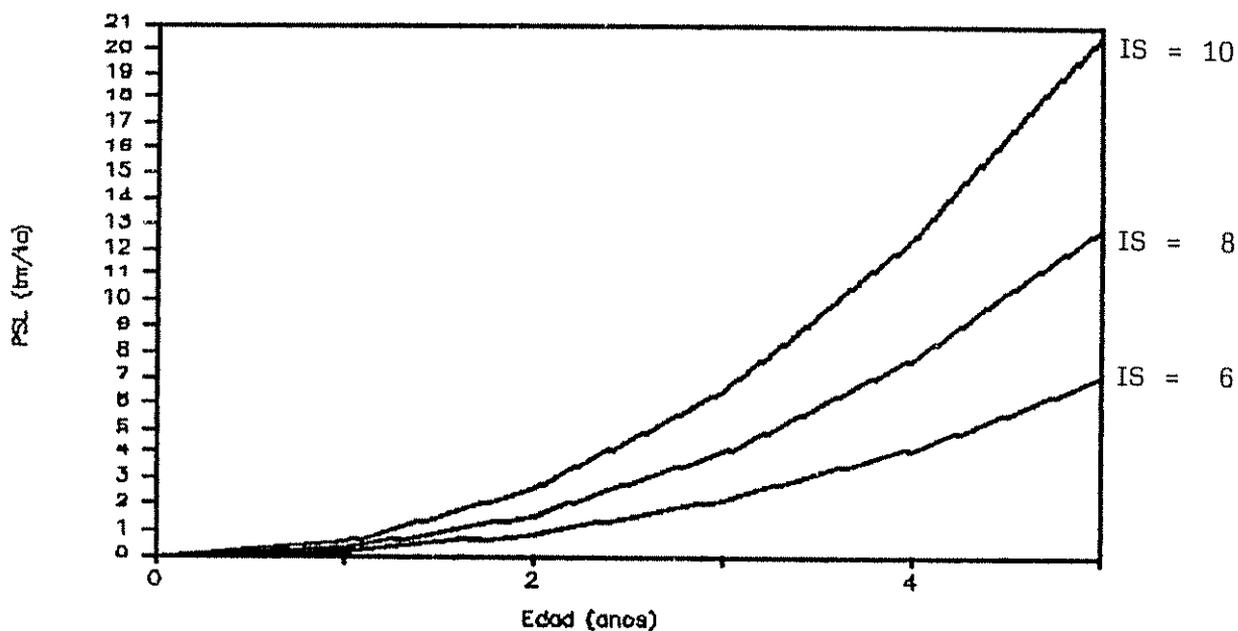


Figura 11. Rendimiento de peso seco de leña de Casuarina cunninghamiana Miq. para los índices de sitio de 10, 8 y 6 m a la edad base de 5 años y densidad de plantación de 2500 árboles/ha en América Central.

Cuadro 23. Resultado de la verificación de los modelos para estimar la altura, el diámetro y el peso seco de leña de Casuarina cunninghamiana Miq en América Central.

Estadística*	<u>Parámetros del crecimiento</u>			
	Nactual (N/ha)	Altura (m)	dap (cm)	PSL (tm/ha)
Tamaño de la muestra	86	86	86	86
Promedio	-16,6	-0,2	-0,3	-0,9
Desviación estándar	420,7	1,0	1,4	5,0
cv%	16	27	39	68

* Las estadísticas corresponden a las diferencias entre el valor calculado y el valor observado.

PSL = peso seco de leña

cv = coeficiente de variación = desviación estándar de la diferencia dividido por el valor medio.

En este caso, la precisión para estimar el crecimiento de parcelas individuales es adecuada ya que los coeficientes de variación (cv) de 16 a 39% son aceptables. Finalmente, la poca precisión encontrada en la estimación del peso seco de leña (cv de 48%) es causada por el efecto complementario del desajuste para estimar los parámetros que se usan para calcular el peso (N_{actual} , dap y altura). Hay que tomar este nivel de precisión en cuenta en la aplicación del modelo para estimar el rendimiento en áreas específicas. Asimismo, sería interesante poder separar una muestra de 10-15 % de las parcelas antes de desarrollar el modelo para la validación posterior con datos independientes y observar como se comportaría el cv en la estimación del peso seco de leña. De esta manera, se podría determinar si la poca precisión encontrada es una característica de la muestra o de la especie y aceptar o rechazar el modelo.

4.3 Comparación del comportamiento de las especies *Casuarina equisetifolia* y *Casuarina cunninghamiana* con otras similares en América Central.

Esta sección trata de realizar una comparación entre los resultados obtenidos en este estudio y otros de especies similares de árboles de uso múltiple en la región centroamericana. La comparación se hace en base al crecimiento en diámetro y altura media, la producción en volumen y biomasa de árboles individuales, el incremento medio anual (IMA) en diámetro y altura media y el IMA en volumen y peso seco de leña. Las especies que entran en esta comparación son *Casuarina equisetifolia*, *Casuarina cunninghamiana*, *Eucalyptus camaldulensis*, *Acacia mangium* y *Caesalpinia velutina*.

Es necesario indicar que un factor importante a considerar en esta comparación es que los datos de las diferentes especies no necesariamente vienen de los mismos sitios. Algunas especies están establecidas en sitios muy

buenos, otras en sitios buenos y otras en sitios regulares y sería interesante poder hacer estudios donde las especies se encuentren en el mismo sitio.

4.3.1 Diámetro y altura media

La especie Casuarina equisetifolia, a los 5 años de edad, presenta un diámetro promedio de 5,8 cm y una altura de 6,8 m para sitios promedios, en América Central; mientras que Casuarina cunninghamiana alcanza 6,5 cm de diámetro y 5,9 m de altura, en las mismas condiciones.

Comparada con otras especies en América Central, por ejemplo, con Eucalyptus camaldulensis, Hughell (1990), reporta un diámetro y una altura promedio de 9,5 cm y 9,9 m, respectivamente, a los 6 años y en sitios promedios; Oliva (1990), encontró un diámetro y una altura promedio de 9,6 cm y 7,1 m respectivamente, a los 4 años y en sitios promedios, en la especie Acacia mangium y 6,0 cm y 6,1 m respectivamente, a los 5 años y en sitios promedios, en la especie Caesalpinia velutina.

4.3.2 Producción en volumen y biomasa de árboles individuales

Al analizar esta información y, tomando como base un diámetro de 6 cm y una altura de 8 m para establecer la comparación, Caesalpinia velutina presenta el mayor volumen total por árbol con y sin corteza (0,016 y 0,015 m³, respectivamente) y Eucalyptus camaldulensis presenta la producción menor en volumen total por árbol con corteza (0,012 m³), en tanto que las especies Casuarina equisetifolia y Acacia mangium muestran valores intermedios (0,013 y 0,014 m³, respectivamente).

En cuanto a la producción de leña seca por árbol, Casuarina equisetifolia presenta la mayor producción (12,7 kg) y Acacia mangium muestra la producción menor (6,3 kg),

en tanto que las especies Eucalyptus camaldulensis y Caesalpinia velutina muestran una producción intermedia (6,7 y 6,3 kg, respectivamente). Esta producción mayor en peso seco de leña, se explica por la mayor gravedad específica de la madera de Casuarina equisetifolia de (0,80-0,95 g/cm³) y Acacia Mangium con 0,60 g/cm³.

4.3.3 Incremento medio anual (IMA)

IMA en diámetro y altura media

La especie Acacia mangium es la que muestra el mayor IMA en diámetro y altura media (2,4 cm/año y 1,8 m/año, respectivamente); Casuarina equisetifolia muestra el menor IMA en diámetro (1,1 cm/año) y Casuarina cunningghamiana muestra el menor IMA en altura media (1,1 m/año). Las especies Eucalyptus camaldulensis y Caesalpinia velutina muestran un IMA intermedio (1,5 y 1,2 cm/año en diámetro y 1,6 y 1,2 m/año en altura media, respectivamente).

IMA en volumen y peso seco de leña

Los incrementos medios anuales (IMA) en volumen y peso seco de leña para las especies Casuarina equisetifolia, Eucalyptus camaldulensis, Acacia mangium y Caesalpinia velutina, a 5 años, muestran que la última especie presenta el mayor IMA en volumen (8,4 m³/ha/año) y comparte el mayor IMA en peso seco de leña (6,2 tm/ha/año) con la primera. Se observa que Eucalyptus camaldulensis presenta el menor IMA en volumen (6,4 m³/ha/año) y que Casuarina equisetifolia y Acacia mangium presentan un IMA intermedio en volumen (6,8 y 7,2 m³/ha/año). Se observa que Acacia mangium presenta el menor IMA en peso seco de leña (3,2 tm/ha/año) y que Eucalyptus camaldulensis presenta un IMA intermedio (3,4 tm/ha/año).

5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

De las experiencias obtenidas en la realización de este trabajo se pueden derivar las siguientes conclusiones y recomendaciones:

Conclusiones

1. El ajuste del modelo logarítmico a los datos de la especie Casuarina equisetifolia para la producción en volumen con y sin corteza, biomasa total y peso seco de leña, en función del diámetro y la altura, fue adecuado, lo que permite usar el modelo con seguridad a nivel de árboles individuales.

2. En las especies estudiadas no se ha iniciado el autoraleo, debido a la densidad de plantación utilizada y a la edad reciente de los árboles. La mortalidad observada ocurrió principalmente durante el primer año. La supervivencia promedio de las parcelas de C. equisetifolia fue de 81% y para Casuarina cunninghamiana de 86%.

3. Se encontró un índice de sitio (altura dominante) para C. equisetifolia de 11, 9 y 7 m para la edad base de 5 años, y para C. cunninghamiana de 10, 8 y 6 m, para la misma edad base. Estos índices de sitio representan a los sitios muy buenos, buenos y regulares, respectivamente.

4. El ajuste de los modelos logarítmicos a los datos de las dos especies para la estimación de la altura media y el diámetro, en función de la edad y el índice de sitio, fue adecuado hasta los 5 años de edad, lo que permite usar estos modelos con seguridad en dicha estimación.

5. Los coeficientes de variación encontrados en la verificación del modelo para estimar la altura y el diámetro en C. equisetifolia son adecuados, de 22 a 31%, lo que indica que el modelo es aceptable y se ajusta a los valores reales.

6. El coeficiente de variación de 57% para estimar el peso seco de leña de C. equisetifolia se considera alto, lo que es causado por el efecto complementario en el desajuste para estimar los parámetros que se usan para calcular el peso (N_{actual} , dap y altura).

7. En C. cunninghamiana, los coeficientes de variación para estimar la altura y el diámetro son también adecuados, de 16 a 39%, y, el coeficiente de variación para estimar el peso seco de leña, de 68%, se considera también alto.

8. Se puede concluir que el crecimiento y rendimiento alcanzado por ambas especies en América Central es menor que el alcanzado en otros países tropicales.

Recomendaciones

1. Se recomienda la obtención de datos independientes de los utilizados en este estudio, con la finalidad de realizar la validación y reajuste de los modelos utilizados.

2. Una limitante en este estudio fue el no poder contar con un número grande de observaciones en ambas especies; además, la información analizada correspondió a datos de parcelas muy jóvenes, hasta una edad de 5 años. Por lo que, se recomienda la continuación de las mediciones, la instalación de nuevas parcelas permanentes y la incorporación de las experiencias obtenidas por otras instituciones con la finalidad de mejorar la información y

exactitud de los análisis de este y otros estudios posteriores.

3. Se recomienda obtener más información sobre la estimación indirecta del índice de sitio con la finalidad de desarrollar un modelo que sea aplicable a las condiciones de campo en que se encuentran creciendo las dos especies en América Central.

4. Se recomienda el uso de ambas especies en programas de reforestación en la región centroamericana, especialmente en suelos poco fértiles no aptos para el desarrollo de otras especies, y las tablas de rendimiento confeccionadas en este estudio, hasta los 5 años de edad para C. cunninghamiana y hasta los 6 años para C. equisetifolia. Estas tablas son una herramienta básica para la programación de actividades silviculturales y la realización de análisis financieros y económicos.

6. LITERATURA CITADA

- ALDER, D. 1980. Estimación del volumen forestal y predicción del rendimiento con referencia especial a los trópicos. Vol. 2. Predicción del rendimiento. Roma, FAO. 80 p. (Estudio FAO:Montes 22/2).
- ANDEKE-LENGUI, M.A.; DOMMERGUES, Y. 1983. Coastal sand dune stabilization in Senegal. *In* Casuarina Ecology Management and Utilization, an International Workshop, 1981, Camberra, Australia. Proceedings. Edited by S.J. Midgley; J.W. Turnbull and R.D. Johnston. Australia, CSIRO. pp. 158-166.
- BERTALANFFY, V.L. 1957. Quantitative laws in metabolism and growth. *Quarterly Review of Biology* 32:217-231.
- BRUCE, D.; WENSEL, L.C. 1987. Modelling forest growth: approaches, definitions, and problems. *In* Forest Growth Modelling and Prediction; Proceedings of the IUFRO Conference, Minneapolis, Minnesota, 1987. Ed. A.R. Ek; S.R. Shifley; T.E. Burk. U.S. Department of Agriculture. North Central Forest Experiment Station. General Technical Report NC-120. V. 1, p. 1-8.
- CAMPOS, J.J. 1989. Predicción de la productividad de Eucalyptus camaldulensis; Segunda Parte: Asociación del índice de sitio con variables ambientales. Informe interno, Proyecto Madeleña, CATIE, 16 p.
- CATIE. 1986. Crecimiento y rendimiento de especies para leña en áreas secas y húmedas de América Central. Serie Técnica. Informe Técnico No. 79. v.1., 691 p.
- CATIE. 1986. Proyecto cultivo de árboles de uso múltiple. Plan de Investigación Silvicultural 1986-1991. Depto Recursos Naturales Renovables. Turrialba, Costa Rica. 31 + 10 p.
- CATIE. 1986. Silvicultura de especies promisorias para producción de leña en América Central; resultados de cinco años de investigación. Serie Técnica. Informe Técnico No. 86. 222 p.
- CLUTTER, J.L. 1963. Compatible growth and yield models for loblolly pine. *Forestry Science* (EE.UU) 9:354-371.

- CLUTTER, J.L. et al. 1983. Timber management: a quantitative approach. Toronto, Canada, John Wiley & Sons. 333 p.
- DORAN, J.; HALL, N. 1983. Notes on fifteen Australian casuarina species. In Casuarina Ecology Management and Utilization, an International Workshop, 1981, Canberra, Australia. Proceedings. Edited by S.J. Midgley; J.W. Turnbull and R.D. Johnston. Australia, CSIRO. pp. 19-52.
- HALOS, S.C. 1983. Casuarinas in Philippine forest development. In Casuarina Ecology Management and Utilization, an International Workshop, 1981, Canberra, Australia. Proceedings. Edited by S.J. Midgley; J.W. Turnbull and R.D. Johnston. Australia, CSIRO. pp. 89-98.
- HUGHELL, D. 1990. Modelos para la predicción del crecimiento y rendimiento de cuatro especies de árboles de uso múltiple en América Central. Proyecto Cultivo de Árboles de uso Múltiple. CATIE. 57 p.
- HUGHELL, D. Manual para el desarrollo de modelos de crecimiento y rendimiento para árboles de uso múltiple. Proyecto Cultivo de Árboles de Uso Múltiple. CATIE. (en prensa).
- KONDAS, S. 1983. Casuarina equisetifolia - a multipurpose cash crop in India. In Casuarina Ecology Management and Utilization, an International Workshop, 1981, Canberra, Australia. Proceedings. Edited by S.J. Midgley; J.W. Turnbull and R.D. Johnston. Australia, CSIRO. pp. 66-76.
- LAMPRECHT, H. 1982. Necesidades, problemas y posibilidades del manejo silvicultural en los bosques nativos de los trópicos húmedos. En Revista Silvicultura en Sao Paulo (Brasil) Vol. 16A, Parte 1 (edición especial):90-108.
- LETOURNEUX, C. 1957. Tree planting practices for arid zones. Roma, FAO. Forestry Development Paper No. 6. 126 p.
- MARTINEZ H., H.A. 1987. Silvicultura de algunas especies de árboles de uso múltiple III. El Chasqui (Costa Rica) No. 14:11-17.
- MARTINEZ H., H.A. 1987. Silvicultura de algunas especies de árboles de uso múltiple IV. El Chasqui (Costa Rica) No. 15:16-24.

- MARTINEZ H., H.A. 1989. Sitios prioritarios para la investigación con especies de árboles de uso múltiple en América Central. Informe Técnico. CATIE. 56 p.
- MENDONZA, L.A. 1983. Growth and uses of Casuarina cunninghamiana in Argentina. In Casuarina Ecology Management and Utilization, an International Workshop, 1981, Canberra, Australia. Proceedings. Edited by S.J. Midgley; J.W. Turnbull and R.D. Johnston. Australia, CSIRO. pp 53-54.
- MORROBEL D., J.C. 1989. Comportamiento de Acacia mangium en diferentes sistemas de plantación manejados por pequeños agricultores en Zambrana, Cotuí, República Dominicana. Tesis M.Sc. CATIE, Turrialba, C.R. 84 p.
- NAS. 1980. Firewood crops: shrub and tree species for energy production. National Academy of Sciences, Washington, D.C.
- NAS. 1983. Firewood crops: shrub and tree species for energy production Volume 2. National Academy Press. Washington, D.C.
- NAVARRO P, C.M. 1987. Evaluación del crecimiento y rendimiento de Rombacopsis quinatum en 14 sitios en Costa Rica. Indices de sitio y algunos aspectos financieros de la especie. Tesis M.Sc. CATIE, Turrialba, C.R. 136 p.
- NRC. 1984. Casuarinas: nitrogen-fixing trees for adverse sites. National Academy Press. Washington, D.C. 118 p.
- NEWMAN, D. 1981. Third year growth of the species in the pulpapel arboretum. Investigación Forestal, Cartón de Colombia No. 66. 7 p.
- NEWMAN, D. 1988. The optimal forest rotation: a discussion and annotated bibliography. USDA Forest Service. Southeastern Forest Experiment Station. General Technical Report SE-48. 47 p.
- OLIVA H, E. 1990. Comportamiento en plantación de Acacia Mangium Willd y Caesalpinia velutina (B y R) Standl en América Central. Tesis M.Sc. CATIE, Turrialba, C.R. 118 p.
- FANDEY, D. 1987. Yield models of plantations in the tropics. *Unasylva* 39(3-4):74-75.

- ROCKWOOD, D.L.; FISHER, R.F.; CONDE, L.F.; HUFFMAN, J.B. 1985. Casuarina spp. the silvics manual. USDA Agr. Hndbk. No 68, Vol.2:2-9.
- SALAZAR, R. 1989. Guía para la investigación silvicultural de especies de uso múltiple. Proyecto Cultivo de Arboles de Uso Múltiple. Serie Técnica. Boletín Técnico No 20. CATIE. 194 p.
- SCHUMACHER, F.X. 1939. A new growth curve and its application to timber-yield studies. Journal of Forestry (EE.UU.) 37:819-820.
- TORREY, J.G. 1983. Root development and root nodulation in Casuarina. In Casuarina Ecology Management and Utilization, an International Workshop, 1981, Canberra, Australia. Proceedings. Edited by S.J. Midgley; J.W. Turnbull and R.D. Johnston. Australia, CSIRO. pp. 180-192.
- TURNBULL, J.W. 1986. Aspects of seed collection, storage and germination in Casuarinaceae. Australian Forest Research 12(4):281-294.
- TURNBULL, J.W.; MARTENSZ, P.N. 1983. Seed production, collection and germination in Casuarinaceae. In Casuarina Ecology Management and Utilization, an International Workshop, 1981, Canberra, Australia. Proceedings. Edited by S.J. Midgley; J.W. Turnbull and R.D. Johnston. Australia, CSIRO. pp. 126-132.
- VALLE, DEL J.I. 1986. La ecuación de crecimiento de Von Bertalanffy en la determinación de la edad y el crecimiento de árboles tropicales. Revista Facultad Nacional de Agronomía 39(1):61-74.
- VASQUEZ C, W. 1987. Desarrollo de índices de sitio y selección de un modelo preliminar de rendimiento para Pinus caribaea var. hondurensis en la Reserva Forestal La Yeguada, Panamá. Tesis M.Sc. CATIE, Turrialba, C.R. 113 p.
- VERMA, V.P.S.; TANDOM, V.N.; RAWAT, H.S. 1987. Biomass production and plant nutrient distribution in different aged plantations of Casuarina equisetifolia in Puri, Orissa. Indian Forester 113(4):273-280.
- VIVEKANANDAN, K. 1983. The status of Casuarina in Sri Lanka. In Casuarina Ecology Management and Utilization, an International Workshop, 1981, Canberra, Australia. Proceedings. Edited by S.J. Midgley; J.W. Turnbull and R.D. Johnston. Australia, CSIRO. pp. 99-101.

WADSWORTH, F.H. 1960. Records of forest plantation growth in México, the West Indies, and Central and South América. Caribbean Forester (Puerto Rico) 21(suppl). 270 p.

YADAV, J.S.P. 1983. Soil limitations for successful establishment and growth of casuarina plantation. In Casuarina Ecology Management and Utilization, an International Workshop, 1981, Canberra, Australia. Proceedings. Edited by S.J. Midgley; J.W. Turnbull and R.D. Johnston. Australia, CSIRO. pp. 138-157.

7. ANEXO

Anexo 1. Formularios empleados en la recolección de la información de campo.

Anexo 2. Datos de análisis de suelo de experimentos de Casuarina equisetifolia Forst. & Forst. en América Central. Profundidad 0-40 cm.

Expto	Sitio	Indice Arcilla (%)	pH	Al (%)	KI (%)	P (ppm)	MO (%)	CIC (%)	Altitud (msnm)	Paño (mm)	Taño (°C)	Nomesec (meses)	Pend (%)
CR045L	443	8,6	36,0	5,0	0,3	0,2	5,4	6,2	24,3	1080	21	5	60
CR070L	453	5,7	10,0	4,7	0,6	0,4	5,0	3,8	24,3	1200	21	5	10
CR083L	734	8,9	30,0	5,4	0,2	0,4	5,6	8,2	38,3	1180	21	5	8
CR181L	747	12,6	41,0	5,0	2,0	0,3	7,5	4,7	32,1	350	00	0	9
GT016L	503	8,7	45,0	6,1	0,2	0,5	10,4	3,3	42,8	1350	18	6	35
GT035L	602	10,5	22,0	5,9	0,1	0,3	3,2	4,5	33,2	980	00	6	38
GT036L	602	10,3	22,0	5,9	0,1	0,2	3,6	3,4	31,4	980	00	6	48
GT037L	602	8,0	22,0	5,9	0,1	0,2	3,6	3,4	31,4	980	00	6	48
HNC48L	108	9,1	14,0	6,0	0,1	0,6	8,1	1,9	21,3	780	23	8	8
NI026L	109	9,1	21,0	7,3	0,2	2,0	6,9	4,3	29,4	40	28	5	1
NI032L	209	7,6	25,0	6,3	0,1	1,1	6,2	2,8	47,4	70	28	7	1
NI033L	516	5,9	30,0	6,0	0,1	0,4	2,6	1,1	23,4	00	28	5	3
NI056L	210	8,6	12,0	7,1	0,1	3,0	7,5	4,3	40,2	215	27	6	1

(*) en meq/100 ml de suelo CIC = capacidad de intercambio catiónico

Al = aluminio

KI = potasio intercambiable

P = fósforo

MO = materia orgánica

Paño = precipitación media anual

Taño = temperatura media anual

Pend = pendiente del terreno.

Anexo 3. Hoja de verificación de los modelos de Casuarina equisetifolia Forst. & Forst. en América Central.

$$\ln(h) = a + b \times \ln(\text{edad}) + c \times \ln(\text{IS})$$

a = -3,1381 (0,2374)*
 b = 0,9171 (0,0471)
 c = 0,5948 (0,1157)

R2 = 0,84
 n = 117

$$\ln(\text{dap}) = a + b \times \ln(\text{edad}) + c \times \ln(\text{IS})$$

a = -2,9867 (0,3025)
 b = 0,9331 (0,0610)
 c = 0,4218 (0,1491)

R2 = 0,76
 n = 117

$$N2 = a \times N1$$

a = 0,81

$$\ln(\text{PSL}) = a + b \times \ln(\text{dap}) + c \times \ln(h)$$

a = -1,3471 (0,0689)
 b = 1,6990 (0,0994)
 c = 0,3949 (0,0994)

R2 = 0,94
 n = 126

Resultados de la verificación

ID	Edad (meses)	IS (m)	N1 HR (árb/ha)		N2_HA (árb/ha)		ALT (m)	dap (cm)	PSL (tm/ha)		dif %					
			calc	obs	calc	obs			calc	obs						
n.	117	117	117	117	117	117	117	117	117	117	117					
prom.	39	9	2892	2343	2383	-40,1	5	4,7	0,1	4,0	-0,1	6,8	7,7	-1,0	83	
mín.	12	6	2500	2025	278	-844,4	2	0,8	-3,6	1,3	0,6	-4,4	0,5	0,2	-26	2,0
máx.	106	13	4444	3600	4444	1747	12	11,5	2,7	10,3	11,2	2,7	36,7	43,9	5,3	786
dev.						632,4			1,0		1,2				4,3	
c.v.						26			22		31				57	

x. = error estándar del coeficiente n. = número de observaciones prom. = promedio
 mín. = mínimo máx. = máximo dev. = desviación estándar c.v. = coeficiente de variación.

Anexo 4. Hoja de verificación de los modelos de Casuarina cunninghamiana
Miq. en América Central.

$$\ln(h) = a + b \times \ln(\text{edad}) + c \times \ln(\text{IS})$$

a = -2,8210 (0,2442)*. R2 = 0,79
b = 0,7475 (0,0470) n = 86
c = 0,7457 (0,0752)

$$\ln(\text{dap}) = a + b \times \ln(\text{edad}) + c \times \ln(\text{IS})$$

a = -5,1178 (0,3423) R2 = 0,81
b = 1,1623 (0,0659) n = 86
c = 1,0760 (0,1054)

N2 = a * N1
a = 0,86

$$\ln(\text{PSL}) = a + b \times \ln(\text{dap}) + c \times \ln(h)$$

a = -1,3471 R2 = 0,94
b = 1,6950 (0,0689) n = 126
c = 0,3949 (0,0994)

Resultados de la verificación

ID	Edad (meses)	IS (m)	N1 HA (árbo/ha)		N2 HA (árbo/ha)		ALT (m)	dap (cm)	PSL (tm/ha)		dif %					
			calc	obs	calc	obs			calc	obs						
n.	86	86	86	86	86	86	86	86	86	86	86					
prom.	37	8	3081	2649	2666	-16,6	4	4,0	-0,2	3,4	3,7	-0,3	5,1	6,5	-0,9	58
mín.	12	5	1962	1687	1434	-622,2	2	1,5	-4,2	0,9	0,7	-5,5	0,3	0,2	-24	1,1
máx.	80	11	5000	4300	4900	1043	7	9,6	1,5	8,2	11,0	2,0	19,7	46,1	11	205
dev.					420,7			1,0				1,4				5,0
c.v.					16			27				39				68

*. = error estándar del coeficiente n. = número de observaciones prom. = promedio
mín. = mínimo máx. = máximo dev. = desviación estándar c.v. = coeficiente de variación.

Anexo 5. Crecimiento e incrementos medios anuales en diámetro, altura media y altura dominante para las parcelas de Casuarina equisetifolia Forst. & Forst. e índices de sitio en América Central.

ID	Edad (meses)	N1_HA (N/ha)	N2_HA (N/ha)	dap (cm)	IMA dap (cm/año)	h (m)	IMA h (m/año)	Hdom (m)	IS (m)
CRO45L17	19	2500	2400	1,73	1,09	2,65	1,67	3,50	8,6
CRO45L17	26	2500	2400	2,16	1,01	3,72	1,72	4,90	8,6
CRO45L17	33	2500	2400	2,91	1,05	4,23	1,53	5,50	8,6
CRO45L17	46	2500	2500	5,22	1,35	5,79	1,51	7,60	8,6
CRO45L17	57	2500	1100	6,81	1,43	6,23	1,31	8,27	8,6
CRO45L32	19	2500	2500	1,73	1,09	2,65	1,67	3,50	8,6
CRO45L32	26	2500	2400	2,16	1,01	3,72	1,72	4,90	8,6
CRO45L32	33	2500	2400	2,91	1,05	4,23	1,53	5,50	8,6
CRO45L32	46	2500	2400	5,22	1,36	5,79	1,51	7,60	8,6
CRO45L32	57	2500	2400	6,81	1,43	6,23	1,31	8,27	8,6
CRO70L44	12	2500	2500	0,72	0,72	0,81	0,81	2,13	5,7
CRO70L44	32	2500	1600	2,44	0,91	1,39	0,52	3,20	5,7
CRO83L64	12	2500	2400	0,63	0,63	1,48	1,48	1,93	8,9
CRO83L64	18	2500	2400	1,28	0,85	2,26	1,51	3,27	8,9
CRO83L64	24	2500	2300	2,03	1,01	2,65	1,32	3,73	8,9
CRO83L64	31	2500	1900	3,31	1,28	3,48	1,34	4,90	8,9
CRO83L64	42	2500	2500	5,43	1,55	4,63	1,32	6,53	8,9
CRO83L64	53	2500	2400	7,81	1,77	6,68	1,51	8,10	8,9
CR181L42	33	2500	2438	4,58	1,66	6,32	2,29	6,17	12,6
CR181L42	35	2500	2377	6,23	2,14	5,13	1,76	7,70	12,6
CR181L42	44	2500	2438	7,74	2,11	6,32	1,72	9,40	12,6
CR181L42	56	2500	2191	9,55	2,04	9,06	1,94	12,00	12,6
CR181L42	68	2500	2284	11,18	1,97	9,96	1,75	12,63	12,6
GT016L44	13	2500	2400	1,50	1,38	1,42	1,31	2,37	7,4
GT016L44	29	2500	2300	1,89	0,78	2,24	0,92	3,77	7,4
GT016L44	42	2500	2000	2,90	0,82	3,55	1,01	5,47	7,4
GT016L51	29	2500	1400	2,19	0,91	3,76	1,56	4,67	9,2
GT016L51	42	2500	1200	5,36	1,53	5,69	1,62	6,87	9,2
GT016L65	22	2500	1800	1,46	0,79	2,23	1,21	3,47	9,4
GT016L65	29	2500	1600	2,31	0,95	3,29	1,36	5,13	9,4
GT035L67	43	2500	2400	3,17	0,88	4,11	1,14	6,80	8,2
GT035L67	47	2500	2400	3,53	0,91	5,33	1,36	7,90	8,2
GT035L67	58	2500	2400	3,63	0,75	5,40	1,11	8,00	8,2
GT035L67	74	2500	2400	4,63	0,75	6,34	1,02	11,13	8,2
GT035L67	81	2500	2400	5,56	0,82	7,48	1,11	11,93	8,2

GT035L68	74	2500	2100	6,28	1,01	8,49	1,37	13,00	11,2
GT035L68	81	2500	2100	6,42	0,95	8,74	1,29	13,27	11,2
GT035L91	37	2500	2400	3,17	1,02	3,50	1,13	5,67	11,4
GT035L91	43	2500	2400	3,63	1,01	4,11	1,14	6,80	11,4
GT035L91	47	2500	2400	4,63	1,18	5,40	1,38	7,90	11,4
GT035L91	58	2500	2400	5,56	1,15	6,34	1,31	11,13	11,4
GT035L91	74	2500	2400	5,75	0,93	7,48	1,21	11,93	11,4
GT035L91	81	2500	2400	6,31	0,93	7,94	1,17	12,83	11,4
GT035L92	74	2500	2100	6,28	1,01	8,49	1,37	13,00	11,2
GT035L92	81	2500	2000	6,42	0,95	8,74	1,29	13,27	11,2
GT035L92	106	2500	2100	9,16	1,03	11,53	1,31	14,13	11,2
GT036L69	25	2500	2300	2,72	1,31	3,45	1,65	4,23	8,0
GT036L69	31	2500	2300	3,76	1,45	4,83	1,87	5,03	8,0
GT036L69	36	2500	2300	3,86	1,28	5,08	1,69	6,17	8,0
GT036L69	46	2500	2300	5,08	1,32	6,69	1,74	6,53	8,0
GT036L69	62	2500	2300	6,54	1,26	9,32	1,81	8,23	8,0
GT036L70	62	2500	2300	6,20	1,21	8,30	1,61	11,10	10,8
GT036L70	70	2500	2300	6,87	1,17	9,37	1,61	12,43	10,8
GT036L93	25	2500	2300	2,72	1,31	3,45	1,65	4,23	11,6
GT036L93	31	2500	2300	3,86	1,49	5,08	1,96	5,03	11,6
GT036L93	36	2500	2300	5,08	1,69	6,69	2,43	6,53	11,6
GT036L93	46	2500	2300	6,54	1,71	9,32	1,84	8,23	11,6
GT036L93	62	2500	2300	6,59	1,27	9,52	1,86	11,87	11,6
GT036L93	70	2500	2300	8,22	1,41	10,90	1,61	13,73	11,6
GT036L94	62	2500	2300	6,20	1,21	8,30	1,61	11,10	10,8
GT036L94	70	2500	2300	6,87	1,17	9,37	1,36	12,43	10,8
GT036L94	95	2500	2300	7,93	1,01	10,80	1,02	14,70	10,8
HNO48L05	16	4444	3889	1,43	1,07	1,76	2,01	2,93	10,7
HNO48L05	30	4444	4444	4,14	1,65	5,00	1,71	6,33	10,7
HNO48L05	41	4444	3889	5,69	1,66	5,84	1,04	7,93	10,7
HNO48L15	16	4444	2778	1,70	1,27	1,39	1,34	2,20	7,3
HNO48L15	30	4444	3889	3,03	1,21	3,36	1,13	4,53	7,3
HNO48L15	41	4444	2778	3,76	1,11	3,86	1,51	5,30	7,3
HNO48L25	16	4444	4444	2,31	1,73	2,00	1,56	3,43	10,6
HNO48L25	30	4444	4444	5,07	2,02	3,92	1,29	6,80	10,6
HNO48L25	41	4444	4444	5,78	1,69	4,41	0,84	7,87	10,6
HNO48L42	16	4444	3889	2,50	1,87	1,13	1,19	1,77	7,9
HNO48L42	30	4444	3889	3,39	1,35	2,99	1,22	4,33	7,9
HNO48L42	41	4444	3889	3,42	1,01	4,17	1,32	5,77	7,9
HNO48L52	16	4444	4444	1,43	1,07	1,76	2,01	2,93	10,7
HNO48L52	30	4444	3889	4,14	1,65	5,00	1,71	6,33	10,7
HNO48L52	41	4444	3889	5,69	1,66	5,84	1,04	7,93	10,7

HNO48L62	16	4444	3889	1,70	1,27	1,39	1,34	2,20	7,3
HNO48L62	30	4444	2778	3,03	1,21	3,36	1,13	4,53	7,3
HNO48L62	41	4444	2778	3,76	1,11	3,86	1,51	5,30	7,3
HNO48L72	16	4444	4444	2,31	1,73	2,00	1,56	3,43	10,6
HNO48L72	30	4444	4444	5,07	2,02	3,92	1,29	6,80	10,6
HNO48L72	41	4444	4444	5,78	1,69	4,41	0,84	7,87	10,6
HNO48L95	16	4444	3889	2,50	1,87	1,13	1,19	1,77	7,9
HNO48L95	30	4444	3889	3,39	1,35	2,99	1,22	4,33	7,9
HNO48L95	41	4444	3889	3,42	1,01	4,17	2,14	5,73	7,9
HN119L02	17	2500	2500	1,73	1,22	3,02	1,82	3,43	8,9
HN119L02	23	2500	2500	2,29	1,19	3,48	0,98	3,90	8,9
HN119L09	23	2500	2500	1,10	0,57	1,89	0,92	2,50	5,7
HN119L09	29	2500	2500	1,43	0,59	2,24	1,69	2,87	5,7
HN119L16	23	2500	2500	2,05	1,07	3,24	1,57	3,73	8,2
HN119L16	29	2500	2500	2,84	1,17	3,79	1,65	4,37	8,2
HN119L23	23	2500	2500	1,80	0,94	3,16	1,48	3,63	7,9
HN119L23	29	2500	2500	2,58	1,07	3,58	1,27	4,17	7,9
HN119L30	23	2500	2222	1,23	0,64	2,44	1,21	2,93	6,7
HN119L30	29	2500	2222	1,79	0,74	2,94	1,65	3,47	6,7
HN119L95	17	2500	2500	1,23	0,87	2,33	1,49	2,70	7,7
HN119L95	23	2500	2500	1,60	0,83	2,86	1,54	3,27	7,7
NIO26L03	32	2500	833	3,04	1,14	4,10	1,94	4,10	9,1
NIO26L03	43	2500	833	5,47	1,52	6,97	2,08	6,97	9,1
NIO26L74	32	2500	833	3,04	1,14	4,10	2,36	4,10	9,1
NIO26L74	43	2500	833	5,47	1,52	6,97	1,66	6,97	9,1
NIO32L13	19	2500	1111	2,52	1,59	3,73	2,08	3,73	7,6
NIO32L13	31	2500	833	3,84	1,48	4,30	2,36	4,30	7,6
NIO32L42	19	2500	833	2,52	1,59	3,73	1,81	3,73	7,6
NIO32L42	31	2500	1111	3,84	1,48	4,30	1,23	4,30	7,6
NIO33L55	20	2500	278	2,50	1,51	3,00	1,23	3,00	5,9
NIO33L55	34	2500	278	3,40	1,21	3,50	1,04	3,50	5,9
NIO33L84	20	2500	278	2,50	1,51	3,00	1,07	3,00	5,9
NIO33L84	34	2500	278	3,40	1,21	3,50	1,22	3,50	5,9
NIO56L00	21	2500	1400	1,61	0,92	1,82	1,04	3,10	9,3
NIO56L00	34	2500	1500	3,29	1,16	3,04	1,07	5,40	9,3
NIO56L00	45	2500	1800	5,84	1,55	4,61	1,22	7,37	9,3

NI056L29	21	2500	1800	1,61	0,92	1,82	1,61	3,10	8,0
NI056L29	34	2500	1700	3,29	1,16	3,04	2,72	5,40	8,0
NI056L29	45	2500	1500	5,84	1,55	4,61	1,29	7,37	8,0
NI056L29	58	2500	1400	9,69	2,01	7,80	2,28	7,80	8,0

IS = índice de sitio (m)

H = altura media (m)

Hdom = altura dominante (m)

Anexo 6. Crecimiento e incrementos medios anuales en diámetro, altura media y altura dominante para las parcelas de Casuarina cunninghamiana Miq. e índices de sitio en América Central.

ID	Edad (meses)	N1_HA (N/ha)	N2_HA (N/ha)	dap (cm)	IMA dap (cm/año)	h (m)	IMA h (m/año)	Hdom (m)	IS (m)
CR043L15	19	5000	4800	2,59	1,63	3,30	2,08	4,17	9,9
CR043L15	24	5000	4800	3,58	1,79	3,58	1,79	4,63	9,9
CR043L15	33	5000	4800	4,96	1,81	4,46	1,62	6,07	9,9
CR043L15	47	5000	4800	8,20	2,09	5,86	1,49	8,17	9,9
CR043L15	56	5000	3800	9,73	2,08	6,57	1,41	9,50	9,9
CR070L59	17	2500	2300	0,73	0,51	1,51	1,07	2,67	7,0
CR070L59	32	2500	1700	2,01	0,75	2,43	0,91	3,83	7,0
CR070L59	56	2500	1500	5,09	1,09	4,62	0,99	6,73	7,0
CR070L59	67	2500	1500	6,40	1,14	5,67	1,01	7,37	7,0
CR070L59	80	2500	1500	7,90	1,18	6,89	1,03	8,63	7,0
CR071L51	12	2500	2500	0,89	0,89	1,68	1,68	2,57	6,3
CR071L51	18	2500	2500	1,10	0,73	1,89	1,26	3,03	6,3
CR071L51	34	2500	2500	2,80	0,98	2,44	0,86	4,23	6,3
CR079L04	12	2500	2500	1,22	1,22	2,72	2,72	3,33	11,3
CR079L04	18	2500	2500	4,09	2,72	4,46	2,97	5,10	11,3
CR079L04	24	2500	2500	5,37	2,68	5,40	2,71	6,20	11,3
CR079L04	32	2500	2500	7,06	2,65	5,95	2,23	7,10	11,3
CR079L04	46	2500	2500	9,46	2,46	8,36	2,18	9,73	11,3
CR079L04	57	2500	2500	11,04	2,32	9,57	2,01	10,97	11,3
CR137L00	38	2500	2344	3,36	1,06	4,15	1,31	5,23	7,0
CR137L00	41	2500	2344	4,11	1,21	4,41	1,29	5,53	7,0
CR137L00	49	2500	2344	4,63	1,13	4,89	1,19	6,17	7,0
CR137L04	38	2500	2188	3,32	1,05	4,25	1,34	4,90	6,7
CR137L04	41	2500	2188	4,05	1,18	4,53	1,32	5,10	6,7
CR137L04	49	2500	2188	4,07	0,99	4,81	1,17	5,90	6,7
CR137L06	38	2500	1875	3,41	1,07	4,24	1,34	5,17	7,2
CR137L06	41	2500	1875	4,29	1,25	4,44	1,31	5,37	7,2
CR137L06	49	2500	1875	4,70	1,15	5,02	1,23	6,30	7,2
CR137L89	38	2500	1875	3,05	0,96	3,79	1,19	5,30	7,1
CR137L89	41	2500	1875	4,16	1,21	4,11	1,21	5,60	7,1
CR137L89	49	2500	1875	4,59	1,12	4,75	1,16	6,23	7,1
CR137L92	38	2500	2188	4,00	1,26	4,64	1,46	4,93	7,0
CR137L92	41	2500	2188	4,91	1,43	5,05	1,48	5,43	7,0
CR137L92	49	2500	2188	5,07	1,24	5,48	1,34	6,13	7,0

CR137L96	38	2500	2188	4,20	1,32	4,53	1,43	5,97	7,6
CR137L96	41	2500	2188	5,07	4,66	4,96	1,45	6,23	7,6
CR137L96	49	2500	2188	6,31	1,54	5,51	1,35	6,70	7,6
CR137L99	38	2500	2188	3,63	1,14	4,54	1,43	5,43	6,7
CR137L99	41	2500	2188	4,53	1,32	4,71	1,38	5,53	6,7
CR137L99	49	2500	2188	5,03	1,23	5,37	1,31	5,90	6,7
GT133L52	23	2500	2449	2,87	1,51	3,47	1,81	5,23	11,0
GT133L52	32	2500	2398	3,87	1,45	4,96	1,86	7,70	11,0
GT133L52	46	2500	2398	5,45	1,42	6,22	1,62	8,93	11,0
GT133L52	56	2500	2347	6,74	1,44	7,50	1,61	10,57	11,0
HNO47L12	34	4444	3333	2,22	0,78	2,83	1,01	3,47	5,2
HNO47L12	44	4444	3333	2,94	0,81	3,12	0,85	4,10	5,2
HNO47L12	56	4444	3333	3,36	0,72	3,75	0,81	4,97	5,2
HNO47L24	34	4444	4444	2,95	1,04	3,80	1,34	4,53	6,0
HNO47L24	56	4444	4444	4,01	0,86	4,05	0,86	5,73	6,0
HNO47L67	34	4444	3333	2,22	0,78	2,83	1,01	3,47	5,2
HNO47L67	44	4444	3333	2,94	0,81	3,12	0,85	4,10	5,2
HNO47L67	56	4444	3333	3,36	0,72	3,75	0,81	4,97	5,2
HNO47L79	34	4444	4444	2,95	1,04	3,80	1,34	4,53	6,0
HNO47L79	56	4444	4444	4,01	0,86	4,05	0,86	5,73	6,0
HNO48L06	30	4444	2778	2,04	0,81	2,92	1,16	3,73	7,2
HNO48L06	41	4444	2778	3,76	1,11	4,24	1,24	5,60	7,2
HNO48L26	30	4444	3333	1,87	0,74	2,87	1,14	3,33	5,9
HNO48L26	41	4444	3333	3,11	0,91	4,23	1,24	4,57	5,9
HNO48L53	30	4444	2778	2,04	0,81	2,92	1,16	3,73	7,2
HNO48L53	41	4444	2778	3,76	1,11	4,24	1,24	5,60	7,2
HNO48L73	30	4444	3333	1,87	0,74	2,87	1,14	3,33	5,9
HNO48L73	41	4444	3333	3,11	0,91	4,23	1,24	4,57	5,9
HNO61L30	18	1962	1887	1,96	1,31	2,51	1,67	4,77	9,0
HNO61L30	33	1962	1623	2,92	1,06	3,01	1,09	6,20	9,0
HNO61L30	44	1962	1434	3,65	0,99	3,42	0,93	7,43	9,0
HNO61L67	18	4444	4274	1,96	1,31	2,51	1,67	4,77	9,0
HNO61L67	33	4444	3675	2,92	1,06	3,01	1,09	6,20	9,0
HNO61L67	44	4444	3248	3,65	0,99	3,42	0,93	7,43	9,0
HN112L45	15	2375	2375	1,58	0,48	2,22	1,77	3,80	10,8
HN112L45	19	2375	2375	2,75	0,71	2,95	1,86	4,87	10,8
HN112L45	32	2375	2333	3,61	0,53	4,12	1,54	6,73	10,8
HN112L45	44	2375	2333	5,09	1,26	5,37	1,46	8,17	10,8
HN112L45	55	2375	2333	7,31	1,74	7,33	1,61	10,30	10,8

HN119L17	23	2500	2222	1,72	0,67	2,38	1,24	3,03	5,7
HN119L17	29	2500	2222	1,83	0,73	2,79	1,15	3,33	5,7
HN119L31	23	2500	2500	1,39	0,75	2,33	1,21	3,17	6,0
HN119L31	29	2500	2500	2,11	0,68	2,78	1,15	3,60	6,0
HN122L94	18	2500	2353	0,92	0,88	1,98	1,32	3,23	8,9
HN122L94	31	2500	2304	1,67	0,69	2,85	1,11	5,13	8,9
HN122L94	42	2500	2255	2,66	0,65	3,84	1,09	7,17	8,9
PA076L42	28	2500	2500	1,79	1,11	2,45	1,05	3,63	5,3
PA076L42	40	2500	2500	2,33	1,03	2,89	0,86	4,23	5,3
PA076L42	47	2500	2500	2,64	0,92	3,10	0,79	4,50	5,3
PA076L51	14	2500	2500	1,29	0,76	2,00	1,72	2,67	5,8
PA076L51	28	2500	2500	2,41	0,69	3,28	1,41	3,00	5,8
PA076L51	40	2500	2500	3,18	0,67	4,00	1,21	4,40	5,8

IS = índice de sitio (m)

H = altura media (m)

Hdom = altura dominante (m)