

Modelo preliminar de crecimiento y rendimiento^o de *Casuarina equisetifolia* Forst. & Forst. en Costa Rica, Guatemala, Honduras y Nicaragua */

José A. Marchena¹
David Hughell²
Miguel A. Musálem³

RESUMEN

Con base en los datos de 38 parcelas de *Casuarina equisetifolia* Forst. y Forst., hasta los seis años de edad, fueron desarrollados modelos matemáticos para predecir el crecimiento y rendimiento de la especie en América Central. Para la estimación de la producción en volumen y biomasa de árboles individuales se aplicó el modelo logarítmico en función del diámetro y la altura. El índice de sitio se estimó mediante el método de la curva guía con regresión jerárquica y la ecuación de Schumacher. La altura y el diámetro se estimaron usando el modelo logarítmico en función del índice de sitio y la edad. Se incorporaron estas ecuaciones al modelo global, el cual, con la aplicación de la hoja electrónica, permitió la confección de tablas de rendimiento. Se encontró una altura dominante de 11, 9 y 7 m para la edad base de cinco años. En sitios promedios (IS = 9 m), con 2500 árboles/ha, a los cinco años de edad, la especie presenta un rendimiento en peso seco de leña de 31,9 tm/ha.

Debido a la falta de datos suficientes para validar, se considera éste un modelo preliminar cuyo uso debe limitarse a los ámbitos de validez de las variables usadas para generar el modelo.

INTRODUCCION

La casuarina (*Casuarina equisetifolia* J. Forst. y G. Forst.) es un árbol nativo de las costas tropicales, desde Bangladesh, Birmania y las islas de Andamán, hasta Indonesia, Filipinas y algunas otras islas del pacífico, el norte y este de Australia (Queensland y Nueva Gales del Sur). Se ha introducido a las zonas tropicales y subtropicales de América Latina, donde se planta ampliamente desde México hasta Argentina (2).

Es un árbol siempreverde de fuste recto y tamaño mediano a grande, de 15 a 30 m de altura o más y diámetro de 20 a 50 cm o más, con ramillas delgadas aciculares, que lo asemejan a pinos, de copa delgada que se hace ancha con la edad (2).

La especie es muy adaptable a diversas condiciones de sitio; crece en zonas cálidas tropicales y subtropicales con temperaturas medias entre 10°C y 33°C y es poco resistente a las heladas. En América Central se ha plantado en sitios con precipitación de 900 a 2800 mm anuales y hasta, aproximadamente, 1600 msnm con resultados aceptables (6).

Crece en una gama amplia de suelos, desde calcáreos y ligeramente salinos, hasta ligeramente ácidos, resiste inundación parcial por algún tiempo y posee nódulos radiculares que fijan el nitrógeno del aire. En América Central se 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 y muy arcillosos como los Vertisoles (2). La especie tolera suelos alcalinos con un pH mayor de 9,5; es una especie ideal para la estabilización de dunas de arena (5).

La madera tiene un poder calorífico de 20 700 kJ/kg (4500 kcal/kg) y produce carbón de excepcional calidad (30 000 kJ/kg), ha sido utilizada en forma directa como combustible, arde fácilmente, aún verde y las cenizas retienen el calor por un período largo (2).

La madera se raja fácilmente, aunque es fuerte, pesada (0,80 a 0,95 g/cm³) y muy resistente. Se utiliza en postes de conducción eléctrica o telefónica, puntales de minas y remos y es de gran durabilidad en construcciones marinas. Se ha utilizado para control de erosión en costas, estuarios, márgenes de ríos y arroyos y como cortinas rompeviento (2).

METODOLOGIA

La unidad básica de información para desarrollar los modelos son resúmenes por medición y por parcela, generados por el sistema MIRA (Manejo de Información sobre Recursos Arbóreos) del Proyecto Cultivo de Árboles de Uso Múltiple (MADELENA). Las 38 parcelas de crecimiento utilizadas comprenden cinco parcelas en Costa Rica, 11 en Guatemala, 14 en Honduras y ocho en Nicaragua.

Para desarrollar el modelo de predicción del crecimiento y rendimiento se trabajó, principalmente, en la construcción de una serie de ecuaciones para describir el desarrollo de los diferentes parámetros de la masa forestal (diámetro, altura, volumen, mortalidad) con base en el índice de sitio y la densidad de plantación (4). El objetivo principal del modelo es la confección de tablas de rendimiento para diferentes calidades de sitio y densidades de plantación.

* Parte de la tesis del primer autor para optar al título de Magister Scientiae del CATIE, Octubre, 1990

1 Estudiante del Programa de Posgrado del CATIE. Actualmente Encargado de la Unidad Regional de Recursos Naturales, Dirección Regional Central, Secretaría de Estado de Agricultura, República Dominicana

2 Especialista en Manejo de Información Forestal. Proyecto Cultivo de Árboles de Uso Múltiple CATIE Turrialba, Costa Rica

3 Silvicultor Principal. Proyecto Cultivo de Árboles de Uso Múltiple, CATIE, Turrialba, Costa Rica

RESULTADOS Y DISCUSION

Datos de resúmenes por medición

En el Cuadro 1 se presenta el ámbito de valores de las variables depuradas incluídas en los resúmenes por medición por parcela de la especie en América Central. Se observa que la edad máxima de las parcelas es de 106 meses; el promedio de la densidad inicial y la actual es muy similar resultando en una supervivencia promedio alta de 81%

Fuera del ámbito de valores indicados en el Cuadro 1, el modelo no tiene validez.

Variable	Ambito		
	Promedio	Mínimo	Máximo
Edad (meses)	36,5	12,0	106,0
N _{inicial} (n/ha)	2898,0	1600,0	4444,0
N _{actual} (n/ha)	2390,0	278,0	4444,0
Nejes (n/ha)	2525,0	278,0	5000,0
Supervivencia (%)	81,0	60,0	100,0
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
Índice de sitio (m)	10,4	4,6	14,0

Tipo de producción estimada	n	a	b	c	R ²
$\ln(\text{Vol}) = a + b \cdot \ln(\text{dap}) + c \cdot \ln(\text{h})$ (1)					
Vol. total con corteza (m ³ /árbol)	96	-9,0882	1,5402	0,9755	0,97
		(0,1055)	(0,1466)		
Vol. total sin corteza (m ³ /árbol)	96	-9,2112	1,5547	0,9738	0,97
		(0,1104)	(0,1533)		
$\ln(\text{PSL}) = a + b \cdot \ln(\text{dap}) + c \cdot \ln(\text{h})$ (2)					
Peso seco de biomasa total (kg/árbol)	126	-1,2425	1,8593	0,2275	0,94
		(0,0696)	(0,1004)		
Peso seco de biomasa leñosa (kg/árbol)	126	-1,3471	1,6990	0,3949	0,94
		(0,0689)	(0,0994)		

Vol = volumen con corteza/sin corteza por árbol (m³)
 PSL = peso seco de biomasa total/peso seco de biomasa leñosa 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

Estimación de la producción en volumen y biomasa de árboles individuales

Con base en el aprovechamiento de los árboles, se estimó la producción en volumen y biomasa, en función del diámetro y la altura. Los valores utilizados en el ámbito de diámetros (dap) y

alturas para el desarrollo de los modelos de volumen con y sin corteza, por árbol, peso de biomasa total y peso de leña, fueron 8,30 cm en promedio del dap, con mínimo de 2,4 cm y máximo de 14,1 cm; así como 12,06 m de altura promedio, con mínimo de 4,2 m y máximo de 16,9 m.

En el Cuadro 2 se presentan las ecuaciones desarrolladas para estimar 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).

Estimación directa del índice de sitio

Dentro del método de la curva guía, descrito por Alder (1990) se seleccionó el modelo "a común" (ecuación 3, Cuadro 3). La Figura 1 muestra el desarrollo de la altura dominante correspondiente a las curvas de IS de 11, 9 y 7 m para la edad base de cinco años. Los valores de IS fueron seleccionados para representar sitios muy buenos, buenos y regulares, con relación a los valores de las parcelas estudiadas.

Para determinar el IS de cualquier plantación de esta especie, se utiliza la altura dominante y la edad de la plantación y se sustituye en la ecuación tres o se puede utilizar la Figura 1 para una estimación aproximada.

Estimación del índice de sitio (modelo a común)(m)	$\ln(\text{IS}) = a + \ln(\text{Hdom}) \cdot a^k \cdot (\text{edad}/\text{edad base})^k$ (3)
	a = 6,1059 edad base = 60 meses
	k = 0,2
Estimación del No. de árboles/ha (N _{actual})	$N_{\text{actual}} = a \cdot N_{\text{inicial}}$ (4)
	a = 0,81
	n = 38
Estimación de la altura media (m)	$\ln(\text{h}) = a + b \cdot \ln(\text{edad}) + c \cdot \ln(\text{IS})$ (5)
	a = -3,1381 R ² = 0,84
	b = 0,9171 n = 117
	c = 0,5948
Estimación del dap (cm)	$\ln(\text{dap}) = a + b \cdot \ln(\text{edad}) + c \cdot \ln(\text{IS})$ (6)
	a = -2,9867 R ² = 0,76
	b = 0,9331 n = 117
	c = 0,4218

Hdom = altura dominante (m)
 edad = edad de las parcelas (meses)
 edad base = edad base para calcular índice de sitio
 a, b, c y k = coeficientes estimados por la regresión

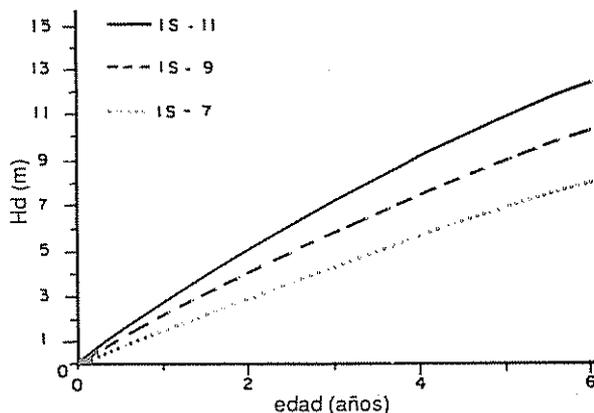


Figura 1. Curvas de desarrollo en altura dominante para los índices de sitio de 11, 9 y 7 m a la edad base de cinco años para *Casuarina equisetifolia* Forst. en América Central

Ecuaciones para estimar los parámetros de la masa forestal

Número de árboles/ha. Se utilizó la supervivencia promedio para las 38 parcelas, que fue de 81%. La mortalidad es muy poca y ocurre principalmente, durante el primer año, por lo que se dejó constante para los demás años. Se seleccionó la ecuación 4 (Cuadro 3), para ilustrar este comportamiento.

Altura media y diámetro. Para estimar la altura media y el diámetro, en función de la edad y del Índice de sitio, fueron seleccionados los modelos logarítmicos (ecuaciones 5 y 6) que aparecen en el Cuadro 3

Tablas de rendimiento. El conjunto de las ecuaciones de los Cuadro 2 y 3 permite confeccionar tablas de rendimiento. Estas fueron hechas para un máximo de seis años (Figura 1) y para una densidad inicial de 2500 árboles/ha, por ser la más representada en todas las parcelas; asimismo, para el IS, se consideró el ámbito encontrado en los datos para esta variable y se eligió un valor alto, uno intermedio y otro bajo (11, 9 y 7 m)

El Cuadro 4 muestra las tablas de rendimiento en volumen (m^3/ha) y leña seca (tm/ha) y la Figura 2, muestra el rendimiento de peso seco de leña para tres IS (11, 9 y 7 m) y densidad de plantación de 2500 árboles/ha de *C. equisetifolia* en América Central.

Cuadro 4. Tablas de rendimiento para tres índices de sitio de *Casuarina equisetifolia* Forst y Forst. en América Central.

IS = 11 $N_{inicial} = 2500$

Edad (años)	N_{actual} (N/ha)	dap (cm)	h (m)	AB (m^2/ha)	VOL (m^3/ha)	PSL (tm/ha)	ICA (tm/ha)	IMA (tm/ha)
1	2025	1,4	1,7	0,3	0,7	1,2	1,2	1,2
2	2025	2,6	3,3	1,2	3,4	4,6	3,4	2,3
3	2025	3,9	4,8	2,4	8,8	10,0	5,5	3,3
4	2025	5,1	6,2	4,2	17,1	17,6	7,5	4,4
5	2025	6,3	7,7	6,4	28,8	27,1	9,6	5,4
6	2025	7,5	9,1	9,0	44,0	38,7	11,6	6,4

IS = 9 $N_{inicial} = 2500$

Edad (años)	N_{actual} (N/ha)	dap (cm)	h (m)	AB (m^2/ha)	VOL (m^3/ha)	PSL (tm/ha)	ICA (tm/ha)	IMA (tm/ha)
1	2025	1,3	1,5	0,3	0,5	1,0	1,0	1,0
2	2025	2,4	2,9	1,0	2,7	3,8	2,8	1,9
3	2025	3,6	4,2	2,0	6,8	8,3	4,5	2,8
4	2025	4,7	5,5	3,6	13,4	14,5	6,2	3,6
5	2025	5,8	6,8	5,4	22,5	22,4	7,9	4,5
6	2025	6,8	8,0	7,6	34,4	31,9	9,5	5,3

IS = 7 $N_{inicial} = 2500$

Edad (años)	N_{actual} (N/ha)	dap (cm)	h (m)	AB (m^2/ha)	VOL (m^3/ha)	PSL (tm/ha)	ICA (tm/ha)	IMA (tm/ha)
1	2025	1,1	1,3	0,2	0,4	0,8	0,8	0,8
2	2025	2,2	2,5	0,1	2,0	3,0	2,2	1,5
3	2025	3,2	3,6	1,7	5,0	6,5	3,6	2,2
4	2025	4,2	4,8	2,9	9,8	11,4	4,9	2,9
5	2025	5,2	5,9	4,4	16,5	17,6	6,2	3,5
6	2025	6,2	6,9	6,1	25,3	25,2	7,5	4,2

AB = área basal en m^2/ha
 IMA = incremento medio anual
 ICA = incremento corriente anual
 Otras variables definidas en el Cuadro 2.

Para los índices de sitio diferentes a los presentados a el Cuadro 4, se puede generar la tabla de rendimiento respectiva estimando el Índice de sitio y la densidad inicial de plantación.

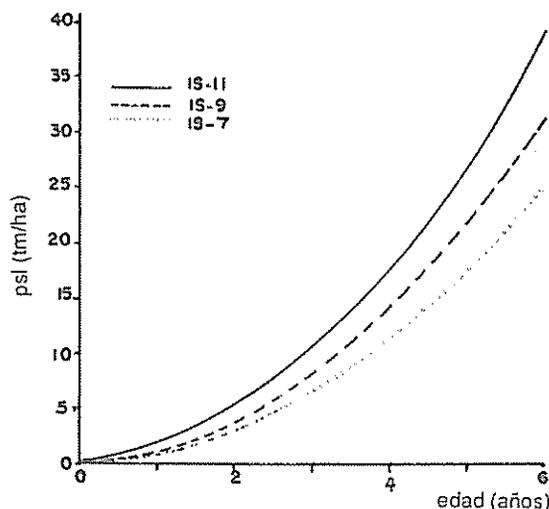


Figura 2 Rendimiento de peso seco de leña de *Casuarina equisetifolia* Forst. y Forst. para los índices de sitio de 11, 9 y 7 m a la edad base de cinco años y densidad inicial de plantación de 2500 árboles/ha en América Central

Verificación del modelo

Debido a la falta de datos no fue posible validar el modelo utilizando datos independientes. Sin embargo, en el Cuadro 5 se presentan los resultados de la verificación del modelo de predicción del crecimiento y rendimiento, realizada con los mismos datos utilizados para su construcción. Las estadísticas corresponden a la diferencia entre el valor observado (real) y el valor calculado (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, sin embargo, se encontró poca precisión en la estimación del peso seco de leña por hectárea (cv de 57%)

Cuadro 5 Resultados de la verificación de los modelos para estimar la altura, el diámetro y el peso seco de leña de *Casuarina equisetifolia* Forst y Forst en América Central.

Estadística*	Parámetros del crecimiento			
	N_{actual} (N/ha)	Altura (m)	dap (cm)	PSL (tm/ha)
Tamaño de la muestra	17,0	117,0	117,0	117,0
Promedio	-40,1	0,1	-0,1	-0,1
Desviación estándar	32,4	1,0	1,2	4,3
cv(%)	26,0	22,0	31,0	57,0

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

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

CONCLUSIONES

1. El ajuste del modelo logarítmico a los datos de la producción en volumen con y sin corteza, biomasa total y peso seco de leña, en función del diámetro y la altura para árboles individuales, fue adecuado.

PERSONAL TECNICO DEL CATIE/PROYECTO MADELEÑA*

JEFATURA

Rodolfo Salazar, Ph.D. Líder Regional
Douglas Asch, Sr. Administración

SILVICULTURA

Miguel Musálem, Ph.D. Silvicultor Principal
David Hughell, M.Sc. Modelación
William Vásquez, M.Sc. Silvicultura
Luis Ugalde, Ph.D. Manejo de Información

SOCIOECONOMIA

Thomas McKenzie, M.Sc. Economista Principal
Dean Current, M.Sc. Socioeconomía/Manejo
de Información
Economía

Carlos Reiche, M.Sc.
Manuel Gómez, M.Sc.

EXTENSION

Carlos Rivas, M.Sc. Extensionista Principal
Héctor Chavarria, Lic. Extensionista Asistente
Ana Loiza Bch. Diseño Gráfico

PAISES

GUATEMALA

Carlos Figueroa, M.Sc. Coordinador Nacional
Eberto de León, Lic. Economía

HONDURAS

Rolando Ordoñez, Das. Coordinador Nacional
Juan Pastora, Lic. Economía

EL SALVADOR

Hugo Zambrana, M.Sc. Coordinador Nacional
Modesto Juárez, M.Sc. Economía

COSTA RICA

Carlos Navarro, M.Sc. Coordinador Nacional
Fabián Salas, Ing. Economía

PANAMA

Blás Morán, Ing. Coordinador Nacional
Rafael Tirado, Lic. Economía
Sobastán Sutherland, Das. Silvicultura

* Madeleña es un proyecto de investigación, capacitación y dissemination del cultivo de árboles de uso múltiple en América Central y Panamá. Es financiado por AID/ROCAP, y ejecutado por INRENARE de Panamá, DGF de Costa Rica, COHDEFOR de Honduras, CENREN de El Salvador, DIGEBOS de Guatemala con la coordinación regional del CATIE.

- La mortalidad observada ocurrió principalmente, durante el primer año. La supervivencia promedio de las parcelas es de 81%.
- Se encontró un índice de sitio de 11, 9 y 7 m para la edad base de cinco años. Estos índices representan a los sitios muy buenos, buenos y regulares, respectivamente.
- El ajuste de los modelos logarítmicos a los datos de la especie para la estimación de la altura media y el diámetro, en función de la edad y el índice de sitio de la masa, fue adecuado hasta los seis años de edad.

RECOMENDACIONES

- Debido a la falta de datos independientes para validar el modelo y a pesar de la verificación realizada, se recomienda utilizar este modelo como preliminar y dentro del rango de valores utilizado para generarlo.
- 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.
- Se debe continuar las mediciones, la instalación de nuevas parcelas permanentes y la incorporación de las experiencias obtenidas por otras instituciones con el propósito, de mejorar la información y exactitud de los análisis de este y otros estudios posteriores.
- Con la finalidad de desarrollar un modelo que sea aplicable a las condiciones de campo en que se encuentra creciendo la especie en América Central, se recomienda obtener más información sobre la estimación del índice de sitio con base en factores ambientales.

SILVOENERGIA No.41, Marzo de 1991, CATIE 7170, Turrialba, Costa Rica Edición: /E. Hidalgo de Caviedes / Diseño y Montaje: Ana Loaiza / Levantado de Texto: Kathia Ramos / Este trabajo fue escrito por: J.A. Marchena/ D. Hughell y M. Musálem/ Revisores: W. Vásquez y L. Ugalde/ Publicación patrocinada por el Proyecto Cultivo de Árboles de Uso Múltiple (MADELEÑA) / CATIE/ROCAP 596 - 0117. / Edición de 1500 ejemplares.

LITERATURA CITADA

ALDER, D. 1980. Estimación del volumen forestal y predicción del rendimiento, con referencia especial a los trópicos. FAO: Montes No. 22 V 2, 80 p.

CENTRO AGRONÓMICO TROPICAL DE INVESTIGACION Y ENSEÑANZA. Depto. Recursos Naturales Renovables. 1986. Silvicultura de especies promisorias para producción de leña en América Central; resultados de cinco años de investigación CATIE. Serie Técnica Informe Técnico No. 86. 222 p.

DORAN, J.; HALL, N. 1983. Notes on 15 Australian casuarina species. In Casuarina Ecology Management and Utilization, an International Workshop (1981, Canberra, Australia). Proceedings Ed. by S.J. Midgley; J.W. Turnbull; R.D. Johnston Australia, CSIRO p 19-52

HUGHELL, D. 1990. Modelos para la predicción del crecimiento y rendimiento de *Eucalyptus camaldulensis*, *Gliciridia sepium*, *Guazuma ulmifolia* y *Leucaena leucocephala* en América Central CATIE Serie Técnica. Informe Técnico No. 22 57 p.

HUGHELL, D. s.f. Manual para el desarrollo de modelos de crecimiento y rendimiento para árboles de uso múltiple. Sin publicar. CATIE

MARCHENA, 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. Tesis Mag. Sci Turrialba, C.R. CATIE 98 p

MENDOZA, L. A.1983. Growth and uses of *Casuarina cunninghamiana* in Argentina. In Casuarina Ecology Management and Utilization, an International Workshop (1981, Canberra, Australia). Proceedings. Ed. by S.J. Midgley; J.W. Turnbull; R.D. Johnston Australia, CSIRO. p 53-54

TURNBULL, J.W. 1986. Aspects of seed collection, storage and germination in Casuarinaceae Australian Forest Research (Australia) 12(4): 281-294.