

# Growth potential of *Carapa guianensis* (Aubl.) in Tumaco, Colombia

## Potencial de crecimiento de *Carapa guianensis* (Aubl.) en Tumaco, Colombia

Pedro P. Bacca-Acosta<sup>1\*</sup>; Jhon J. Zuluaga-Peláez<sup>2</sup>; Álvaro A. Castaño-Colorado<sup>3</sup>;  
Andrés F. Ardila-Fernández<sup>4</sup>

<sup>1</sup>Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria-AGROSAVIA, Centro de Investigación Obonuco, km 5, vía Pasto-Obonuco, Nariño, Colombia.

<sup>2</sup>Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria-AGROSAVIA, Centro de Investigación Nataima, km 9 vía Espinal, Ibagué, Tolima, Colombia.

<sup>3</sup>Smurfit Kappa Cartón de Colombia S. A. Calle 15 #18-109, Yumbo, Valle del Cauca, Colombia.

<sup>4</sup>Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria-AGROSAVIA, Centro de Investigación El Mira, km 38, vía Tumaco-Pasto, Nariño, Colombia.

\*Corresponding author: pbacca@agrosavia.co; tel.: +57 313 7978137.

### Abstract

**Introduction:** Determining growth and yield potential of a forest species is a requirement for management planning. One of the important forest species for the Tumaco region is *Carapa guianensis* (Aubl.), due to its high timber potential.

**Objective:** To evaluate the growth potential of the native species *C. guianensis* (andiroba or tangare) in Tumaco, Colombia.

**Materials and methods:** Permanent plots were established in which tree measurement variables were recorded for 90 even-aged individuals for 60 months. Mean annual increments were estimated and an allometric equation was fitted to estimate height from the diameter at 1.30 m (DBH).

**Results and discussion:** At 60 months of age, *C. guianensis* trees showed survival between 70 and 87 %. Mean annual increase in diameter and height was 2.9 cm·yr<sup>-1</sup> and 2.3 cm·yr<sup>-1</sup>, respectively. By fitting linear and nonlinear models, we determine the following allometric equation. The species showed rapid diameter growth compared to other regions where it can take more than 50 years to reach a minimum usable diameter of 40 cm.

**Conclusion:** Based on mean annual growth increments, and under the agroecological conditions of the region, *C. guianensis* is expected to reach maturity at an early age (before 50 years of age).

### Resumen

**Introducción:** La determinación del potencial de crecimiento y rendimiento de una especie forestal es requisito para la planificación de su manejo. Una de las especies forestales importantes para la región de Tumaco es *Carapa guianensis* (Aubl.), debido a su alto potencial maderero.

**Objetivo:** Evaluar el potencial de crecimiento de la especie nativa *C. guianensis* (andiroba o tangare) en Tumaco, Colombia.

**Materiales y métodos:** Se establecieron parcelas permanentes en las que se registraron variables dasométricas de 90 individuos coetáneos por 60 meses. Se calcularon los incrementos medios anuales y se ajustó una ecuación alométrica para estimar la altura a partir del diámetro a 1.30 m (DAP).

**Resultados y discusión:** A los 60 meses de edad, los árboles de *C. guianensis* presentaron supervivencia entre 70 y 87 %. El incremento medio anual en diámetro y altura fue 2.9 cm·año<sup>-1</sup> y 2.3 m·año<sup>-1</sup>, respectivamente. Con el ajuste de modelos lineales y no lineales se obtuvo la ecuación alométrica. La especie presentó crecimiento diamétrico rápido comparado con otras regiones donde puede tardar más de 50 años para obtener un diámetro mínimo aprovechable de 40 cm.

**Conclusión:** Con base en los incrementos medios anuales de crecimiento, y bajo las condiciones agroecológicas de la región, es probable que *C. guianensis* alcance la madurez a una edad temprana (antes de los 50 años).

**Keywords:** Allometry; andiroba; diameter growth; height estimation; tropical forest.

**Palabras clave:** Alometría; andiroba; crecimiento diamétrico; estimación de altura; bosque tropical.

## Introduction

Tropical forests are made up of a great diversity of native species that are an important source of ecosystem services and timber and non-timber forest products. Studies on these forests have been a great contribution to the forestry sector; however, studies on native species are scarce, a situation that prevents accurate decisions on the use of the species on a larger scale in reforestation programs (Abarca-Valverde, Meza-Picado, & Méndez-Gamboa, 2020).

To contribute to the expansion of knowledge regarding growth and development of native forest species, this research focused on *Carapa guianensis* (Aubl.), a native forest species of the tropical rainforest that belongs to the Meliaceae family. This multipurpose species has potential for use in agroforestry arrangements, in timber production and also stands out because its seeds are used to extract oil on an artisanal or industrial scale for pharmaceutical and cosmetological purposes (Bacca, Zuluaga, Perez, Burbano, & Palacio, 2020).

The ecological and economic importance of *C. guianensis* invites to study its *ex situ* development and to estimate the productivity of the species. In this respect, direct measures that reflect productivity are the mean annual increment (MAI) and the annual periodic increment (PAI), considering specific management and historical environmental conditions, so that future productivity of a site will vary according to these factors.

Another property to determine growth potential, through behavior, is the height-diameter relationship. Height is a variable that is difficult to measure in the field, so it is necessary to implement tools that allow estimation, using historical data collected directly in the field, and analysis through the adjustment of allometric growth models. Foliage cover is very dense, for tropical forest plantations and forests, causing visual obstruction to measure tree height and, consequently, there is bias in the information collected, even with specialized tools such as laser hypsometer or LiDAR (Larjavaara & Muller-Landau, 2013).

Allometry is the study of the variation of anatomical and physiological dimensions in living beings as they correlate; this allows us to approach the understanding of organisms as a whole and not as the sum of their parts. Allometry studies the relationships of the variation of magnitudes in living beings, both their body architecture and those that may occur between it and the variables that quantify physiological processes in a broad sense (Sanchez & Gutiérrez, 2020). In forestry terms, allometry is applied in allometric

## Introducción

Los bosques tropicales están conformados por una gran diversidad de especies nativas que son fuente importante de servicios ecosistémicos y de productos forestales maderables y no maderables. Los estudios de estos bosques han sido de gran aporte para el sector forestal; sin embargo, los estudios en especies nativas son escasos, situación que evita la toma de decisiones acertadas sobre el uso de la especie a mayor escala en programas de reforestación (Abarca-Valverde, Meza-Picado, & Méndez-Gamboa, 2020).

Para contribuir a la ampliación del conocimiento respecto al crecimiento y desarrollo de especies forestales nativas, esta investigación se enfocó en *Carapa guianensis* (Aubl.), una especie forestal nativa del bosque húmedo tropical que pertenece a la familia Meliaceae. Esta especie multipropósito tiene potencial de uso en arreglos agroforestales, en la producción de madera y, además, se destaca porque de sus semillas se extrae óleo de forma artesanal o en escala industrial para fines farmacéuticos y cosmetológicos (Bacca, Zuluaga, Perez, Burbano, & Palacio, 2020).

La importancia ecológica y económica de *C. guianensis* invita a estudiar su desarrollo *ex situ* y a estimar la productividad de la especie. En este sentido, las medidas directas que reflejan la productividad son el incremento medio anual (IMA) y el incremento periódico anual (IPA), teniendo en cuenta el manejo específico y las condiciones ambientales históricas, por lo que la productividad futura de un sitio variará en función de estos factores.

Otra de las propiedades para determinar el potencial de crecimiento, a través del comportamiento, es la relación altura-diámetro. La altura es una variable de difícil medición en campo, por lo que es necesario implementar herramientas que permitan la estimación, usando los datos históricos colectados directamente en campo, y el análisis mediante el ajuste de modelos alométricos de crecimiento. En plantaciones forestales tropicales y en los bosques, la cobertura foliar es muy densa, ocasionando obstrucción visual para medir la altura de los árboles y, por consiguiente, hay sesgo en la información recolectada, aún con herramientas especializadas como el hipsómetro láser o LiDAR (Larjavaara & Muller-Landau, 2013).

La alometría es el estudio de la variación de las dimensiones anatómicas y fisiológicas en los seres vivos en tanto se correlacionan; esto permite aproximarse a la comprensión de los organismos como un todo y no como la suma de sus partes. La alometría estudia las relaciones de la variación de las magnitudes en los seres vivos, tanto su arquitectura corporal como las que

models which, in this case, establishes a mathematical equation that allows estimating a variable from another variable that is easily measured in the field; for example, predicting height from diameter at breast height (Mensah, Veldtman, & Seifert, 2017).

For many tropical tree species, such as *C. guianensis*, there is no information on growth and yield for the study area. This leads to inadequate economic analysis, preventing appropriate management for humid tropical forests (Sharma & Breidenbach, 2015).

Given the current situation and anticipating future demands for goods and services provided by *C. guianensis* in the municipality of Tumaco, Department of Nariño, Colombia, the objective of this research was to analyze the growth potential of this native forest species through the characterization of tree-size parameters and allometric modeling for height estimation during the first phase of development. It is expected that the information generated will provide a tool that facilitates the estimation of height in a fast and efficient way without the use of complex and expensive tools.

## Materials and methods

### Study area

The research was conducted at the Centro de Investigación El Mira de la Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria (AGROSAVIA), located at 1° 32' 59" N and 78° 41' 53" W, at an altitude of 16 m in the municipality of Tumaco (Pacific zone), Department of Nariño, Colombia. The area is classified as tropical rainforest (Holdridge, 1982). According to Reyes, Rodríguez, Peña, and Bastidas (2008), Tumaco has a warm humid climate with an average temperature of 25.7 °C, annual relative humidity of 86 % and annual precipitation of 3 067 mm. The area has potential soils for agricultural and forestry use; according to soil analysis results from the AGROSAVIA laboratory, pH is 5.59 and organic matter has a value of 2.86 %. Topography is relatively flat and structural class is clay loam.

### Tree-size data

Data were obtained from 11 inventories carried out in three permanent rectangular sampling plots, each with an area of 1080 m<sup>2</sup>. The frequency of the register was semiannual during 60 months from 2014 to 2019 in 90 even-aged individuals per plot, planted at a distance of 6 x 6 m. The following tree-size variables were measured for the total number of trees: Total height (H, m), obtained with a clinometer (SUUNTO TANDEM 360PC/360R); diameter at a height

puedan darse entre esta y las variables que cuantifican los procesos fisiológicos en un sentido amplio (Sanchez & Gutiérrez, 2020). En términos forestales, la alometría se aplica en modelos alométricos que, para este caso, establece una ecuación matemática que permite estimar una variable a partir de otra variable de fácil medición en campo; por ejemplo, predecir la altura a partir del diámetro a la altura del pecho (Mensah, Veldtman, & Seifert, 2017).

Para muchas especies arbóreas de los trópicos, como *C. guianensis*, no existe información acerca de su crecimiento y rendimiento en la zona de estudio. Esto trae consigo un análisis económico inadecuado, evitando a su vez una administración apropiada para los bosques del trópico húmedo (Sharma & Breidenbach, 2015).

Dada la situación actual y previendo las demandas futuras de los bienes y servicios que *C. guianensis* provee en el municipio de Tumaco, Departamento de Nariño, Colombia, esta investigación tuvo como objetivo analizar el potencial de crecimiento de esta especie forestal nativa, a través de la caracterización de parámetros dasométricos y la modelación alométrica para la estimación de altura, durante la primera fase de desarrollo. Se espera que la información generada provea una herramienta que facilite la estimación de altura de manera rápida y eficiente sin el uso de herramientas complejas y costosas.

## Materiales y métodos

### Área de estudio

La investigación se realizó en el Centro de Investigación El Mira de la Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria (AGROSAVIA), localizado a 1° 32' 59" N y 78° 41' 53" O, a una altitud de 16 m en el municipio de Tumaco (zona pacífica), Departamento de Nariño, Colombia. La zona se clasifica como bosque húmedo tropical (Holdridge, 1982). Según Reyes, Rodríguez, Peña, y Bastidas (2008), Tumaco posee un clima cálido húmedo con temperatura media de 25.7 °C, humedad relativa anual de 86 % y precipitación anual de 3 067 mm. El área tiene suelos potenciales para uso agropecuario y forestal; según los resultados de análisis de suelos realizados por el laboratorio de AGROSAVIA, el pH es 5.59 y la materia orgánica tiene un valor de 2.86 %. La topografía es relativamente plana y la clase estructural es franco arcillosa.

### Datos dasométricos

Los datos se obtuvieron en 11 inventarios realizados en tres parcelas permanentes de muestreo con forma rectangular, cada una con área de 1080 m<sup>2</sup>.

of 1.3 m (DBH, cm) above ground level (Cancino, 2006) measured with a diameter tape; and survival (%).

### Determination of mean annual increment

The mean annual increment of DBH (MAID) and total height (MAIH) was calculated by the quotient of the highest present value of the variable considered and the age from time zero. The resulting value expresses the mean total growth at a certain age, indicating the annual measure of growth for any age (Casal-Ángeles, Vásquez-García, Cetina-Alcalá, & Campos-Bolaños, 2016).

### Data analysis

#### Allometric modeling

Linear and nonlinear allometric models commonly used to model the functional relationship between a biomass variable and predictor variables of forest species, such as DBH and age, were fitted (Table 1). Each of the models was fitted using the PROC MIXED procedure for linear mixed models of the statistical package SAS/STAT software, version 9.4 (SAS Institute Inc., 2013). There was evidence of dependence between measurements because repeated measurements were taken over time on the same individual. According to Picard, Saint-André, and Henry (2012), height variability tends to increase as the tree increases in diameter, which determines an adverse effect on homoscedasticity of errors; therefore, hybrid correlation and heteroscedasticity structures were fitted, such as the heterogeneous first-order autoregressive (ARH1), heterogeneous symmetric composite (HSC) and heterogeneous Toeplitz (TOEPH).

#### Validation of assumptions

Error dependence was addressed by modeling the correlation structures mentioned. The assumptions of the fitted models were visually validated by homoscedasticity diagnosis and normality of standard errors. The homogeneity of variances was assessed with a scatter plot of the residuals and the fitted values of the model. The normality of the errors was checked with the quantile-quantile plot by observing the residuals through the theoretical standard normal distribution.

#### Analysis of model performance

The best models were selected through goodness-of-fit measures, such as Akaike's criterion (AIC) and Schwarz Bayesian criterion (BIC), and three predictive performance measures such as mean absolute error (MAE), root mean square error (RMSE) and efficiency (Table 2).

La frecuencia del registro fue semestral durante 60 meses comprendidos entre los años 2014 al 2019 en 90 individuos coetáneos por parcela, sembrados a una distancia de 6 x 6 m. Al total de árboles se midieron las variables dasométricas altura total (H, m), obtenida con clinómetro (SUUNTO TANDEM 360PC/360R); diámetro a la altura de 1.3 m (DAP, cm) sobre el nivel del suelo (Cancino, 2006) medido con cinta diamétrica; y supervivencia (%).

### Determinación del incremento medio anual

El incremento medio anual del DAP (IMAD) y de la altura total (IMAH) se calculó mediante el cociente del valor actual mayor de la variable considerada y la edad a partir del tiempo cero. El valor resultante expresa la media del crecimiento total a cierta edad, indicando la medida anual del crecimiento para cualquier edad (Casal-Ángeles, Vásquez-García, Cetina-Alcalá, & Campos-Bolaños, 2016).

### Análisis de datos

#### Modelación alométrica

Se ajustaron modelos alométricos lineales y no lineales utilizados comúnmente para modelar la relación funcional entre una variable de biomasa y variables predictoras de especies forestales, como lo son el DAP y la edad (Cuadro 1). Cada uno de los modelos se ajustó por medio del procedimiento PROC MIXED para modelos lineales mixtos del paquete estadístico SAS/STAT versión 9.4 (SAS Institute Inc., 2013). Debido a que se tomaron mediciones repetidas en el tiempo al mismo individuo, se evidenció dependencia entre las observaciones. Según Picard, Saint-André, y Henry (2012), la variabilidad de la altura tiende a aumentar a medida que el árbol incrementa en diámetro, lo que determina un efecto adverso sobre la homocedasticidad de los errores; por lo tanto, se ajustaron estructuras híbridas de correlación y de heterocedasticidad, tales como la autorregresiva de primer orden heterogénea (ARH 1), la compuesta simétrica heterogénea (CSH) y la Toeplitz heterogénea (TOEPH).

#### Validación de supuestos

La dependencia de los errores se trató con la modelación de las estructuras de correlación ya mencionadas. Los supuestos de los modelos ajustados se validaron visualmente a través del diagnóstico de la homocedasticidad y la normalidad de los errores estudentizados. La homogeneidad de varianzas se evaluó con un gráfico de dispersión de los residuales y los valores ajustados del modelo. La normalidad de los errores se comprobó con el gráfico cuantil-cuantil mediante la observación de los residuales, a través de la distribución normal estándar teórica.

**Table 1. Allometric models evaluated for the estimation of the total height of *Carapa guianensis* according to diameter and age (60 months) in Tumaco, Colombia.**

**Cuadro 1. Modelos alométricos evaluados para la estimación de la altura total de *Carapa guianensis* en función del diámetro y la edad (60 meses) en Tumaco, Colombia.**

Model/ Modelo	Type/ Tipo	Covariance structure/ Estructura de covarianza	Equation/ Ecuación
1	Linearized power/ Potencia linealizado	ARH 1	$\ln H = \beta_0 + \beta_1 \ln DBH$
2		CSH	$\ln H = \beta_0 + \beta_1 \ln DAP$
3		TOEPH	
4	Double input linearized power/ Potencia linealizado de doble entrada	ARH 1	$\ln H = \beta_0 + \beta_1 \ln(DBH^2 \text{ Age})$
5		CSH	$\ln H = \beta_0 + \beta_1 \ln(DAP^2 \text{ Edad})$
6		TOEPH	
7	Linearized polynomial power/ Potencia polinomial linealizado	ARH 1	$\ln H = \beta_0 + \beta_1 \ln DBH + \beta_2 (\ln DBH)^2$
8		CSH	$\ln H = \beta_0 + \beta_1 \ln DAP + \beta_2 (\ln DAP)^2$
9		TOEPH	
10	Polynomial/Polinomial	ARH 1	$H = \beta_0 + \beta_1 DBH + \beta_2 DBH^2$
11		CSH	$H = \beta_0 + \beta_1 DAP + \beta_2 DAP^2$
12		TOEPH	
13	Multiple/Múltiple	ARH 1	$H = \beta_0 + \beta_1 DBH + \beta_2 \text{Age}$
14		CSH	$H = \beta_0 + \beta_1 DAP + \beta_2 \text{Edad}$
15		TOEPH	
16	Linear/Lineal	ARH 1	$H = \beta_0 + \beta_1 DBH$
17		CSH	$H = \beta_0 + \beta_1 DAP$
18		TOEPH	

$\beta_0$ ,  $\beta_1$  and  $\beta_2$  = model parameters, DBH = tree diameter at breast height (cm) measured at 1.3 m from the base, Age = tree age in months, H = height (m) from the base to the apex of the tree. Hybrid correlation and heteroscedasticity structures: heterogeneous first-order autoregressive (ARH 1), composite symmetric heterogeneous (CSH) and Toeplitz heterogeneous (TOEPH).

$\beta_0$ ,  $\beta_1$  y  $\beta_2$  = parámetros de los modelos, DAP = diámetro del árbol a la altura del pecho (cm) medido a 1.3 m de la base, Edad = edad del árbol en meses, H = altura (m) desde la base hasta el ápice del individuo. Estructuras híbridas de correlación y de heterocedasticidad: autorregresiva de primer orden heterogénea (ARH 1), compuesta simétrica heterogénea (CSH) y Toeplitz heterogénea (TOEPH).

**Table 2. Goodness-of-fit parameters of the models for the estimation of *Carapa guianensis* height according to diameter and age (60 months) in Tumaco, Colombia.**

**Cuadro 2. Parámetros de bondad de ajuste de los modelos para la estimación de la altura de *Carapa guianensis* en función del diámetro y la edad (60 meses) en Tumaco, Colombia.**

Statistical parameters/Parámetros estadísticos	Equation/Ecuación
Akaike's criterion/Criterio de Akaike	$AIC = -2\log L + 2p$
Schwarz Bayesian criterion/Criterio de Bayesiano de Schwarz	$BIC = -2\log L + p \log n$
Mean absolute error/Error medio absoluto	$MAE = \frac{\sum_{i=1}^n  Y_i - \hat{Y}_i }{n}$
Square root of mean square error/ Raíz cuadrada del error cuadrático medio	$RCME = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (Y_i - \hat{Y}_i)^2}{n}}$
Efficiency/Eficiencia	$EF = \left( 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (Y_i - \hat{Y}_i)^2}{\sum_{i=1}^n (Y_i - \bar{Y}_i)^2} \right) * 100$

L = maximum value of the likelihood function; p = number of model parameters,  $Y_i$  = i-th observation of the response,  $\hat{Y}_i$  = i-th prediction of the response, n = number of observations.

L = valor máximo de la función de verosimilitud; p = número de parámetros del modelo,  $Y_i$  = i-ésima observación de la respuesta,  $\hat{Y}_i$  = i-ésima predicción de la respuesta, n = número de observaciones.

### Selecting the best model

The best model was selected by assigning greater weight to the predictive performance criteria than to the goodness-of-fit criteria. As for the predictive performance, efficiency is better the closer it is to 1, while low values of MAE and RCME are the best. Similarly, with respect to goodness-of-fit, the model is better the lower the AIC and BIC criteria.

### Results and Discussion

According to Table 3, at 60 months of age, the trees showed survival between 70 and 87 %. Height had values between 11.16 m and 12.72 m, while DBH varied between 14.37 cm and 16.62 cm. The coefficient of variation showed greater relative dispersion of the data in DBH.

#### Mean annual growth increment of *Carapa guianensis*

For a five-year evaluation period (60 months), MAID was 2.9 cm·yr<sup>-1</sup>, while MAIH was 2.3 cm·yr<sup>-1</sup>. On average, trees reach a diameter of 15.53 ± 3.72 cm and height of 12.04 ± 2.10 m. These results were greater than those reported in other studies for the species. In a forest of *C. guianensis*, under restoration, located in the Guacha river basin in Colombia, MAID was 0.62 cm·yr<sup>-1</sup> (Cárdenas, 2014). In a six-year plantation in Requena, Peru, a MAID of 0.6 cm·yr<sup>-1</sup> and a MAIH of 0.95 cm·yr<sup>-1</sup> were reported (Dávila, 2003). Suatunce, Diazl, and García (2009) recorded a MAID of 1.42 cm·yr<sup>-1</sup> and a MAIH of 1.13 cm·yr<sup>-1</sup> in a five-year plantation at Quevedo Dam, Ecuador. Tonini, Arco-Verde, and Sá (2005) estimated a MAID of 1.5 cm·yr<sup>-1</sup> and a MAIH

### Evaluación del desempeño de los modelos

Los mejores modelos se seleccionaron a través de las medidas de bondad de ajuste, como lo son el criterio de Akaike (AIC) y el criterio bayesiano de Schwarz (BIC), y tres medidas de desempeño predictivo como el error medio absoluto (MAE), la raíz cuadrada del error cuadrático medio (RCME) y la eficiencia (Cuadro 2).

#### Selección del mejor modelo

El mejor modelo se seleccionó teniendo en cuenta la asignación de un mayor peso a los criterios de desempeño predictivo, respecto a los de bondad de ajuste. En cuanto al desempeño predictivo, la eficiencia es mejor entre más cercana sea a 1, mientras que los valores bajos de MAE y RCME son los mejores. Igualmente, con respecto a la bondad de ajuste, el modelo es mejor entre menores sean los criterios de AIC y BIC.

### Resultados y discusión

De acuerdo con el Cuadro 3, a los 60 meses de edad, los árboles presentaron supervivencia entre 70 y 87 %. La variable altura tuvo valores entre 11.16 m y 12.72 m, mientras que el DAP varió entre 14.37 cm y 16.62 cm. El coeficiente de variación mostró mayor dispersión relativa de los datos en el DAP.

#### Incremento medio anual del crecimiento de *Carapa guianensis*

Para un periodo de evaluación de cinco años (60 meses), el IMAD fue 2.9 cm·año<sup>-1</sup>, mientras que el IMAH fue

**Table 3. Statistical parameters of the tree-size development variables of 90 individuals of *Carapa guianensis* at the age of 60 months in Tumaco, Colombia.**

**Cuadro 3. Parámetros estadísticos de las variables dasométricas de desarrollo de 90 individuos de *Carapa guianensis* a la edad de 60 meses en Tumaco, Colombia.**

Plot/ Parcela	Survival (%)/ Supervivencia (%)	Variable	Mean/ Media	SD/ DE	SE/ EE	CV (%)
P1	70	Height (m)/Altura (m)	12.72	1.51	0.33	11.86
		DBH (cm)/DAP (cm)	15.34	3.3	0.72	21.52
P2	70	Height (m)/Altura (m)	11.16	2.22	0.49	19.92
		DBH (cm)/DAP (cm)	14.37	3.56	0.78	24.76
P3	87	Height (m)/Altura (m)	12.22	2.22	0.43	18.14
		DBH (cm)/DAP (cm)	16.62	3.98	0.78	23.96

DBH: diameter at breast height (1.30 m), SD: standard deviation; SE: standard error; CV: coefficient of variation.

DAP: diámetro a la altura del pecho (1.30 m), DE: desviación estándar; EE: error estándar; CV: coeficiente de variación.

of 1.3 cm·yr<sup>-1</sup> for a seven-year plantation in Roraima, Venezuela. Similarly, in forests in some Central American countries, a MAID of 0.2 to 0.5 cm·yr<sup>-1</sup> has been reported and with silvicultural release treatments have increased from 0.6 to 0.7 cm·yr<sup>-1</sup>; while three to nine year old plantations in Costa Rica have had a MAID of 1.4 to 1.5 cm·yr<sup>-1</sup> and MAIH of 1.2 to 1.4 cm·yr<sup>-1</sup> (Cordero & Boshier, 2003).

The superior growth found in the municipality of Tumaco is probably due to agroecological conditions, the rigorous selection of trees to reach quality seeds and silvicultural work; however, domestication efforts should continue to be focused on the generation of tools to further reduce the cutting cycle and preserve the individuals established in forest plantations. Tonini et al. (2005) affirm that a species with diameter growth greater than 1 cm·yr<sup>-1</sup>, under forest plantation, can be considered with better increment than the species in natural forest. McLean et al. (2011) state that *Carapa* trees in plantations show greater flexibility as a response to the influence of wind on the stem, compared to trees in natural forests.

In relation to the time of harvest, according to a dendroecological study carried out in Nicaragua, the age of *C. guianensis* is estimated to be between 70 and 122 years, an age at which it is presumed to reach the minimum cutting diameter (MCD) for the area (40 cm) (Paguada, 2015). On the other hand, in Costa Rica, Cordero and Boshier (2003) estimated that the species can reach that diameter at the age of 50, considering its environmental conditions. However, Bauch and Dünisch (2000) found that trees of this species can be harvested in early stages and can be put to good use, because the species produces mature wood at a very early age with a good decorative character due to the color in the heartwood and high natural durability. Based on the results obtained so far in this study (MAID = 2.9 m·yr<sup>-1</sup> and MAIH = 2.3 m·yr<sup>-1</sup>), and under the agroecological conditions of the region, it is likely that *C. guianensis* reaches maturity at an early age.

### Height-DNH allometric model

Table 4 indicates that the nonlinear allometric models (M4, M6, M7 and M8) had good fits compared to the linear models. The linearized polynomial power equation was selected for better performance; subsequently, with validation of the assumptions, the model M8 was the best fit statistically, as shown in Figure 1.

Some research has evaluated allometric equations to predict height with a high percentage of confidence (Ahmadi, Alavi, Kouchaksaraei, & Aertsen, 2013; Barbosa, Ramírez-Narváez, Fearnside, Villacorta, & Carvalho, 2019), in which results similar to those of the

2.3 m·año<sup>-1</sup>. En promedio, los individuos obtuvieron un diámetro de 15.53 ± 3.72 cm y una altura de 12.04 ± 2.10 m. Estos resultados fueron mayores que los reportados en otros estudios para la especie. En un bosque de *C. guianensis*, en proceso de restauración, ubicado en la cuenca del río Guacha en Colombia, el IMAD fue de 0.62 cm·año<sup>-1</sup> (Cárdenas, 2014). En una plantación de seis años en Requena, Perú, se obtuvo un IMAD de 0.6 cm·año<sup>-1</sup> y un IMAH de 0.95 m·año<sup>-1</sup> (Dávila, 2003). Por su parte, Suatunce, Diazl, y García (2009) registraron un IMAD de 1.42 cm·año<sup>-1</sup> y un IMAH de 1.13 m·año<sup>-1</sup> en una plantación de cinco años en la represa Quevedo, Ecuador. Tonini, Arco-Verde, y Sá (2005) estimaron un IMAD de 1.5 cm·año<sup>-1</sup> y un IMAH de 1.3 m·año<sup>-1</sup> para una plantación de siete años en Roraima, Venezuela. Igualmente, en bosques de algunos países de Centroamérica se ha obtenido un IMAD de 0.2 a 0.5 cm·año<sup>-1</sup> y con tratamientos silviculturales de liberación han incrementado de 0.6 a 0.7 cm·año<sup>-1</sup>; mientras que las plantaciones de tres a nueve años en Costa Rica han tenido un IMAD de 1.4 a 1.5 cm·año<sup>-1</sup> e IMAH de 1.2 a 1.4 m·año<sup>-1</sup> (Cordero & Boshier, 2003).

La superioridad de desarrollo encontrada en el municipio de Tumaco probablemente se debe a las condiciones agroecológicas, a la rigurosidad en la selección de árboles para la obtención de semillas de calidad y a las labores silviculturales; sin embargo, los esfuerzos de domesticación deben seguir encaminados a la generación de herramientas que permitan disminuir aún más el turno de corta y preservar los individuos establecidos en plantación forestal. En este sentido, Tonini et al. (2005) afirman que una especie con crecimiento diamétrico mayor de 1 cm·año<sup>-1</sup>, bajo plantación forestal, puede considerarse con mejor incremento que la especie en bosque natural así mismo, McLean et al. (2011) afirman que los árboles del género *Carapa* sembrados en plantación presentan mayor flexibilidad como respuesta a la influencia del viento en el fuste, en comparación con árboles presentes en los bosques naturales.

Con relación al tiempo de aprovechamiento, según un estudio dendroecológico hecho en Nicaragua, la edad de turno del *C. guianensis* está estimada entre los 70 a 122 años, edad en la que se presume puede alcanzar el diámetro mínimo de corta (DMC) para la zona (40 cm) (Paguada, 2015). Por otra parte, en Costa Rica, Cordero y Boshier (2003) estimaron que la especie puede alcanzar ese diámetro a una edad de 50 años, teniendo en cuenta sus condiciones ambientales. No obstante, Bauch y Dünisch (2000) encontraron que los árboles de esta especie pueden aprovecharse en fases tempranas y pueden tener un buen uso, pues la especie produce madera madura a una edad muy temprana con un buen carácter decorativo por el color en el duramen y con una alta durabilidad natural. Con base

present study were collected; they also indicate that this type of nonlinear equations is the best fit for native forest species at a regional scale, where environmental conditions of the site play an important role.

The selected allometric equation best explains the diameter-height relationship according to the environmental conditions of the municipality of Tumaco and may be applicable in other regions with similar agroecological conditions during early age (60 months). In relation to this, the dynamics of the site where growth records are taken is different and specific for each region, so a single equation cannot answer this relationship at a general level (Mensah et al., 2018 Misir, 2010); in addition, there is influence of environmental variables, silvicultural management, planting density and fertilization (Sharma & Breidenbach, 2015). Therefore, from model 8, the following equation was derived  $\ln H = 0.2271 + 0.4284 * \ln DBH + 0.138 * (\ln DBH)^2$  which describes

en los resultados obtenidos hasta el momento en este estudio ( $IMAD = 2.9 \text{ cm}\cdot\text{año}^{-1}$  y  $IMAH = 2.3 \text{ m}\cdot\text{año}^{-1}$ ), y bajo las condiciones agroecológicas de la región, es probable que *C. guianensis* alcance su madurez a una edad temprana.

#### Modelo alométrico altura-DAP

El Cuadro 4 indica que los modelos alométricos no lineales (M4, M6, M7 y M8) presentaron buenos ajustes en comparación con los lineales. La ecuación de potencia polinomial linealizada se seleccionó por mejor desempeño; posteriormente, con la validación de los supuestos, el modelo M8 fue el más adecuado estadísticamente, tal como se observa en la Figura 1.

Algunas investigaciones han evaluado ecuaciones alométricas para predecir la altura con un porcentaje alto de confianza (Ahmadi, Alavi, Kouchaksaraei, & Aertsen, 2013; Barbosa, Ramírez-Narváez, Fearnside,

**Table 4. Estimated coefficients and selection criteria of the fitted allometric diameter-height models of *Carapa guianensis* at the age of 60 months in Tumaco, Colombia.**

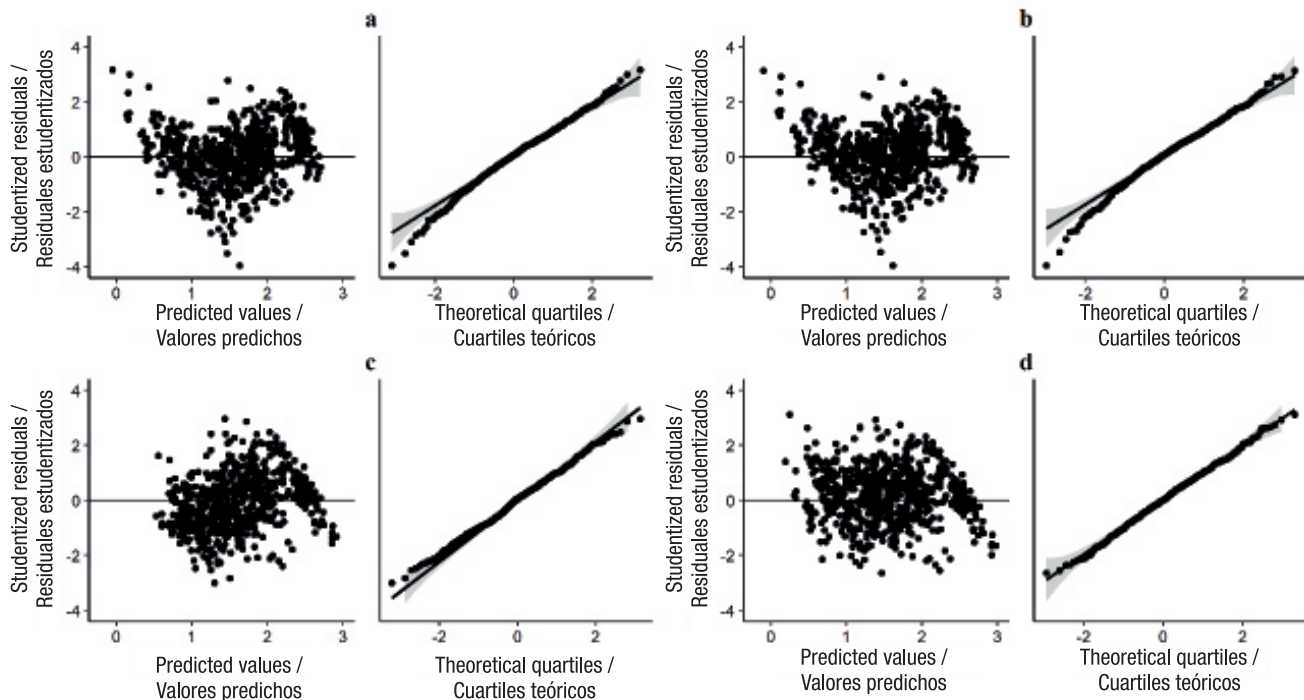
**Cuadro 4. Coeficientes estimados y criterios de selección de los modelos alométricos diámetro-altura ajustados de *Carapa guianensis* a la edad de 60 meses en Tumaco, Colombia.**

Model	Coefficients/Coeficientes			Selection criteria/Criterios de selección				
	$\beta_0$	$\beta_1$	$\beta_2$	AIC	BIC	MAE	RMSE/ RCME	Efficiency (%)/ Eficiencia (%)
M1	0.078	0.804		-891.10	-863.40	0.14	0.17	91.53
M2	-0.292	0.915		-719.30	-691.70	0.20	0.24	83.43
M3	0.506	0.586		-936.20	-887.80	0.21	0.26	81.37
M4	-0.867	0.340		-1069.00	-1041.30	0.11	0.14	94.52
M5	-1.126	0.366		-949.20	-921.50	0.13	0.17	91.87
M6	-0.923	0.346		-1081.10	-1032.70	0.11	0.14	94.37
M7	0.544	0.227	0.163	-984.70	-957.00	0.12	0.16	92.90
M8	0.227	0.428	0.138	-826.20	-798.60	0.12	0.15	93.62
M9	0.682	0.185	0.143	-1008.00	-959.60	0.16	0.20	88.91
M10	0.606	0.458	0.002 ns	1151.60	1179.20	1.57	2.15	62.92
M11	0.421	0.462	0.002 ns	1229.30	1256.90	1.73	2.27	58.89
M12	0.433	0.456	0.001 ns	1109.50	1157.90	1.79	2.35	55.89
M13	-0.242	0.379	0.084	996.50	1024.20	0.71	1.02	91.63
M14	-0.247	0.449	0.051	1180.50	1208.20	0.94	1.36	85.19
M15	-0.296	0.381	0.085	985.70	1034.10	0.71	1.02	91.68
M16	0.566	0.477		1141.60	1169.20	1.62	2.23	60.33
M17	0.348	0.481		1219.00	1246.70	1.80	2.35	55.72
M18	0.376	0.472		1098.50	1146.80	1.84	2.41	53.73

ns: coefficient not significant ( $P < 0.05$ ); AIC: Akaike criterion; BIC: Bayesian Schwarz criterion, MAE: mean absolute error, RMSE: square root of the root mean square error.

ns: coeficiente no significativo ( $P < 0.05$ ); AIC: criterio de Akaike; BIC: criterio bayesiano de Schwarz, MAE: error medio absoluto, RCME: raíz cuadrada del error cuadrático medio.





**Figure 1. Plots of studentized residuals vs. predicted values, and quantile-quantile plot with 95 % confidence bands in the fitted diameter-height allometric models of *Carapa guianensis*: a = model 4, b = model 6, c = model 7, d = model 8.**

**Figura 1. Gráficos de residuales estudentizados vs. valores predichos, y gráfico cuantil-cuantil con bandas de confianza al 95 % en los modelos alométricos diámetro-altura ajustados de *Carapa guianensis*: a = modelo 4, b = modelo 6, c = modelo 7, d = modelo 8.**

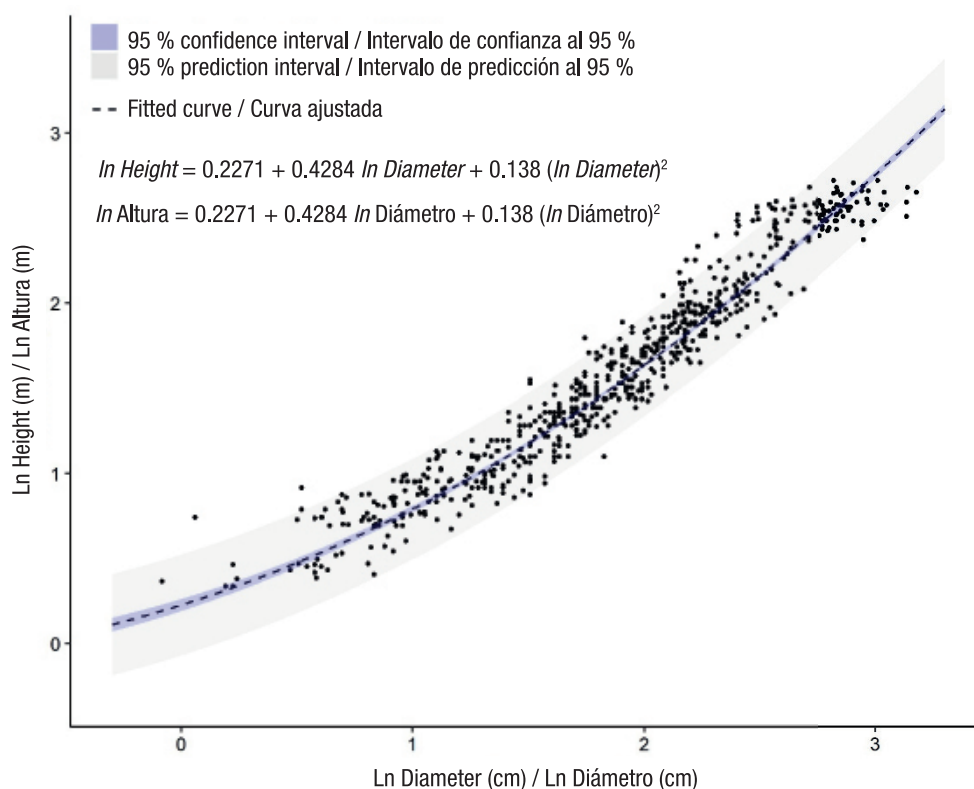
the estimation of height with coefficients, making use of the DBH obtained in the field; Figure 2 shows the positive association between the height-diameter relationship. Although the relationship indicates that the greater the diameter the greater the increase in height, there is a significant quadratic component ( $\beta_2 = 0.138$ ,  $P < 0.05$ ) that determines a curvilinear trend. In this regard, the model indicates that there is a significant slope ( $\beta_1 = 0.4284$ ,  $P < 0.05$ ), where there is an increase of one logarithmic unit in DBH leaving constant the quadratic component that represents an increase of 0.43 logarithmic units in height, approximately. In relation to the above, Sharma and Breidenbach (2015) state that the accuracy of the model's height prediction is highly dependent on the representativeness of the trees chosen. The greater the number of trees used to predict the random effects parameters, the higher the height accuracy.

## Conclusions

In the municipality of Tumaco, Colombia, the species *Carapa guianensis* showed rapid diameter growth compared to other regions under different natural conditions, where it can take more than 50 years to obtain a minimum diameter of 40 cm. The allometric model obtained for *C. guianensis* generates a tool for

Villacorta, & Carvalho, 2019), en las cuales se obtuvieron resultados similares a los del presente estudio; además, indican que este tipo de ecuaciones no lineales son las que mejor se ajustan para especies forestales nativas a escala regional, donde las condiciones ambientales del sitio juegan un papel importante.

La ecuación alométrica seleccionada explica mejor la relación diámetro-altura de acuerdo con las condiciones ambientales del municipio de Tumaco y puede ser aplicable en otras regiones con condiciones agroecológicas similares durante la edad temprana (60 meses). Con relación a esto, la dinámica del sitio donde se toman los registros de crecimiento es diferente y específica para cada región, por lo que una sola ecuación no puede responder a esta relación a nivel general (Mensah et al., 2018; Misir, 2010); además, existe influencia de variables ambientales, del manejo silvicultural, la densidad de plantación y la fertilización (Sharma & Breidenbach, 2015). Por lo tanto, a partir del modelo 8, se obtuvo la ecuación  $\ln H = 0.2271 + 0.4284 * \ln DAP + 0.138 * (\ln DAP)^2$  que describe la estimación de la altura con coeficientes, haciendo uso del DAP obtenido en campo; la Figura 2 muestra la asociación positiva entre la relación altura-diámetro. A pesar de que la relación señala que a mayor diámetro hay incremento en altura, hay



**Figure 2. Allometric model selected to estimate the height of *Carapa guianensis* at the age of 60 months in Tumaco, Colombia.**

**Figura 2. Modelo alométrico seleccionado para estimar la altura de *Carapa guianensis* a la edad de 60 meses en Tumaco, Colombia.**

decision making at early ages, due to its level of accuracy in predicting height according to diameter, as long as it is applied under agro-environmental conditions similar to those of Tumaco.

### Acknowledgments

The authors thank the Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria-AGROSAVIA which, through resources from the Colombian Ministry of Agriculture and Rural Development, was able to finance this research. The authors also thank to the professional support team from the El Mira Research Center who participated in data collection and recording.

un componente cuadrático significativo ( $\beta_2 = 0.138$ ,  $P < 0.05$ ) que determina una tendencia curvilínea. En este sentido, el modelo indica que hay una pendiente significativa ( $\beta_1 = 0.4284$ ,  $P < 0.05$ ), donde hay un incremento en una unidad logarítmica en DAP dejando constante el componente cuadrático que representa un aumento de 0.43 unidades logarítmicas en altura, aproximadamente. Con relación a lo anterior, Sharma y Breidenbach (2015) establecen que la exactitud de la predicción de altura del modelo depende en gran medida de la representatividad de los árboles elegidos. Cuanto mayor sea el número de árboles utilizados para predecir los parámetros de efectos aleatorios, mayor será la precisión de altura.

### Conclusiones

En el municipio de Tumaco, Colombia, la especie *Carapa guianensis* presentó crecimiento diamétrico rápido comparado con otras regiones bajo diferentes condiciones naturales, donde puede tardar más de 50 años para obtener un diámetro mínimo aprovechable de 40 cm. El modelo alométrico obtenido para *C. guianensis* genera una herramienta para la toma de decisiones en edades tempranas, debido a su nivel

*End of English version*

## References / Referencias

- Abarca-Valverde, P., Meza-Picado, V., & Méndez-Gamboa, J. (2020). Evaluación de tratamientos silviculturales en la sostenibilidad de bosques tropicales en la Región Huetar Norte, Costa Rica. *Revista de Ciencias Ambientales*, 54(1), 140–166. doi: 10.15359/rca.54-1.8
- Ahmadi, K., Alavi, S. J., Kouchaksaraei, M. T., & Aertsen, W. (2013). Non-linear height-diameter models for oriental beech (*Fagus orientalis* Lipsky) in the Hyrcanian forests, Iran. *Biotechnology, Agronomy and Society and Environment*, 17(3), 431–440. Retrieved from [https://www.researchgate.net/publication/288838252\\_Non-linear\\_height-diameter\\_models\\_for\\_oriental\\_beech\\_Fagus\\_orientalis\\_Lipsky\\_in\\_the\\_Hyrcanian\\_forests\\_Iran](https://www.researchgate.net/publication/288838252_Non-linear_height-diameter_models_for_oriental_beech_Fagus_orientalis_Lipsky_in_the_Hyrcanian_forests_Iran)
- Bacca, P., Zuluaga, J., Perez, J., Burbano, D., & Palacio, M. (2020). Evaluation of pre-germination treatments in *Carapa guianensis* Aubl. *Revista de Ciencias Agrícolas*, 37(2), 56–66. doi: 10.22267/rca.203702.138
- Barbosa, R., Ramírez-Narváez, P., Fearnside, P., Villacorta, C., & Carvalho, L. (2019). Allometric models to estimate tree height in northern amazonian ecotone forests. *Acta Amazonica*, 49(2), 81–90. doi: 10.1590/1809-4392201801642
- Bauch, J., & Dünisch, O. (2000). Comparison of growth dynamics and wood characteristics of plantation-grown and primary forest *Carapa guianensis* in Central Amazonia. *IAWA Journal*, 21(3), 321–333. doi: 10.1163/22941932-90000250
- Casal-Ángeles, L. F., Vásquez-García, I., Cetina-Alcalá, V. M., & Campos-Bolaños, R. (2016). Evaluación de plantaciones forestales en tres comunidades de la Mixteca Alta Oaxaqueña. *Agro Productividad*, 9(2), 12–19. Retrieved from <http://search.ebscohost.com/login.aspx?direct=true&db=fap&AN=114248571&site=ehost-live>
- Cancino, J. (2006). *Dendrometría básica*. Chile: Universidad de Concepción.
- Cárdenas, L. M. (2014). *Biomasa y crecimiento de especies forestales nativas. Revisión de información disponible para Colombia*. Colombia: Fundación Natura.
- Cordero, J., & Boshier, D. (2003). *Árboles de Centroamérica. Un manual para extensionistas*. Costa Rica: IICA-CATIE. Retrieved from <http://repositorio.bibliotecaorton.catie.ac.cr/handle/11554/9730>
- Dávila, F. C. (2003). *Evaluación del crecimiento inicial de 30 especies forestales plantadas a campo abierto en Requena, Perú*. Perú: Universidad de la Amazonia Peruana.
- Holdridge, L. (1982). *Ecología basada en zonas de vida*. Costa Rica: IICA.
- Larjavaara, M., & Muller-Landau, H. C. (2013). Measuring tree height: A quantitative comparison of two common field methods in a moist tropical forest. *Methods in Ecology and Evolution*, 4(9), 793–801. doi: 10.1111/2041-210X.12071
- McLean, P. J., Zhang, T., Bardet, S., Beauchêne, J., Thibaut, A., Clair, B., & Thibaut, B. (2011). The decreasing radial de precisión para predecir la altura en función del diámetro, siempre y cuando su aplicación se de en condiciones agroambientales similares a la región de Tumaco.

## Agradecimientos

Los autores agradecen a la Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria-AGROSAVIA que, a través de los recursos del Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural de Colombia, logró financiar esta investigación. Al equipo de profesionales de apoyo del Centro de Investigación El Mira que participaron en la toma y registro de datos.

## Fin de la versión en español

wood stiffness pattern of some tropical trees growing in the primary forest is reversed and increases when they are grown in a plantation. *Annals of Forest Science*, 68(4), 681–688. doi: 10.1007/s13595-011-0085-z

Mensah, S., Pienaar, O. L., Kunneke, A., du Toit, B., Seydack, A., Uhl, E., Pretzsch, H., & Seifert, T. (2018). Height – diameter allometry in South Africa’s indigenous high forests: Assessing generic models performance and function forms. *Forest Ecology and Management*, 410(2018), 1–11. doi: 10.1016/j.foreco.2017.12.030

Mensah, S., Veldtman, R., & Seifert, T. (2017). Allometric models for height and aboveground biomass of dominant tree species in South African Mistbelt forests. *Southern Forests*, 79(1), 19–30. doi: 10.2989/20702620.2016.1225187

Misir, N. (2010). Generalized height-diameter models for *Populus tremula* L. stands. *African Journal of Biotechnology*, 9(28). Retrieved from <https://www.ajol.info/index.php/ajb/article/view/82660>

Paguada, D. R. (2015). *Dinámica del crecimiento de Swetenia macrophylla y Carapa guianensis en bosques de la Región Autónoma del Caribe Norte de Nicaragua a través del enfoque dendroecológico: Una contribución al manejo forestal sostenible*. Costa Rica: CATIE.

Picard, N., Saint-André, L., & Henry, M. (2012). Manual de construcción de ecuaciones alométricas para estimar el volumen y la biomasa de los árboles. Francia-Italia: CIRAD-FAO. Retrieved from <http://www.fao.org/docrep/018/i3058s/i3058s.pdf>

Reyes, R., Rodríguez, N., Peña, E., & Bastidas, S. (2008). Crecimiento en vivero de materiales comerciales de palma aceitera (*Elaeis guineensis* Jacq.) en Tumaco, Colombia. *Ciencia y Tecnología Agropecuaria*, 9(2), 12–18. doi: 10.21930/rcta.vol16\_num2\_art:370

Sánchez, G., F., & Gutiérrez, S. J. L. (2020). La alometría, una ley de potencias ubicua en la estructura de los seres vivos. *Interdisciplina*, 8(20), 11–22. doi: 10.22201/ceich.24485705e.2020.20.71181

- SAS Institute Inc. (2013). Statistical Analysis System, versión 4. Cary, NC, USA: Author.
- Sharma, R. P., & Breidenbach, J. (2015). Modeling height-diameter relationships for Norway spruce, Scots pine, and downy birch using Norwegian national forest inventory data. *Forest Science and Technology*, 11(1), 44–53. doi: 10.1080/21580103.2014.957354
- Suatunce, P., Díazl, T. G., & García, L. (2009). Crecimiento de especies arbóreas tropicales en la colección de la Universidad Técnica Estatal de Quevedo. *Ciencia y Tecnología*, 2(2), 21–27. doi: 10.18779/cyt.v2i2.37
- Tonini, H., Arco-Verde, M. F., & Sá, S. P. P. (2005). Dendrometria de espécies nativas em plantios homogêneos no estado de Roraima: andiroba (*Carapa guianensis* Aubl), castanha-do-Brasil (*Bertholletia excelsa* Bonpl.), ipê-roxo (*Tabebuia avellanedae* Lorentz ex Griseb) e jatobá (*Hymenaea courbaril* L.). *Acta Amazonica*, 35(3), 353–362. doi: 10.1590/s0044-59672005000300008