



## RESEARCH ARTICLE

### Allometric models to estimate the volume of *Guazuma crinita* in forest plantations

Modelos alométricos para estimar el volumen de madera de *Guazuma crinita* en plantaciones forestales

Jorge Manuel Revilla Chávez<sup>1,\*</sup> ; Carlos Abanto-Rodríguez<sup>2</sup> ; Wilson Francisco Guerra Arévalo<sup>2</sup> ; Diego García Soria<sup>2</sup> ; Héctor Guerra Arévalo<sup>2</sup> ; Gilberto Domínguez Torrejón<sup>3</sup> ; Ignacio Lund Gabriel da Silva Carmo<sup>4</sup> 

<sup>1</sup> Instituto de Investigaciones de la Amazonia Peruana (IIAP), Dirección de Investigación en Diversidad Biológica Terrestre Amazónica (DBIO), Yarinacocha, Ucayali. Peru.

<sup>2</sup> Instituto de Investigaciones de la Amazonia Peruana (IIAP), Dirección de Investigación en Manejo Integral del Bosque y Servicios Ecosistémicos (BOSQUES), Yarinacocha, Ucayali. Peru.

<sup>3</sup> Universidad Nacional Agraria la Molina (UNALM), Escuela de Posgrado (EPG), La Molina, Lima. Peru.

<sup>4</sup> Universidade Federal de Roraima (UFRR), Programa de Pós-graduação em Agronomia (POSAGRO), Boa Vista, Roraima. Brazil.

\* Corresponding author: [jrevilla@iiap.gob.pe](mailto:jrevilla@iiap.gob.pe) (J. Revilla).

Received: 10 July 2020. Accepted: 9 January 2021. Published: 8 February 2021.

#### Abstract

The use of allometric equations in the estimation of the commercial volume of wood allows to plan the management Forestry In that sense, the objective in this work was to select the best allometric models to estimate the volume of wood in *G. crinita* trees, for this, trees between 13.09 m high and 10.58 cm DAP were used on average. For the determination of the best model, the highest adjusted coefficient of determination  $R^2$  ( $> R^2_{Aj}$ ), lower coefficient of variability ( $< CV\%$ ) and lower Furnival index (IF) were considered. Of the 17 existing allometric models for forest species, two were suitable, the model:  $\ln(V) = a + b \ln(D)$  ( $R^2 = 0.93$ ,  $CV = 11.93\%$ ,  $IF = 0.003444$ ) and the model that uses the combined variable Log:  $\ln(V) = a + b \ln(D^{2*H})$  ( $R^2 = 0.91$ ,  $CV = 11.93\%$ ,  $IF = 0.003444$ ), likewise, a third model proposed in this study:  $\ln(V) = a + b \ln(D^2) + c \ln(D * H) - d \ln(D^{2*H})$  ( $R^2 = 0.98$ ,  $CV = 11.93\%$ ,  $IF = 0.003444$ ), also presented the best fit to estimate the commercial volume of *G. crinita* at 31 months of age. However, the use of the Husch model is recommended, as it is easy to apply, since it only uses the diameter at chest height (DBH) as an independent variable.

**Keywords:** agroforestry; bolaina blanca; predictive model; demonstration plots; forestry; commercial volume.

#### Resumen

El uso de ecuaciones alométricas en la estimación del volumen comercial de madera permite planificar el manejo silvicultural. En ese sentido, el objetivo en este trabajo fue seleccionar los mejores modelos alométricos para estimar el volumen de madera en árboles de *G. crinita*, para ello, fueron utilizados árboles entre 13,09 m de altura y 10,58 cm de DAP en media. Para la determinación del mejor modelo fueron considerados el mayor coeficiente de determinación  $R^2$  ajustado ( $> R^2_{Aj}$ ), menor coeficiente de variabilidad ( $< CV\%$ ) y menor índice de Furnival, (IF). De los 17 modelos alométricos existentes para especies forestales, dos fueron adecuados, el modelo:  $\ln(V) = a + b \ln(D)$  ( $R^2 = 0,93$ ,  $CV = 11,93\%$ ,  $IF = 0,003444$ ) y el modelo que utiliza la variable combinada Log:  $\ln(V) = a + b \ln(D^{2*H})$  ( $R^2 = 0,91$ ,  $CV = 11,93\%$ ,  $IF = 0,003444$ ), así mismo, un tercer modelo propuesto en este estudio:  $\ln(V) = a + b \ln(D^2) + c \ln(D * H) - d \ln(D^{2*H})$  ( $R^2 = 0,98$ ,  $CV = 11,93\%$ ,  $IF = 0,003444$ ), también presentó el mejor ajuste para estimar el volumen comercial de *G. crinita* a los 31 meses de edad. Con todo, se recomienda el uso del modelo de Husch, por ser de fácil aplicación, puesto que utiliza apenas el diámetro a la altura del pecho (DAP) como variable independiente.

**Palabras clave:** agroforestería; bolaina blanca; modelo predictivo; parcelas demostrativas; silvicultura; volumen comercial.

DOI: <https://dx.doi.org/10.17268/sci.agropecu.2021.003>

#### Cite this article:

Revilla, J., Abanto-Rodríguez, C., Guerra, W., García, D., Guerra, H., Domínguez, G., & Carmo, I.L.G. (2021). Modelos alométricos para estimar el volumen de madera de *Guazuma crinita* en plantaciones forestales. *Scientia Agropecuaria*, 12(1), 25-31.

## 1. Introducción

Bolaina blanca (*Guazuma crinita* Mart, Meliaceae) es una especie forestal maderable de rápido crecimiento que se desarrolla en bosques aluviales de la Amazonía Peruana (Tuisima-Coral et al., 2020). Posee excelentes propiedades físicas, mecánicas y estéticas, razón por la cual viene siendo utilizada en la obtención de madera rolliza y aserrada para la fabricación de parihuelas, cajonería, laminado, juguetería, palos de fósforo, paletas de consultorios médicos, chupetes, palitos de helados, artesanía, tableros contrachapados, entre otros (IIAP, 2009; Basauri et al., 2019). También, se la usa para construcción y revestimiento de viviendas y obtención de pulpa para papel (Reynel et al., 2003). *G. crinita* se distribuye desde Centroamérica hasta el sur de Brasil, Bolivia y Perú. En el Perú, se encuentra en mayor porcentaje en las regiones de Loreto, Amazonas, Ucayali, Huánuco, San Martín, Madre de Dios, Junín y Cerro de Pasco (Reynel et al., 2003).

En el Perú, la producción de madera rolliza de *G. crinita* se ha incrementado significativamente entre los años 2004 y 2017, pasando de 23110 m<sup>3</sup> a 56693,15 m<sup>3</sup>, respectivamente, resultado de la alta demanda en el mercado (SERFOR, 2017). Sin embargo, esta producción de madera aún está lejos de satisfacer los requerimientos de los compradores, pues la FAO (2018) señala que, solamente para el rubro de parihuelas o pallets se estima un requerimiento anual de 379440 m<sup>3</sup> de madera rolliza y para el año 2020 la demanda ascendería para 534272 m<sup>3</sup>. En tal sentido, *G. crinita*, en el año 2018 solo representó el 14% del requerimiento total, siendo el 86% representado por pino (importado) y otras maderas tropicales con menor valor comercial agrupadas bajo el nombre de "roble" (FAO, 2018).

Según lo citado, existe una demanda insatisfecha de madera rolliza de bolaina blanca, por lo que se teme una sobre explotación de los rodales naturales. Al respecto, Casas et al. (2016) mencionan que la extracción selectiva y la sobre explotación forestal puede provocar erosión genética y pérdida de la regeneración natural por la eliminación de los árboles semilleros, generando en el corto y mediano plazo la fragmentación de los rodales naturales y la disminución de los ciclos de aprovechamiento.

Frente a esta situación, es necesario buscar y utilizar métodos que permitan desarrollar, establecer y conducir un adecuado plan de manejo forestal. De este modo, una de las primeras acciones a ser realizada, es la determinación del stock de volumen de maderas comerciales, puesto que es considerado una de las informaciones básicas para planificar el manejo silvicultural (Correia et al., 2017). En ese sentido, para cuantificar el volumen de un árbol o de un bosque es necesario la utilización de modelos directos e indirectos (Mota & Silva, 2009).

Entre los métodos directos para calcular el volumen, diversas fórmulas son empleadas, siendo, Newton, Huber, Doyle y Smalian las más utilizadas (Prodán et al., 1997; Gutiérrez et al., 2013; Francez et al. 2017; Correia et al., 2017 y Hernández-Ramos et al. 2018). Sin embargo, Gutiérrez et al. (2013) refieren que Smalian es muy poco

práctico y utilizado en el campo, con relación a Doyle su uso se reduce para lugares en que los árboles son de gran tamaño. Además, tienen el inconveniente de aplicarse en madera en trozas previamente taladas, lo que en ocasiones resulta en pérdidas económicas, pues el costo de obtención del volumen comercial en bosques nativos es alto (Finger, 1992).

En contrapartida, la utilización de los métodos indirectos minimiza estos hechos y pueden además ser utilizados en grandes extensiones tanto de bosques y plantaciones forestales. Entre los métodos indirectos, los modelos alométricos son una excelente alternativa, consisten en ecuaciones matemáticas que estudian la relación de la variación de las características físicas o fisiológicas con el tamaño del organismo, en ese sentido, en el área forestal estudia la relación entre el tamaño y la forma de los árboles, arbustos y palmeras (Begon et al., 1986). De este modo, el método alométrico, permitirá estimar el volumen, biomasa y carbono a través de algunas variables de fácil medición tales como el DAP y/o la altura total con menor costo, mayor precisión, rapidez y rigor en las mediciones (Segura & Andrade 2008; Mota & Silva, 2009). En la Amazonía Peruana, la mayoría de las investigaciones que se han desarrollado para *G. crinita* utilizando ecuaciones alométricas han sido para la determinación de la biomasa y captura de CO<sub>2</sub> y muy pocas para determinar el volumen de madera en plantaciones. Así mismo, en la literatura existen varios modelos alométricos (lineares, no lineares, simples y múltiples) para estimar el volumen, la biomasa y la cantidad de carbono en los árboles, no obstante, los modelos alométricos desarrollados en regiones diferentes presentan limitaciones debido a las distintas condiciones que rigen el crecimiento de los árboles como el factor genético, clima y suelos (Álvarez, 2008). En este contexto, el objetivo en este trabajo fue obtener modelos alométricos para estimar el volumen de madera de *G. crinita* en plantaciones forestales en la cuenca del río Aguaytía, región Ucayali, Perú.

## 2. Materiales y métodos

### Área de estudio

Este estudio fue realizado en plantaciones forestales de *G. crinita* establecidas en dos localidades de la cuenca del río Aguaytía, región Ucayali, Perú (Figura 1). La primera corresponde al distrito Curimana donde fueron colectadas muestras de tres parcelas, localizadas en las coordenadas UTM-WGS 84 (E498937, N9051877; E488915, N906493 y E497902, N9034396); la segunda, corresponde al distrito de Irazola, en donde fueron colectadas muestras de 4 parcelas localizadas en las coordenadas UTM: WGS 84: E487388, N9022150; E487362, N9021936; E486621, N9021206 y E472462, N9024201).

De acuerdo a la clasificación de Holdrige, las áreas se encuentran ubicadas en dos zonas de vida, siendo: Bosque húmedo Pre-montano Tropical (bh-PT) y Bosque húmedo Tropical (bh-T), respectivamente. La temperatura media, humedad relativa y precipitación pluviométrica es de 26 °C, de 85% a 100% y de 1400 a 2500 mm año<sup>-1</sup>, respectivamente (Ugarte y Domínguez, 2010; SENAMHI, 2016) (Figura 1).

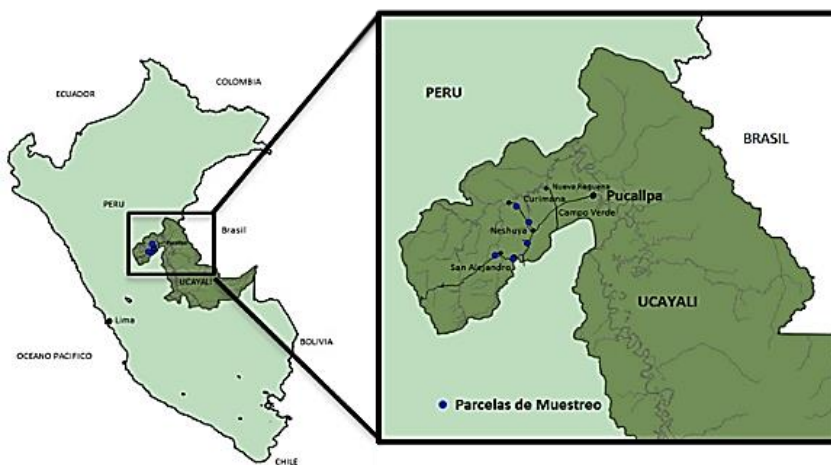


Figura 1. Ubicación del área de estudio.

**Material vegetal de estudio**

Fueron utilizados árboles de *G. crinita* de 13,09 m de altura y 10,58 cm de DAP (diámetro medido a la altura del pecho) en promedio, procedentes de plantaciones establecidas por el Centro Internacional de Investigación Agroforestal (ICRAF) en el año 2001 a una densidad de 1600 árboles ha<sup>-1</sup>. En los primeros dos años las plantaciones de *G. crinita* recibieron oportunamente prácticas manuales de control de malezas, así mismo los caminos de acceso fueron mantenidos adecuadamente para permitir el acceso de los trabajadores. Por otro lado, al tercer año de haber realizado el trasplante, la parcela recibió tratamiento silvicultural de raleo, siendo que 50% de los árboles fueron talados para favorecer el crecimiento y desarrollo de los 800 individuos restantes. Los trabajos de muestreo de árboles y colecta de datos fueron realizados en sectores de fácil acceso por razones logísticas y económicas. En las parcelas fueron seleccionados 38 árboles después de 31 meses de haber instalado las parcelas de *G. crinita*, la distribución de las clases diamétricas se muestra en la **Tabla 1**. Los trabajos fueron realizados de acuerdo con la metodología de **Fucaraccio & Staffieri (1999)**, donde indican, que en estudios sobre desarrollo y uso de ecuaciones de volumen pueden ser utilizadas muestras entre 20 y 314 árboles (**Tabla 1**).

**Tabla 1**

Árboles muestreados por clase diamétrica DAP a 31 meses de edad

N°	Rango (DAP) cm	N°
1	8,40-9,64	5
2	9,65-10,88	16
3	10,89-12,12	11
4	12,13-13,36	4
5	13,37-14,60	2
Total		38

**Obtención de la ecuación alométricas (EA)**

Para la obtención de la ecuación alométrica, primero se determina el volumen de madera mediante la cubicación rigurosa de 38 árboles seleccionados y talados en cada una de las parcelas de *G. crinita*, utilizando el método utilizado por Smalian para la determinación del volumen de fustes, debido a su fácil aplicación en campo. La fórmula de Smalian calcula el volumen con base en la medición de los diámetros internos. De este modo,

inicialmente, fue medido el DAB (diámetro basal), DAP (diámetro a la altura del pecho) y la altura comercial (hc) de árboles comprendidos entre 8,40 y 14,60 cm de DAB, como se muestra en la **Tabla 2**.

**Tabla 2**

Variables dasométricas evaluadas de bolaina blanca (*Guazuma crinita*) a los 31 meses de edad para la determinación de volumen comercial de madera

N°	DAB (cm)	DAP (cm)	Altura comercial (m)	Volumen comercial (m <sup>3</sup> )
1	11,40	8,97	11,45	0,04706
2	15,50	12,90	13,65	0,08858
3	13,70	11,20	11,50	0,06736
4	13,30	11,00	11,05	0,06190
5	10,20	8,40	9,50	0,03083
6	15,20	12,00	16,25	0,08089
7	11,10	9,07	11,26	0,04133
8	12,50	10,00	16,03	0,05336
9	14,30	11,02	14,17	0,06445
10	14,10	10,87	11,14	0,06188
11	12,90	9,68	11,43	0,05322
12	16,10	12,60	16,65	0,09769
13	14,00	10,93	14,55	0,06730
14	15,20	12,03	16,16	0,08078
15	14,70	11,10	11,33	0,06700
16	11,60	9,05	17,73	0,05108
17	13,50	10,52	17,46	0,06163
18	11,80	9,43	10,70	0,04034
19	15,30	12,75	13,20	0,08221
20	12,90	9,68	11,43	0,05322
21	11,20	9,10	10,82	0,03915
22	13,10	10,35	15,39	0,05925
23	11,80	9,43	10,70	0,04034
24	13,70	11,20	11,50	0,06736
25	15,30	12,90	12,00	0,08320
26	11,80	9,43	10,70	0,04034
27	11,20	8,90	08,37	0,03365
28	12,50	10,00	16,03	0,05336
29	13,90	11,10	17,03	0,07359
30	17,30	14,60	19,75	0,13363
31	17,40	13,60	18,00	0,12299
32	13,20	11,10	13,95	0,07290
33	13,10	10,35	15,39	0,05925
34	12,50	10,00	16,03	0,05336
35	14,80	11,60	13,50	0,07965
36	10,50	8,85	11,96	0,04307
37	11,20	9,10	10,82	0,03915
38	12,60	9,90	13,72	0,05333
Prom.	13,30	10,65	13,48	0,06315
Desv.	1,80	1,48	2,78	0,02257
CV	13%	14%	21%	36%

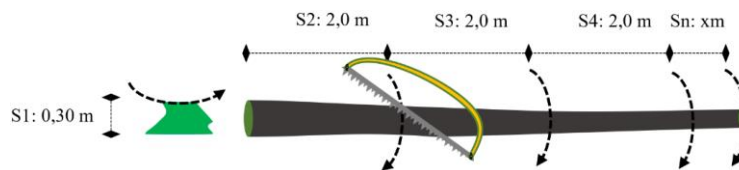


Figura 2. Secciones del fuste para determinación del volumen de madera.

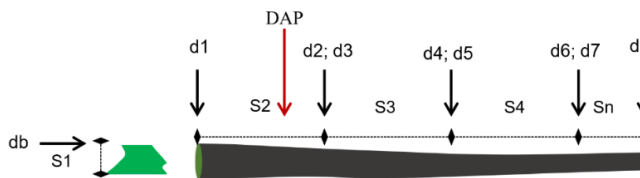


Figura 3. Medición de diámetros de las secciones del fuste.

Posteriormente, las ramas de los árboles talados a 30 cm de la base del suelo fueron separadas con la finalidad de medir la longitud con mayor facilidad y precisión. En seguida, los fustes fueron cortados en secciones (S<sub>i</sub>) de dos metros cada una, siendo la última de sección (S<sub>n</sub>) de longitud variable, y además para ser más precisos en el cálculo no fue considerado el ápice del árbol. Todos los cortes fueron realizados con una sierra tipo arco (Figura 2). En seguida, en cada sección fue realizada la medición de dos diámetros (d<sub>i</sub> y d<sub>ii</sub>) ubicados en cada extremo. Al mismo tiempo fue medido el DAP como diámetro adicional para el cálculo, las mediciones fueron realizadas con cinta diamétrica de 0,1 cm de precisión (Figura 3). Luego, fue calculado el volumen individualmente conforme la ecuación 1, propuesto por Silva et al. (1984) y Scolforo et al. (1998).

$$Vs = \frac{\pi}{4} \frac{d_i^2 + d_{ii}^2}{2} \times h_s \quad [1]$$

Donde Vs (muestra) es el volumen de la sección o troza (m<sup>3</sup>); π/4 es la constante 0,7854; d<sub>i</sub><sup>2</sup> es el diámetro inferior elevado al exponente 2 (m); d<sub>ii</sub><sup>2</sup> es el diámetro superior elevado al exponente 2 (m); h<sub>s</sub> es el largo de la sección o troza (m).

Posteriormente, el volumen total del fuste fue obtenido mediante la sumatoria de volúmenes de las secciones o trozas comerciales referidas, como muestra la ecuación 2.  $V_{csc} = \sum_{i=1}^n V_{sc}$  [2] Donde V<sub>csc</sub> es el volumen comercial del árbol (m<sup>3</sup>) y V<sub>sc</sub> es el volumen de las secciones comerciales.

### Algoritmos utilizados

Los algoritmos más utilizados en la determinación del volumen incluyen análisis de regresión lineal, no lineal, múltiple (Fernandes et al., 2017), método del vecino más próximo y recientemente, también, redes neurales artificiales (Cosenza et al., 2017); sin embargo, el análisis de regresión múltiple aún es la más utilizada para desarrollar modelos para estimar la biomasa (Fernandes et al., 2017). De este modo, para decidir el modelo a proponer en este estudio, se realizó una comparación con 18 modelos teóricos para la especie (Tabla 3). Posteriormente en cada uno de los modelos propuestos en la literatura y citados en el Tabla 3 se procedió a reemplazar los datos de las variables de la Tabla 2, con lo cual se generaron los modelos calculándose simultáneamente el R<sup>2</sup>, CV (%) y el índice de Furnival (IF).

Tabla 3

Modelo matemático propuesto en este estudio y modelos matemáticos tradicionales utilizados para estimar el volumen comercial de madera

N°	Ecuación de los modelos	Modelo (nombre)
1	$\ln(V) = a + b \ln(D^2) + c \ln(D*H) - d \ln(D^2*H)$	Propuesto en este estudio
2	$V = a + b(D^2) + c(H) + d(D^2*H)$	Stoate (1945)
3	$V = a + b(D^2) + c(D*H) + d(D^2*H)$	Meyer (1938)
4	$V = a + b(D)$	Berkhout (1920)
5	$V = a + b(D) + c(D^2)$	Hohenald-Krenn
6	$V = a + b(D^2)$	Kopezky-Gehrhardt
7	$\ln(V) = a + b \ln(D)$	Husch et al. (1972)
8	$V = a*dab^b$	Revilla & Dominguez (2015)
9	$V = a + b(D^2*H)$	Variable Combinada
10	$\ln(V) = a + b \ln(D^2*H)$	Variable Combinada Log.
11	$V/D^2*H = a + b(1/D^2*H) + c(1/H) + d(1/D^2)$	Otárola & Linares (2002)
12	$V/D^2*H = a + b(1/D^2*H) + c(1/H) + d(1/D)$	Otárola & Linares (2002)
13	$V/D^2 = a + b(1/D^2) + c(H/D^2) + d(H)$	Otárola & Linares (2002)
14	$V/D^2 = a + b(1/D^2) + c(H/D) + d(H)$	Otárola & Linares (2002)
15	$V/D^2 = a + b(1/D^2) + c(1/D)$	Otárola & Linares (2002)
16	$\ln(V) = a + b \ln(D) + c \ln(H)$	Schumacher-Hall (1933)
17	$V/D^2*H = a + b(1/D^2*H)$	Otárola & Linares (2002)
18	$V/D^2 = a + b(1/D^2)$	Otárola & Linares (2002)

Donde: V: volumen de madera; ln: logaritmo natural; a, b, c: coeficientes del modelo matemático; D: diámetro a la altura del pecho (cm); H: altura comercial (m).

Adicionalmente en este trabajo fue propuesto un modelo que consistió en obtener el logaritmo natural del volumen (ln (V)) a través de la suma, resta y multiplicación de los coeficientes con el logaritmo natural (ln), tanto del diámetro (D<sup>2</sup>), (D\*H) y del (D<sup>2</sup>\*H), tal como se muestra en la siguiente ecuación [3]:

$$\ln (V) = a + b \ln(D^2) + c \ln (D*H) - d \ln (D^2*H) \quad [3]$$

Finalmente, para la selección del modelo más adecuado, se tuvo en cuenta el coeficiente de determinación (R<sup>2</sup>), el CV y el índice de Furnival, siendo elegidos los modelos con mayor R<sup>2</sup> ajustado (> R<sup>2</sup>Aj), menor coeficiente de variabilidad (< CV%) y menor índice de Furnival (IF) (Philip, 1983; Guerra et al., 2008).

El coeficiente de determinación (R<sup>2</sup>) fue obtenido con el uso de la fórmula 4, donde R<sup>2</sup> asume valores que van desde 0 a 1.

$$R^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (\hat{y}_i - \bar{y})^2}{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2} \quad [4]$$

Para determinar el coeficiente de variabilidad se utilizó la fórmula 5:

$$CV = \frac{\sigma}{\bar{x}} \quad [5]$$

Donde σ es la desviación estándar y  $\bar{x}$  es el promedio.

Para determinar el índice de Furnival se utilizó la fórmula 6:

$$I = \frac{s}{\left[ f_n^1(v) \right]} \quad [6]$$

Donde S es la raíz del cuadrado medio residual o error y  $\left[ f_n^1(v) \right]$  es la media geométrica de la primera derivada de la variable dependiente con respecto al volumen.

Los cálculos matemáticos para obtener las ecuaciones fueron realizados con el programa estadístico INFOSTAT (Di-Rienzo et al., 2008), donde se relacionó el DAP, H y VC de los datos obtenidos del muestreo destructivo.

### 3. Resultados y discusión

De manera general los árboles de *G. crinita* presentaron a los 31 meses de edad diámetro basal promedio de 13,23 cm con valor mínimo y máximo de 10,2 y 17,4 cm, respectivamente, con desviación estándar de 17,95, el

DAP fue de 10,70 cm, con valor mínimo y máximo de 8,4 y 14,6 cm y con desviación estándar de 14,83, la altura comercial media fue de 13,48 m con valor mínimo y máximo de 8,37 y 19,75 m con desviación estándar de 2,78 y el volumen comercial fue de 0,06 m<sup>3</sup> con valor mínimo y máximo de 0,031 y 0,13 m<sup>3</sup> y desviación estándar de 0,023.

De esta manera, en la **Tabla 4** se presentan todos los modelos y sus respectivos índices y coeficientes que fueron generados con los datos colectados de *G. crinita* de 31 meses de edad. En ese sentido, los modelos que presentaron el mayor R<sup>2</sup> ajustado (R<sup>2</sup>Aj), menor coeficiente de variabilidad (CV%) y menor índice de Furnival (IF), fueron los modelos propuesto: ln (V) = a + b ln (D<sup>2</sup>) + c ln (D\*H) - d ln (D<sup>2</sup>\*H), el modelo 7 propuesto por **Husch et al. (1972)**: ln (V) = a + b ln (D) y el modelo 10 que utiliza la variable combinada Log: ln (V) = a + b ln (D<sup>2</sup>\*H). De otro lado, se observa que hubo otros modelos matemáticos que presentaron alto R<sup>2</sup> ajustado (R<sup>2</sup>Aj), sin embargo, no cumplieron los otros supuestos puesto que presentaron alto CV (%) y alto índice de Furnival (IF) (**Tabla 4**).

De acuerdo con los resultados, el modelo desarrollado y propuesto en este estudio: [(ln (V) = a + b ln(D<sup>2</sup>) + c ln (D\*H) - d ln (D<sup>2</sup>\*H))] y los modelos 7 propuesto por **Husch et al. (1972)**: ln (V) = a + b ln (D) y el modelo 10 que utiliza la variable combinada Log: ln (V) = a + b ln (D<sup>2</sup>\*H), fueron los que presentaron mejor ajuste para estimar el volumen comercial de *G. crinita* a los 31 meses de edad. Sin embargo, el uso del modelo de **Husch et al. (1972)**, posee la ventaja de ser práctico y económico de ser utilizado en campo por su fácil aplicación, puesto que utiliza apenas el diámetro a la altura del pecho (DAP) como variable independiente. Diversos trabajos de estimativa de biomasa realizados mencionan que la variable DAP presenta importancia superior en la selección de los modelos, por ser de fácil y rápida medición, además de presentar menor error de muestreo y menor costo comparado con la utilización en conjunto con la altura (**Lima et al., 2012; Melo et al., 2014**).

**Tabla 4**

Parámetros de precisión de las ecuaciones probadas y ajustadas para la estimar el volumen de madera comercial de *G. crinita* a los 31 meses de edad

N°	Ecuación de los modelos probados	Modelos (Nombre)	R <sup>2</sup> Aj	CV%	s	IF	Coeficientes			
							a	b	c	d
1	ln(V)=a+b ln(D <sup>2</sup> ) + c ln(D*H) - d ln(D <sup>2</sup> *H)	Propuesto en este estudio	0,98	11,93	0,33616	0,003444	0,79	6,07	10,85	10,49
2	V=a+b(D <sup>2</sup> )+c(H)+d(D <sup>2</sup> *H)	Stoate (1945)	0,97	35,74	0,02257	0,003662	-0,0048	4,01	0,000075	0,13
3	V=a+b(D <sup>2</sup> )+c(D*H)+d(D <sup>2</sup> *H)	Meyer (1938)	0,97	35,74	0,02257	0,003662	-0,01	4,15	0,0043	0,1
4	V=a+b(D)	Berkhout (1920)	0,94	35,74	0,02257	0,003662	-0,08	1,35		
5	V=a+b(D)+c(D <sup>2</sup> )	Hohenald-Krenn	0,94	35,74	0,02257	0,003662	-0,05	0,65	3,45	
6	V=a+b(D <sup>2</sup> )	Kopezky-Gehrhardt	0,94	35,74	0,02257	0,003662	-0,01	6,59		
7	ln(V)=a+b ln(D)	Husch (1972)	0,93	11,93	0,33616	0,003444	2,58	2,4		
8	V=a*dab^b	Revilla & Domínguez (2015)	0,93	35,74	0,0226	0,0037	0,00007589	2,582		
9	V=a+b(D <sup>2</sup> *H)	Variable Combinada	0,92	35,74	0,02257	0,003662	0,01	0,3		
10	ln(V)=a+b ln(D <sup>2</sup> *H)	Variable Combinada Log	0,91	11,93	0,33616	0,003444	-1,36	0,76		
11	V/D <sup>2</sup> *H=a+b(1/D <sup>2</sup> *H)+c(1/H)+d(1/D <sup>2</sup> )	Otárola & Linares (2002)	0,77	14,11	0,05781	0,009377	0,03	-0,02	5,2	0,0012
12	V/D <sup>2</sup> *H=a+b (1/D <sup>2</sup> *H)+c(1/H)+d(1/D)	Otárola & Linares (2002)	0,76	14,11	0,05781	0,009377	-0,01	-0,01	4,79	0,02
13	V/D <sup>2</sup> =a+b(1/D <sup>2</sup> )+c(H/D <sup>2</sup> )+d(H)	Otárola & Linares (2002)	0,59	10,18	0,54827	0,088942	4,19	-0,01	0,0036	0,1
14	V/D <sup>2</sup> =a+b(1/D <sup>2</sup> )+c(H/D)+d(H)	Otárola & Linares (2002)	0,59	10,18	0,54827	0,088942	4,44	-0,01	0,00038	0,1
15	V/D <sup>2</sup> =a+b(1/D <sup>2</sup> )+c(1/D)	Otárola & Linares (2002)	0,58	10,18	0,54827	0,088942	7,8	0,0014	-0,43	
16	ln(V)=a+b ln(D)+c ln(H)	Otárola & Linares (2002)	0,57	11,93	0,33616	0,003444	-3,97	0,53	0,9	
17	V/D <sup>2</sup> *H=a+b(1/D <sup>2</sup> *H)	Otárola & Linares (2002)	0,47	14,11	0,05781	0,009377	0,31	0,01		
18	V/D <sup>2</sup> =a+b(1/D <sup>2</sup> )	Otárola & Linares (2002)	0,27	10,18	0,54827	0,088942	6,5	-0,01		

Por otro lado, **García (1995)** señala que la mayoría de los modelos generados de predictibilidad son para ambientes específicos, sin embargo, estos también, pueden ser aplicados en condiciones similares. De este modo, el modelo propuesto en este estudio [ $\ln(V) = a + b \ln(D^2) + c \ln(D^*H) - d \ln(D^2*H)$ ] y el modelo 10 que utiliza la variable combinada Log:  $\ln(V) = a + b \ln(D^2*H)$ , también pueden ser utilizados para estimar el volumen comercial de *G. crinita* a los 31 meses de edad. **García (1995)** cita que los modelos pueden generarse a partir de una variable independiente como el diámetro (D), sin embargo, el mismo autor señala que, para una mejor predicción es recomendable el uso de más variables independientes. En ese sentido, después del diámetro (D), la variable altura es la más utilizada, puesto que el volumen está relacionado con la altura y con el DAP, dado que varía con la densidad del rodal, la edad, entre otros factores. Así, cuanto más variables independientes sean parte del modelo, este será más adecuado para la estimación del volumen de madera. Al respecto, **Lima et al. (2012)** y **Melo et al. (2014)** señalan que algunos investigadores notaron mayor eficiencia en el ajuste de los modelos al utilizar el DAP y la altura, por lo cual en algunos casos deben ser considerados.

Otro de los factores que contribuyó para obtener el mayor  $R^2_{aj}$  ajustado y menor CV% en el modelo propuesto y seleccionado para estimar el volumen de *G. crinita* fue el tamaño de la muestra utilizada. Resultados similares fueron determinados por **Mora & Hernández (2007)**, trabajando con la estimación del volumen en árboles de teca (*Tectona grandis*), el autor verificó elevada confiabilidad del modelo utilizando 22 árboles talados y seccionados. Del mismo modo, **Hernández-Herrera et al. (2014)** obtuvieron un modelo para estimar el volumen de madera a partir de 39 árboles de *Prosopis L.* de distintas dimensiones, sin ramas y ramillas.

Sin embargo, **Caillez (1980)** menciona que cuando se pretende determinar modelos matemáticos para estimar el volumen en bosques coetáneos y homogéneos, utilizando una variable independiente se puede incluir un número de 50 a 100 árboles. De otro lado, es importante señalar que, para la generación de ecuaciones alométricas es necesario utilizar métodos destructivos, lo que indica demanda de recursos financieros. En ese sentido, **Prodan et al. (1997)** recomiendan que por razones logísticas y económicas, en algunas ocasiones se debe concentrar la muestra en sectores de fácil acceso y representativos del área geográfica donde se aplicarán los modelos, y **Urbano et al. (2018)** coinciden en que algunos casos la estimación del volumen de rodales a través de modelos matemáticos por unidad de área es una forma precisa y más rápida que el método tradicional de estimar el volumen individual por árbol, siendo ventajoso para la reducción del trabajo de campo y el procesamiento de los datos y por lo tanto resulta en inventarios forestales con menor costo.

#### 4. Conclusiones

De los 18 modelos matemáticos tomados de la literatura, tres de ellos tuvieron desempeños satisfactorios; el modelo 1:  $\ln(V) = a + b \ln(D^2) + c \ln(D^*H) - d \ln(D^2*H)$ ; el modelo 7 propuesto por Husch:  $\ln(V) = a + b \ln(D)$  y

el modelo 10 que utiliza la variable combinada Log:  $\ln(V) = a + b \ln(D^2*H)$ , puesto que presentaron mejor ajuste para estimar el volumen comercial de *G. crinita* a los 31 meses de edad. No obstante, se recomienda el uso del modelo de Husch por ser de fácil aplicación, puesto que utiliza apenas el diámetro a la altura del pecho (DAP) como variable independiente.

#### Agradecimiento

Los autores agradecen al Instituto de Investigaciones de la Amazonía Peruana-IIAP y al Centro Mundial para la Agroforestería-ICRAF, por la logística y apoyo financiero. Así mismo, un agradecimiento especial a los Drs. Jonathan Cornelius, Miguel Pinedo y Víctor Gutiérrez, por sus valiosas contribuciones y asesoramiento durante la ejecución del presente trabajo de investigación.

#### ORCID

J. Revilla  <https://orcid.org/0000-0001-5978-5146>  
 C. Abanto  <https://orcid.org/0000-0001-7956-5482>  
 W. Guerra  <https://orcid.org/0000-0002-2887-1436>  
 D. García  <https://orcid.org/0000-0003-4912-9406>  
 H. Guerra  <https://orcid.org/0000-0001-5579-1995>  
 G. Domínguez  <https://orcid.org/0000-0002-7651-5284>  
 I. da Silva  <https://orcid.org/0000-0002-3941-0619>

#### Referencias bibliográficas

- Álvarez, G. (2008). Modelos alométricos para la estimación de biomasa aérea de dos especies nativas en plantaciones forestales del trópico de Cochabamba, Bolivia. Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza (CATIE). Escuela de Postgrado. Tesis Magister Scientiae en manejo y conservación de bosques naturales y biodiversidad. Turrialba, Costa Rica. 76 p.
- Basauri, Y. T., Guerra, A. W. F., Gorbitz, D. G. E., Lombardi, I.I., Guerra, A. H., Oliveira, E. M., Monteiro-Neto, J. L. L., Del Castillo, T. D., Rojas, M. K. C., & Abanto-Rodríguez, C. (2019). Enraizamiento de miniestacas de *Guazuma crinita* M. utilizando diferentes invernaderos, sustratos y aditivos. *Scientia Forestalis*, 47(124), 632-643.
- Begon, M., Harper, J. L., & Townsend, C. R. (1986). Ecology: individuals, populations, and communities. Oxford: Blackwell, 876 p.
- Berkhout, A. H. (1920). Het meten der boomen in verband met hun aanwas (mit deutscher Zusammenfassung). *Mededelingen van de Landbouwhogeschool Wageningen*, 17, 109-225.
- Caillez, F. (1980). Estimación del volumen forestal y predicción del rendimiento: con referencia especial a los trópicos, Estimación del volumen. Roma, Italia. FAO, 92 p.
- Casas, A., Torres-Guevara, J., & Parra, F. (2016). Domesticación en el continente americano, Universidad Nacional Autónoma de México, primera edición, 95 p.
- Correia, J., Fantini, A., & Piazza, G. (2017). Equações volumétricas e fator de forma e de casca para florestas secundárias do litoral de Santa Catarina. *Floresta e Ambiente*, 24, 1-12.
- Cosenza, D. N., Soares, A. A. V., Alcântara, A. E. M., Silva, A. A. L., Soares, R. R., Soares, V. P., & Leite, H. G. (2017). Classificação de sítio para povoamentos de eucalipto utilizando redes neurais artificiais baseada em variáveis ambientais e de manejo. *Cerne*, 23(3), 310-320.
- Di-Rienzo, J.A., Casanoves, F., Balzarini, M.G., Gonzales, L., Tablada, M., & Robledo, C.W. (2008). InfoStat, versión 2008. Grupo InfoStat, FCA, Universidad Nacional de Córdoba, Argentina.
- Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura-FAO. (2018). La industria de la madera en el Perú. 178 p.
- Fernandes, A. M. V., Gama, J. R. V., Rode, R., & Melo, L. O. (2017). Equações volumétricas para *Carapa guianensis* Aubl. E *Swietenia macrophylla* King em sistema silvipastoral na Amazônia. *Revista Nativa*, 1(5), 73 - 77.
- Finger, C. A. G. (1992). Medição de árvores: fundamentos de biometria florestal. Santa Maria: UFSM/CEPEF/FATEC. 269 p.
- Francez, L.M.B., Batista, F. J., Takehana, C. L. I., Barros, P. L. C., Souza, D. V., Corumbá, W. C., & Ramos, E.M.L.S. (2017). Manual para análise de inventário florestal e equação de volume em projetos de manejo florestal sustentável - PMFS. Secretaria de Estado de Meio Ambiente. Belém, 100 p.
- Fucaraccio, F. & Staffieri, G. M. (1999). Desarrollo y uso de ecuaciones de volumen y Cuadros de volumen en La República Argentina. Facultad de Ciencias Agrarias y Forestales, Universidad Nacional de la Plata. 27 p.



- García, O. (1995). Apuntes de Mensura Forestal, Universidad Austral de Chile- Facultad de Ciencias Forestales, Instituto de Manejo y Cátedra de Mensura Forestal, 66 p.
- Guerra, A. W. F., Soudre, Z. M. A., & Chota, I. M. (2008). Tabla de volumen comercial de Bolaina blanca (*Guazuma crinita* Mart.) de las plantaciones experimentales de Alexander Von Humboldt, Ucayali, Perú. Instituto de Investigaciones de la Amazonía Peruana - IIAP. *Folia Amazónica*, 17(1-2), 47-58.
- Gutiérrez, E., Moreno, R. & Rengifo, J. (2013). Guía de Madera de Cubicación de Madera, Colombia, Corporación Autónoma Regional del Risaralda – CARDER. 44 p.
- Hernández-Ramos, J., Hernández, R. A., García, C. X., Tamarit-Urias, C., Martínez-Angel, L., & Magana, J. G. (2018). Ecuaciones de volumen total y de razón para estimar el volumen comercial de *Swietenia macrophylla* King. *Colombia Forestal*, 21(1), 34-46.
- Hernández-Herrera, J., Valenzuela-Núñez, L., Flores-Hernández, A., & Ríos-Saucedo, J. (2014). Análisis dimensional para determinar volumen y peso de madera de mezquite (*Prosopis L.*). *Madera y Bosques*, 20(3), 55-161.
- Husch, B., Miller, C. H., & Beers, F. (1972). Forest mensuration. 2 ed. New York, USA: Ronald Press. 410 p.
- Instituto de investigación de la amazonia peruana-IIAP. (2009). Evaluación Económica de Parcelas de Regeneración Natural y Plantaciones de Bolaina Blanca "*Guazuma Crinita*", en el Departamento de Ucayali, 54 p.
- Lima, A. J. N., Suwa, R., Ribeiro, G. H. P. M., Kajimoto, T., Santos, J., Silva, R. P., Souza, C. A. S., Barros, P. C., Noguchi, H., Ishizuka, M., & Higuchi, N. (2012). Allometric models for estimating above- and below-ground biomass in Amazonian forests at São Gabriel da Cachoeira in the upper Rio Negro, Brazil. *Forest Ecology and Management*, 277: 163-172.
- Melo, L. C., Sanquetta, C. R., Corte, A. P. D., & Hentz, A. M. K. (2014). Estimativa de biomassa e carbono total para árvores de caixeta no Paraná. *Pesquisa Florestal Brasileira*, 34(77), 21-29.
- Meyer, W. H. (1938). Yield of Even-Aged Stands of Ponderosa Pine. United States Technical Bulletin, 32 p.
- Mora, F. A., & Hernández, W. (2007). Estimación del Volumen Comercial por Producto para Rodales de Teca en el Pacífico de Costa Rica. *Agronomía Costarricense*, 31(1), 101-112.
- Mota, C. G., & Silva, J. N. M. (2009). Determinação da equação de volume para árvores e para toras na área de Manejo Florestal da fazenda Santa Catarina, rio Anapú, município de Portel, Pará. In: Livro de resumos da 59 reunião da sociedade brasileira para o progresso da ciência (SBPC), SBPC. Belém, Pará.
- Otárola, E., & Linares-Bensimon, C. (2002). Tablas de volumen total y comercial de *Cedrelinga cateniformis* Ducke "tornillo" para plantaciones en Loreto Perú. *Folia Amazónica*, 13(1-2), 151-174.
- Phillip, M.S. (1983). Measuring trees and forest. A textbook written for students in Africa. Tanzania. The Division of Forestry. University of Dar-es-Salaam. 338 p.
- Prodán, M., Peters, R., Cox, F., & Real, P. (1997). Mensura Forestal. Serie Investigación y Educación en Desarrollo Sostenible. Proyecto IICA/GTZ sobre Agricultura, Recursos Naturales y Desarrollo Sostenible. San José, Costa Rica. 586 p.
- Revilla, J., & Domínguez, G. (2015). Viabilidad económica de plantaciones demostrativas de bolaina blanca (*Guazuma crinita* Mart.) en la cuenca del río Aguaytía Ucayali - Perú (Tesis de Maestría). Universidad Nacional Agraria La Molina, Lima.
- Reynel, C., Pennington, R. T., Pennington, T. D., Flores, C., & Daza, A. (2003). Árboles útiles de la Amazonia Peruana y sus usos: un manual con apuntes de identificación, ecología y propagación de las especies. Lima: Tarea Gráfica Educativa. 509 p.
- Schumacher, F. X., & Hall, F. S. (1933). Logarithmic expression of timber-tree volume. *Journal of Agricultural Research*, 47(9), 719-734.
- Scolforo, J. R. S., Rios, M. S., Oliveira, A. D., Mello, J. M., & Maestri, R. (1998). Acuracidade de equações de afilamento para representar o perfil de *Pinus elliottii*. *Cerne*, 4(1), 100-122.
- Segura, M., & Andrade, H. (2008). Como construir modelos alométricos de volumen, biomasa o carbono de especies leñosas perennes. *Agroforestería en las Américas*, 46, 89-96.
- Servicio Nacional de Meteorología e Hidrografía del Perú-SENAMHI. (2016). DANA "Nelson" origina nevadas en la sierra sur. Nota de Prensa. Servicio Nacional de Meteorología e Hidrografía del Perú.
- Servicio Nacional Forestal y de Fauna Silvestre -SERFOR. (2017). Anuario Forestal y de Fauna Silvestre, 2017. Ministerio de Agricultura y Riego, Perú. 124 p.
- Silva, J.N.M., Carvalho, J.O.P., Lopes, J. C.A., & Carvalho, M.S.P. (1984). Equações de volume para a Floresta Nacional do Tapajós. *Boletim de Pesquisa Florestal*, 8, 50-63.
- Stoate, T.N. (1945). The use of a volume equation in pine stands. *Australian Forestry*, 9, 48-52.
- Tuisima-Coral, L. L., Hlásná C. P., Weber, C. J., & Bohdan, L. (2020). Preliminary Evidence for Domestication Effects on the Genetic Diversity of *Guazuma crinita* in the Peruvian Amazon. *Forests*, 11(795), 1-12.
- Ugarte, L., & Domínguez, G. (2010). Índice de sitio (IS) de *Calycophyllum spruceanum* Benth. en relación con la altura dominante del rodal en ensayos de plantación en la cuenca del Aguaytía, Ucayali, Perú. *Ecología Aplicada*, 9(2), 101-111.
- Urbano, E., Machado, S. A., Figueiredo Filho, A., Sanquetta, C. R., & Zea-Camaño, J. D. (2018). Modelación del volumen de rodal para especies secundarias en bosques nativos de *Mimosa scabrella* en la región metropolitana de Curitiba, Paraná, Brasil. *Bosque*, 39(2), 227-237.