

MADRE DE DIOS CAPITAL DE LA BIODIVERSIDAD DEL PERÚ
UNIVERSIDAD NACIONAL AMAZÓNICA DE MADRE DE DIOS



FACULTAD DE INGENIERÍA

**DEPARTAMENTO ACADÉMICO DE INGENIERÍA FORESTAL Y MEDIO
AMBIENTE**

INFORME FINAL DE INVESTIGACIÓN:

**“Ecuaciones de volumen genéricas y específicas y factor de forma para
especies de densidad alta de bosques de Tahuamanu”**

INVESTIGADORES:

Dr. ROGER CHAMBI LEGOAS

Dr. GABRIEL ALARCON AGUIRRE

PUERTO MALDONADO – PERÚ

FEBRERO 2022

SUMARIO

RESUMEN.....	4
ABSTRACT	5
1. INTRODUCCIÓN.....	6
2. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	8
2.1. Formulación del problema.....	8
2.1.1. Problema general	9
2.1.2. Problemas específicos.....	9
2.2. Justificación e importancia	9
3. OBJETIVOS E HIPÓTESIS	10
3.1. Objetivo General.....	10
3.2. Objetivos específicos	10
3.3. Hipótesis	10
4. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA	11
5. MATERIAL Y MÉTODOS.....	13
5.1. Tipo de estudio.	13
5.2. Lugar de estudio.....	13
5.3. Muestreo	14
5.4. Procedimiento de recolección de datos.....	15
5.5. Desarrollo y evaluación de los modelos de regresión.	15
5.6. Determinación del Factor de Forma	16
5.7. Análisis de datos.....	16
6. CONCLUSIONES.....	21
7. RECOMENDACIONES.....	22
8. REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS	23

RESUMEN

Con el objetivo de determinar la ecuación de volumen y factor de forma más adecuado para la estimación del volumen del fuste comercial de *Myroxylon balsamum*, se muestrearon 120 árboles en los bosques de producción permanente de la provincia de Tahuamanu, en Madre de Dios, Perú. Se calculó el volumen real del fuste comercial de los árboles mediante el método de cubicación rigurosa, midiendo el diámetro a la altura del pecho (DAP) a cada 02 metros de altura, y la altura comercial. El volumen de cada sección fue calculado utilizando la fórmula de Smalian. Posteriormente se calcularon los coeficientes de varias funciones de volumen y los estadísticos de la calidad de ajuste. El factor de forma fue calculado relacionando el volumen real con el volumen del cilindro. Los resultados mostraron que la ecuación de volumen que mejor se ajustó fue la variable combinada generalizada: $V = -0.8758 + 5.93 \times 10^{-4} \times DAP^2 + 0.1135 \times H + 6.69 \times 10^{-6} \times DAP^2 \times H$, sin embargo, todas las funciones subestimaron ligeramente el volumen real en árboles de grandes diámetros y alturas. El factor de forma de *M. balsamum* fue de 0.74, que se asemeja a lo encontrado en otros estudios con especies de densidad alta.

Palabras claves: Regresión lineal; coeficiente mórfico; volumen del fuste; árboles tropicales.

ABSTRACT

In order to determine the most appropriate volume equation and shape factor for the estimation of the commercial stem volume of *Myroxylon balsamum*, 120 trees were sampled in permanent production forests in the province of Tahuamanu, Madre de Dios, Peru. The actual volume of the commercial stem of the trees was calculated using the method of rigorous cubing, measuring the diameter at breast height (DBH) at every 02 meters of height, and the commercial height. The volume of each section was calculated using the Smalian formula. Subsequently, the coefficients of various volume functions and the statistics of the quality of fit were calculated. The shape factor was calculated by relating the actual volume to the cylinder volume. The results showed that the best fitting volume equation was the generalized combined variable: $V = -0.8758 + 5.93 \times 10^{-4} \times \text{DAP}^2 + 0.1135 \times H + 6.69 \times 10^{-6} \times \text{DAP}^2 \times H$, however, all functions slightly underestimated the actual volume in trees of large diameters and heights. The shape factor of *M. balsamum* was 0.74, which is similar to that found in other studies with high density species.

Key words: Linear regression; Morphic coefficient; Stem volume; Tropical trees.

1. INTRODUCCIÓN

Los bosques tropicales lluviosos conforman los mayores tipos de vegetación en el mundo [1] y poseen gran diversidad de plantas, se calcula que contiene un 50% de todas las especies de plantas del mundo [2]; en Sudamérica ocupan el 37.3% del área total [3]. Actualmente en Perú los bosques amazónicos son todavía la mayor fuente de productos forestales, principalmente madera. Su aprovechamiento es una de las principales actividades económicas de las regiones amazónicas, siendo por tanto necesario el aprovechamiento sostenible del recurso forestal maderable. El manejo sostenible de los bosques tropicales requiere de herramientas, métodos, técnicas y modelos para que pueda funcionar; uno de los más importantes constituye la cuantificación de los recursos maderables disponibles para el aprovechamiento maderable, dentro de esta disciplina es primordial la disponibilidad de modelos alométricos que permitan estimar con precisión el volumen de madera de una o más especies de importancia comercial [4]–[6]. Además de esta utilidad los modelos alométricos o ecuaciones de volumen, son herramientas que auxilian en la estimación de biomasa, captura de carbono y valorización de los bosques en el contexto del cambio climático [5], [7], [8]. En Perú, investigaciones publicadas y accesibles, enfocadas al desarrollo de ecuaciones de volumen para árboles de especies comerciales tropicales en Madre de Dios, son prácticamente inexistentes, lo que corrobora el por qué hasta el momento el SERFOR (Servicio Nacional Forestal) continua recomendando el uso de un factor de forma de 0.65 para la mayoría de especies forestales comerciales [9]. Las especies forestales comerciales más abundantes y más aprovechadas son especies de densidad alta, como *Tabebuia serratifolia*, *Dipteryx micrantha*, *Apuleia leiocarpa* y *Miroxylum balsamun* (MINAGRI, 2014), estas especies poseen una densidad alrededor de 0.9 g.cm^{-3} [10], valiosas por su excelentes propiedades mecánicas para su uso en parquet, pisos, durmientes, columnas, etc. Además, las especies de densidad alta son de alto valor de conservación, debido a su lento crecimiento, fuente de hábitat y alimento para la fauna silvestre, siendo necesario su aprovechamiento sostenible. En este contexto, es relevante conocer con buena fiabilidad el volumen de aprovechamiento; en relación a esto, la estimación del volumen está siendo muy sesgado en la mayoría de las especies, debido

principalmente a la adopción de un factor de forma irreal y a la falta de ecuaciones de volumen. El error en el cálculo de volumen de madera del fuste conduce a serios errores en el cálculo del pago por derechos de aprovechamiento, así como problemas en la fiscalización y supervisión del volumen de madera autorizada vs producida y transportada debido a las grandes diferencias entre el volumen real y el volumen calculado. Las ecuaciones de volumen del fuste relacionan variables fácilmente medibles como el DAP y/o la Altura, los modelos de una entrada emplean sólo el DAP, y los modelos de dos entradas emplean el DAP y la Altura [11], pudiendo construirse ecuaciones de volumen específicas (para cada especie).

Los modelos para ecuaciones de volumen específicas. más empleados en especies tropicales ha sido el modelo de Schumacher-Hall de la forma: $V = \beta_0 + \beta_1 D^{\beta_2} H^{\beta_3} + \varepsilon$ donde β_0 , β_1 , β_2 y β_3 son los parámetros del modelo, V =Volumen comercial, D =DAP, y H =Altura del fuste, y ε =residual [4], y el modelo exponencial $V = \beta_1 X^{\beta_0}$ que para fácil empleo se ajusta a la forma lineal mediante transformación logarítmica $V = \beta_0 + \beta_1 D^2 H + \varepsilon$ [12]. El factor de forma del fuste, expresa el volumen real del árbol en relación al volumen del cilindro, es ampliamente utilizada en la estimación del volumen debido a la simplicidad del cálculo, con la sola aplicación de la fórmula “ $V=g \times h \times f$ ”, donde “ g ” es el área basal, “ h ” es la altura y “ f ” el factor de forma. En este contexto las ecuaciones de volumen y factor de forma son herramientas muy útiles en los inventarios forestales debido a que el volumen de la madera es la unidad básica de aprovechamiento forestal [13].

Un extenso y distribuido muestreo de individuos de *M. balsamum*, nos proveerá de datos ampliamente suficientes para la obtención de los mejores modelos para la estimación del volumen y factor de forma, de esta especie para los bosques del Tahuamanu.

2. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

2.1. Formulación del problema

La actividad forestal en bosques tropicales, para ser eficiente, necesita un profundo conocimiento de las especies comerciales presentes; dentro de ello resalta una rama al que poco interés se ha mostrado debido a la relativa complejidad en la toma de datos, esta es la dendrometría y/o dasometría, que nos permite saber la cantidad de madera, almacenamiento y secuestro de carbono de especies forestales y bosques, las cuales son fundamentales para la planificación del aprovechamiento forestal así como la valorización de los servicios ambientales del bosque. Conocer el volumen aproximado de madera con buena precisión permite la realización de POAS y PGMF's que verdaderamente muestren el volumen de extracción, lo que a su vez repercute en una mejor gestión de la Autoridad Forestal y los órganos de control y supervisión Forestal. Actualmente ocurren serias diferencias en el volumen autorizado y el volumen producido, que lleva a problemas de fiscalización por los órganos competentes, así como problemas en la real tasación por el volumen a aprovechar. En este primer contexto es sumamente relevante el desarrollo de ecuaciones que permitan predecir el volumen del fuste a partir de mediciones simples de DAP y Altura, de forma precisa, con mínimos errores, y la adopción de factores de forma más reales. Es conocido que la Autoridad Forestal todavía continúa recomendando la adopción del factor 0.65 como un factor de forma general para la mayoría de las especies forestal, la misma que es usada ampliamente por los usuarios forestales; la utilización de este factor de forma genera estimaciones de volumen muy imprecisas en muchas especies, debido la forma del árbol es una característica muy variable entre especies incluso entre individuos. Por tanto, este es un problema implicado directamente en la estimación del volumen, que requiere su estudio para cada especie comercial, e incluso en cada tipo de bosque, y en diferentes zonas geográficas de la Amazonía.

2.1.1. Problema general

¿Cuál es la ecuación de volumen y factor de forma obtenido a partir del DAP y de la Altura del fuste, para la estimación fiable del volumen de *M. balsamum* de los bosques de producción permanente en la provincia del Tahuamanu?

2.1.2. Problemas específicos

¿Cuál es la ecuación de volumen obtenido a partir del DAP y de la Altura del fuste, para la estimación fiable del volumen de *M. balsamum* de los bosques de producción permanente en la provincia del Tahuamanu?

¿Cuál es el factor de forma obtenido a partir del DAP y de la Altura del fuste, para la estimación fiable del volumen de *M. balsamum* de los bosques de producción permanente en la provincia del Tahuamanu?

2.2. Justificación e importancia

M. balsamum es una de las especies de madera de densidad alta más aprovechadas en Madre de Dios, principalmente en el Tahuamanu, investigaciones sobre ecuaciones de volumen y factor de forma de esta especie son muy escasas o inexistentes. Siendo la provincia de Tahuamanu la que contiene mayor extensión de bosques de producción permanente con alta presencia de esta especie, es necesario su estudio para mejores estimaciones del volumen y rendimiento, así como sustento para la adopción oficial de factores de forma reales para esta especie. Por otro lado, siendo especies de densidad alta y abundante, la captura de carbono por esta especie es también muy alta que otras especies de menor densidad y menor población; por tanto, la determinación de ecuaciones de volumen constituye en una herramienta indispensable para el cálculo de biomasa, carbono, y valorización de los bosques tropicales.

3. OBJETIVOS E HIPÓTESIS

3.1. Objetivo General

Desarrollar ecuaciones de volumen y determinar el factor de forma para *M. balsamum*, en los bosques naturales de la provincia de Tahuamanu

3.2. Objetivos específicos

Desarrollar ecuaciones para la estimación precisa del volumen comercial en árboles de *M. balsamum*.

Determinar el factor de forma del fuste de *M. balsamum*.

3.3. Hipótesis

H₁: En las ecuaciones obtenidas, el DAP y la altura de fuste explican más del 80% de la variación del volumen real en *M. balsamum*

H₃: El factor forma es mayor de 0.75 en *M. balsamum*

4. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

4.1. Marco teórico

4.1.1. Ecuaciones de volumen

Las ecuaciones de volumen son expresiones matemáticas que relacionan el volumen del árbol con sus atributos medibles tales como el diámetro a la altura del pecho (DAP) y/o la altura. Ellos son usados para estimar el volumen medio de árboles en pie de variadas dimensiones y especies [11]. En otras palabras, ellos dan un volumen medio de los árboles de dimensiones conocidas [14]. El volumen del tronco de un árbol es considerado como la función de variables independientes como DAP (D), altura (H) y factor de forma (F) [15]:

$$V = f(D, H, F)$$

Sin embargo generalmente las ecuaciones de volumen son construidas son incluir la forma del árbol [16].

Existen dos tipos de ecuaciones de volumen:

Ecuaciones de volumen local: Relacionan el volumen del árbol con sólo una variable independiente, generalmente el DAP, estas ecuaciones son de aplicación limitadas al área, en la que existe relación implícita del dap y la altura, y generalmente los individuos están en una cierta clase de edad y sitio [15]. Las ecuaciones comúnmente usadas incluyen:

Tabla 1. Tipos de ecuaciones de volumen local más comunes.

Tipo	Forma original	Parámetros
Relación lineal	$V=a+b \times \text{dap}$	a: Intercepto b: Pendiente
Relación lineal múltiple	$V=a+b \times \text{dap}+c \times \text{dap}^2$	a: Intercepto b,c: Pendiente
Relación lineal	$V=a+b \times \text{dap}^2$	a: Intercepto b: Pendiente

Relación curvilínea	$V=b \times dap^c$ $\text{Log } V=a'+b' \times \text{log } dap$	$a'=\text{log } b$: Intercepto $b'=\text{log } c$: Pendiente
---------------------	--	---

Ecuaciones de volumen Estándar: Estas ecuaciones incorporan más de una variable para la estimación del volumen, principalmente el dap y la altura total o comercial, y en algunos casos la forma del árbol. Son de aplicación más amplia que las locales, debido a que la relación dap/altura está explícita en el modelo, lo que facilita su uso para clases de edad y sitios diferentes. Generalmente estas ecuaciones se basan en los modelos siguientes:

Tabla 2. Tipos de ecuaciones de volumen estándar más comunes.

Tipo	Forma original	Parámetros
Relación lineal	$V=a+b \times dap^2 \times h$	a: Intercepto b: Pendiente
Relación lineal sin intercepto	$V=b \times dap^2 \times h$	b: Pendiente
Relación curvilínea	$V=b \times dap^c \times h^d$ $\text{Log } V=a'+b' \times \text{log } dap+c' \times \text{log } h$	$a'=\text{log } b$: Intercepto $b'=\text{log } c$: Pendiente $c'=\text{log } d$: Pendiente

5. MATERIAL Y MÉTODOS

5.1. Tipo de estudio.

La presente investigación es de tipo correlacional, porque tiene el propósito de explicar un fenómeno a partir de mediciones precisas de variables o eventos [17], y de tipo transversal, porque los métodos y técnicas a emplear se aplicarán una sola vez, es decir las variables se evaluarán una única vez en el tiempo [18].

5.2. Lugar de estudio.

El lugar de estudio, comprende los bosques naturales de la parcela de corta N° 14 de la Concesión Forestal Industrial Isabelita SAC, situada en el Distrito de Iñapari, Provincia de Tahuamanu, Región de Madre de Dios (Figura 1); la zona es de clima húmedo tropical, con temperatura media anual entre 22°C y 24°C y precipitación acumulada anual entre 2200 y 3000 mm [19].

El área de la concesión forestal, alberga bosques con gran potencial maderable; actualmente de estos bosques están extrayéndose árboles de especies comerciales en la parcela de corta N° 14, en base al Plan General de Manejo Forestal y el Plan Operativo Anual N° 14. El área muestreada es la parcela de corta N° 14 que tiene una superficie de 2522.24 ha (Figura 4), se encuentra entre las latitudes 8749251 y 8743889 N, y entre las longitudes 409060 y 413560 E. El área está conformada por bosques de colina baja fuerte con paca, bosque de colina baja suave con paca y bosque de terraza baja con paca. Cuenta con alto potencial maderable, abundando la especie *Apuleia leiocarpa* con 257 individuos, entre otras especies como *Dypterix sp*, *Miroxylom balsamun*, *Tabebuia sp*, *Amburana cearensis*, *Manilkara bidentata*, *Hymenaea sp*, etc.

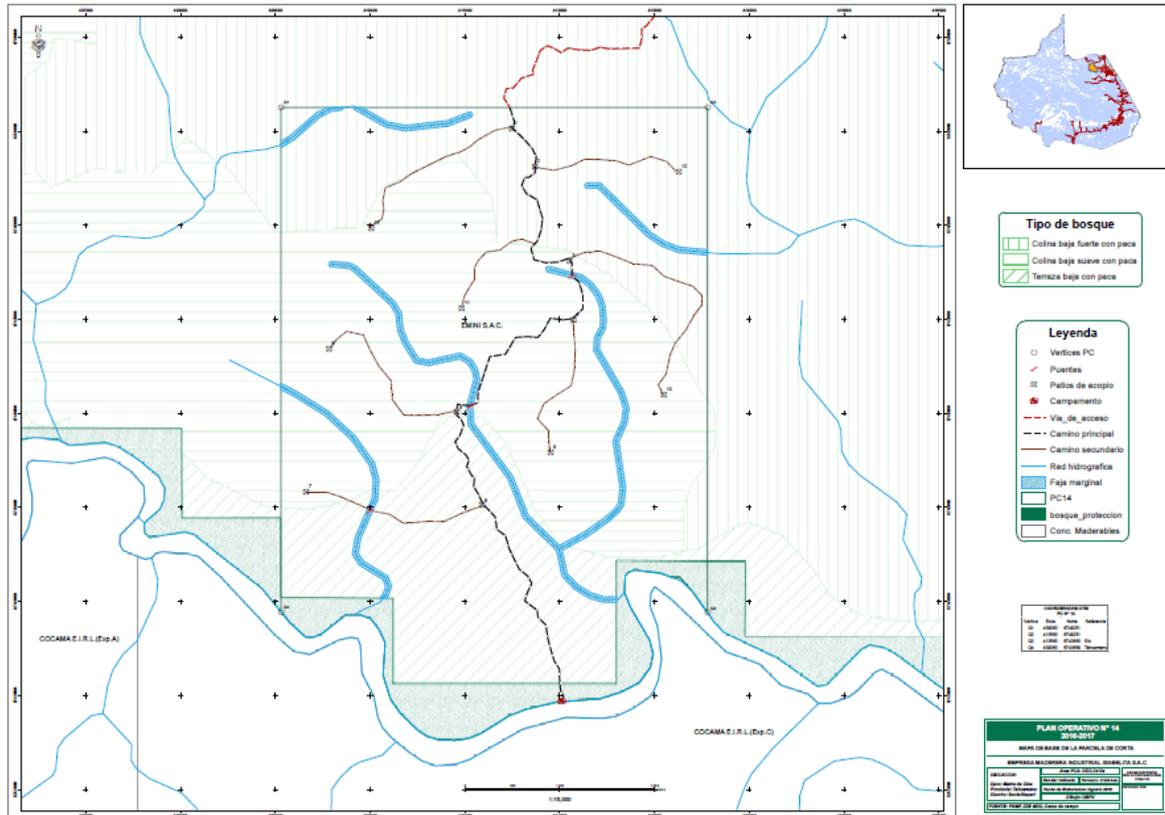


Figura 1. Mapa base de la Parcela de Corta N° 14-Concesión Forestal Industrial Isabelita SAC.

5.3. Muestreo

La muestra fue conformada por 100 árboles de *M. balsamum* aprovechables (DAP > 40 cm), seleccionadas al azar, tomando como base la información de ubicación y dimensiones de los árboles registrados en el censo forestal del POA 2016. El tamaño de muestra de 100 individuos es recomendable en estudios que busquen desarrollar ecuaciones de volumen representativas para una gran extensión de bosque [20].

Los individuos de la muestra fueron árboles de diversas clases diamétricas (a partir de 40 cm de DAP), cuyo número por cada clase diamétrica, fue proporcional, siendo definido en base a la información previa contenida en el POA 2016. Después de conocer el número de individuos por clase diamétrica, se procedió a la selección aleatoria con ayuda del mapa de dispersión de árboles del POA 2016.

5.4. Procedimiento de recolección de datos

En los árboles en pie se midieron el diámetro en el DAP (con corteza), Altura total, y Altura de fuste. Después de la tala de los árboles, se procedió a la medición del volumen mediante el procedimiento de cubicación rigurosa o también llamado cubicación por trozas sucesivas [11], [20], usando la fórmula de Smalian, para lo cual se mide el diámetro en la base de fuste cortado (la sección inmediata al tocón) y a partir de allí se mide el diámetro a cada 2 metros de longitud, hasta la sección superior del fuste apeado. Para descontar el volumen ocupado por la corteza, se midió el espesor de la corteza a la altura del DAP, posteriormente se calculó la proporción de volumen de la corteza, y se aplicó la proporción de descuento en cada sección [21].

5.5. Desarrollo y evaluación de los modelos de regresión.

El volumen de un árbol individual en pie se establece como: $V = f(\text{DAP}, \text{HT}, \text{F})$. Debido a que la forma de los árboles es difícil y costoso de obtener [14], el volumen es usualmente predicho a partir de modelos que consideran sólo el DAP y Altura del fuste (H) como variables independientes. En el presente estudio se usaron modelos de la forma:

$$V = a + b \times \text{dap}^2$$

$$V = a \times \text{dap}^b$$

$$V = a \times (\text{dap}^2 \times h)^b$$

$$V = a + b \times (\text{dap}^2 \times h)^c$$

$$V = a \times (\text{dap}^2 \times h)^b$$

$$V = a \times \text{dap}^b \times h^c$$

En los modelos no lineales estos serán linealizados (por ejemplo, con la transformación logarítmica).

Los mejores modelos se determinaron a partir del coeficiente de determinación y el error estándar de los estimados.

5.6. Determinación del Factor de Forma

El factor de forma expresa la relación entre el volumen real del fuste y el volumen del cilindro. Se calculó para cada individuo a partir del volumen obtenido por el método de cubicación rigurosa usando la fórmula de Smalian, DAP y H.

5.7. Análisis de datos

La construcción de las ecuaciones de volumen, así como los parámetros para su evaluación se realizaron usando el software SAS; se obtuvieron los mejores modelos (ecuaciones) minimizando el error, y tomando en cuenta su significancia ($p > 0.05$). El factor de forma fue determinando con ayuda de hojas de cálculo de Excel.

6. RESULTADOS Y DISCUSIONES

El DAP del conjunto de datos osciló entre 45.3 y 97.0 cm, y la altura comercial osciló entre 10.5 y 26.75 m. Hubo más variación en la altura comercial. El volumen comercial también varió ampliamente, siendo el mínimo y el máximo de 2.02 y 8.57 m³, respectivamente (Figura 2).

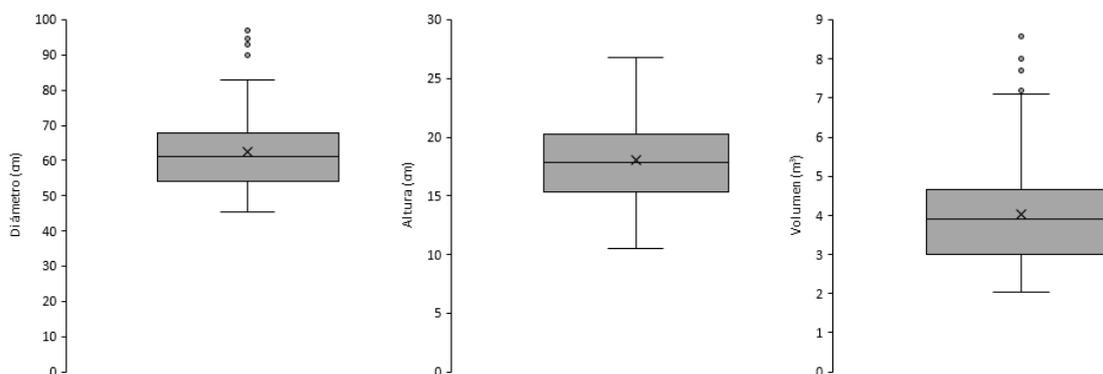


Figura 2. Diagramas de caja de las distribuciones de las dimensiones de los árboles muestreados.

Los coeficientes y los errores estándar asociados para las ecuaciones de volumen ponderado por grupo de especies se presentan en la Tabla 3. Los coeficientes de los modelos se comparan bien con lo que se ha reportado en otras regiones tropicales (por ejemplo, [4]).

A partir de la comparación entre las ecuaciones de regresión múltiple lineales y no lineales utilizados, basadas en la bondad de ajuste, es decir, el menor error estándar residual de la estimación (RSE), el mayor coeficiente de determinación múltiple ajustado (R^2_{adj}) y el menor valor de criterio de información de Akaike (AIC) indicó que la mejor ecuación de predicción para el volumen fue la ecuación de variable combinada generalizada: $V = -0.8758 + 5.93 \times 10^{-4} \times DAP^2 + 0.1135 \times H + 6.69 \times 10^{-6} \times DAP^2 \times H$ (Tabla 3), donde V es el volumen estimado, DAP es el diámetro a la altura del pecho, y H es la altura comercial.

Sin embargo, podemos notar que en general todas las ecuaciones testadas tuvieron un similar grado de ajuste, así entonces cualquiera de ellas podría ser usada como ecuación de volumen para *M. balsamum*.

En un estudio realizado también en Madre de Dios, Perú, el modelo que mejor se ajustó fue el modelo logarítmico de Schumacher, con un R^2 de 0.78 con un RSE de 0.815 [22].

Tabla 3. Coeficientes de las ecuaciones de volumen testadas, y sus respectivos valores de error estándar residual (RSE), coeficiente de determinación ajustado (R^2_{adj}), y criterio de información de Akaike.

Tipo	Ecuación	RSE	R^2_{adj}	AIC
Variable combinada de 1er grado	$V = 1.209 + 3.93 \times 10^{-5} \times DAP^2 \times H$	0.82	0.61	297.91
Variable combinada generalizada	$V = -0.8758 + 5.93 \times 10^{-4} \times DAP^2 + 0.1135 \times H + 6.69 \times 10^{-6} \times DAP^2 \times H$	0.81	0.62	296.63
Meyer modificada	$V = 2.167 - 0.08572 \times DAP + 0.00117 \times DAP^2 + 0.003068 \times DAP \times H - 1.28 \times 10^{-5} \times DAP^2 \times H$	0.82	0.62	298.47
Comprensiva	$V = -3.284 + 0.07696 \times DAP - 1.82 \times 10^{-5} \times DAP^2 - 0.006487 \times DAP \times H + 5.74 \times 10^{-5} \times DAP^2 \times H + 0.3184 \times H$	0.82	0.62	300.27
Naslund	$V = 0.1165 + 2.19 \times 10^{-4} \times DAP^2 + 4.88 \times 10^{-5} \times DAP^2 \times H + 0.0081 \times H^2 - 1.53 \times 10^{-4} \times DAP \times H^2$	0.81	0.62	297.75

Australiana de Stoot	$V = 0.2287 + 0.00046 \times \text{DAP}^2 + 2.3 \times 10^{-6} \times \text{DAP}^3 + 0.107 \times H - 10.41/H$	0.81	0.62	298.22
Variable combinada de 2do grado	$V = 1.25 + 3.82 \times 10^{-5} \times \text{DAP}^2 \times H + 6 \times 10^{-12} \times (\text{DAP}^2 \times H)^2$	0.83	0.61	299.90
Logarítmica de Schumacher	$V = 0.00153 \times \text{DAP}^{1.4977} \times H^{0.5801}$	0.82	0.62	297.33
Variable combinada logarítmica	$V = 0.00144 \times (\text{DAP}^2 \times H)^{0.71082}$	0.83	0.62	298.37

Las gráficas de residuos para las ecuaciones de volumen generalmente indican una distribución uniforme de los residuos por encima y por debajo de la línea cero, sin una tendencia sistemática (Fig. 3). Esto sugiere que los mínimos cuadrados ponderados son efectivos para estabilizar la varianza del error, y el uso del recíproco de DAP²H y/o DAP² como factor de ponderación en este estudio pareció ser apropiado para reducir la heterocedasticidad en todos los modelos.

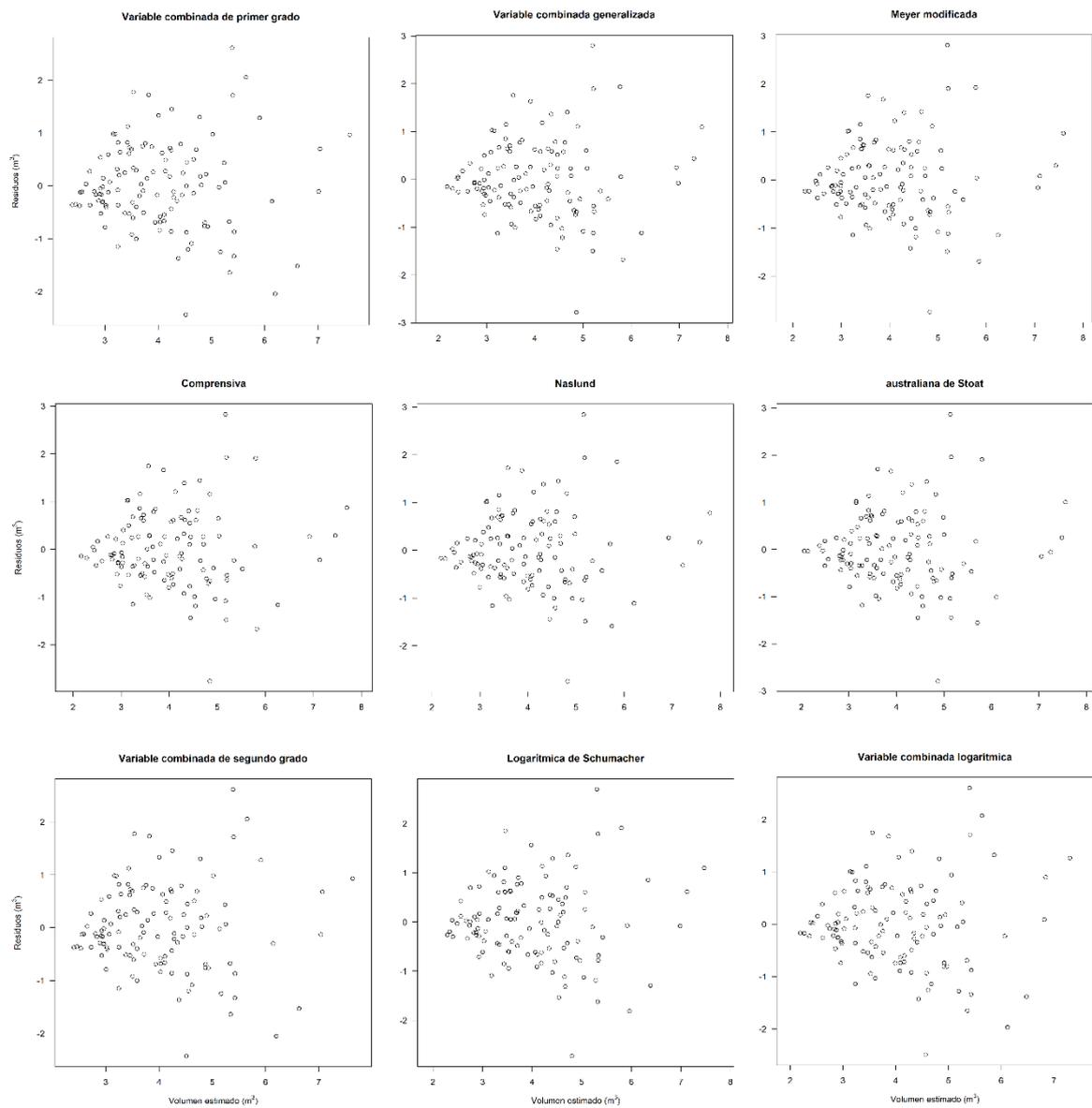


Figura 3. Gráfico de residuos por cada modelo.

Los gráficos de Estimados vs. Observados muestran que las predicciones de los volúmenes aplicando los modelos subestimaron el volumen real en árboles grandes (Figura 4).

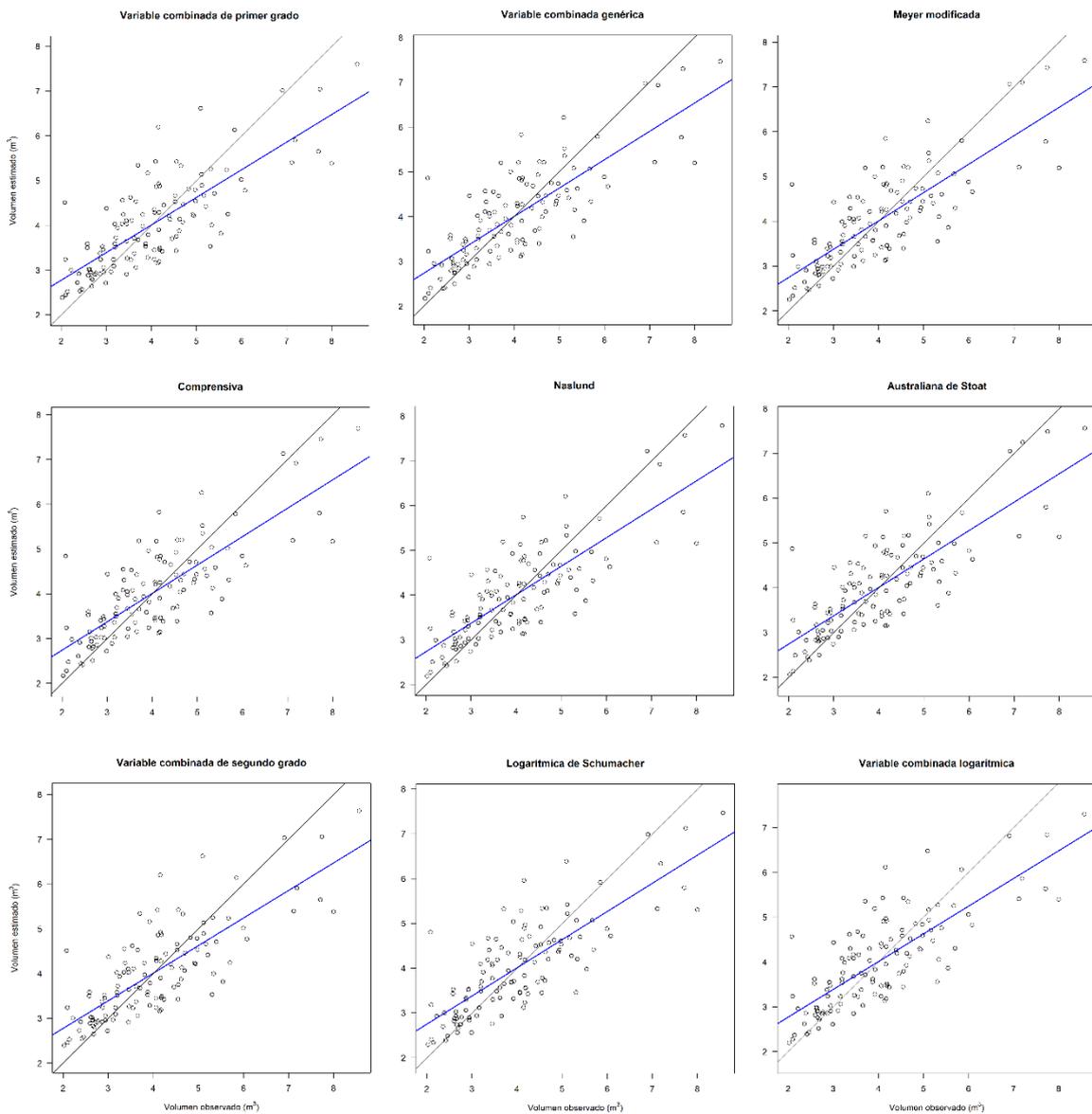


Figura 4. Volumen estimado vs. Volumen observado por modelo, muestra la subestimación del volumen real en árboles grandes.

El factor de forma de *M. balsamum* fue de 0.74 con un coeficiente de variación de 21.18% (Tabla 4 y Figura 5). Estos valores son similares a lo obtenido en otro estudio en Madre de Dios con la misma especie, con un factor de forma de 0.76 [22]. Otros estudios con otras especies de densidad alta encontraron valores ligeramente superiores, por ejemplo para *Manilkara bidentata* (quinilla) el factor de forma fue 0.82 [23], para *Dipteryx micrantha* el factor de forma fue de .0.79 [24].

Tabla 4. Factor de Forma

Media	Mediana	Coefficiente de variación
0.74	0.75	21.18%



Figura 5. Diagrama de caja de la distribución del factor de forma de *M. balsamum*.

6. CONCLUSIONES

La función de variable combinada generalizada: $V = -0.8758 + 5.93 \times 10^{-4} \times DAP^2 + 0.1135 \times H + 6.69 \times 10^{-6} \times DAP^2 \times H$, se desempeñó ligeramente mejor que las otras funciones de volumen con un R^2 de 0.62, sin embargo, todas las funciones subestimaron ligeramente el volumen real en árboles de grandes diámetros y alturas.

El factor de forma de *M. balsamum* fue de 0.74, que se asemeja a lo encontrado en otros estudios con especies de densidad alta.

Para estabilizar la varianza del error, se encontró que el recíproco de D^2H es el factor de ponderación apropiado para la función de volumen de dos variables.

7. RECOMENDACIONES

Las autoridades del sector forestal deben proceder a actualizar los factores de forma de las especies forestales que fueron ampliamente estudiadas (por ejemplo, *Dypterix sp*, *Hymenaea sp*, *Cedrela odorata*, *Swietenia macrophylla*). Los estudios en especies forestales de densidad alta generalmente encontraron factores de forma muy superiores comparados con los consignados por el SERFOR.

Se recomienda mayor investigación en la mayoría de especies que aún no cuentan con suficiente información sobre el factor de forma, para justificar el procedimiento de adecuación de los factores de forma de las especies forestales.

8. REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

- [1] T. C. Whitmore, "Canopy Gaps and the Two Major Groups of Forest Trees," *Ecology*, vol. 70, no. 3, pp. 536–538, Jun. 1989, doi: 10.2307/1940195.
- [2] P. Mayaux, P. Holmgren, F. Achard, H. Eva, H.-J. Stibig, and A. Branthomme, "Tropical forest cover change in the 1990s and options for future monitoring," *Philos. Trans. R. Soc. London B Biol. Sci.*, vol. 360, no. 1454, 2005.
- [3] FAO, "Global Ecological Zoning for the Global Forest Resources Assessment 2000," Roma, 2001. doi: 10.1016/S0264-8377(03)00003-6.
- [4] S. O. Akindele and V. M. LeMay, "Development of tree volume equations for common timber species in the tropical rain forest area of Nigeria," *For. Ecol. Manage.*, vol. 226, no. 1–3, pp. 41–48, 2006, doi: 10.1016/j.foreco.2006.01.022.
- [5] G. Guendehou, a Lehtonen, M. Moudachirou, R. Mäkipää, and B. Sinsin, "Stem biomass and volume models of selected tropical tree species in West Africa," *South. For. a J. For. Sci.*, vol. 74, no. 2, pp. 77–88, 2012, doi: 10.2989/20702620.2012.701432.
- [6] E. W. Mauya, W. A. Mugasha, E. Zahabu, O. M. Bollandsås, and T. Eid, "Models for estimation of tree volume in the miombo woodlands of Tanzania," *South. For. a J. For. Sci.*, vol. 76, no. 4, pp. 209–219, 2014, doi: 10.2989/20702620.2014.957594.
- [7] H. Bi and F. Hamilton, "Stem volume equations for native tree species in southern New South Wales and Victoria," *Aust. For.*, vol. 61, no. 4, pp. 275–286, 1998, doi: 10.1080/00049158.1998.10674752.
- [8] S. (Sandra L. . Brown and Food and Agriculture Organization of the United Nations., *Estimating biomass and biomass change of tropical forests : a primer*. Food and Agriculture Organization of the United Nations, 1997.
- [9] SERFOR, *RESOLUCIÓN DE DIRECCIÓN EJECUTIVA N° 046-2016-SERFOR-DE*. Perú: Servicio Forestal y de Fauna Silvestre, 2016, p. 90.

- [10] S. de Oliveira Araújo, B. Rocha Vital, B. Oliveira, A. de C. Oliveira Carneiro, A. Lourenço, and H. Pereira, "Physical and mechanical properties of heat treated wood from *Aspidosperma populifolium*, *dipteryx odorata* and *mimosa scabrella*," *Maderas. Cienc. y Tecnol.*, vol. 18, no. ahead, pp. 0–0, 2016, doi: 10.4067/S0718-221X2016005000015.
- [11] T. E. Avery and H. E. Burkhart, *Forest measurements*. McGraw-Hill, 2002.
- [12] V. A. J. Adekunle, K. N. Nair, A. K. Srivastava, and N. K. Singh, "Models and form factors for stand volume estimation in natural forest ecosystems: A case study of Katarniaghat Wildlife Sanctuary (KGWS), Bahraich District, India," *J. For. Res.*, vol. 24, no. 2, pp. 217–226, 2013, doi: 10.1007/s11676-013-0347-8.
- [13] J. N. Chaidez and J. de J. N. Chaidez, "ALLOMETRIC EQUATIONS AND EXPANSION FACTORS FOR TROPICAL DRY TREES OF EASTERN SINALOA, MEXICO," *Trop. Subtrop. Agroecosystems*, vol. 10, no. 1, pp. 45–52, 2008, Accessed: Nov. 25, 2016. [Online]. Available: <http://www.revista.ccba.uady.mx/ojs/index.php/TSA/article/view/5>.
- [14] A. Van Laar and A. Akça, *Forest mensuration*. Springer, 2007.
- [15] M. Prodan, R. Peters, F. Cox, and P. Real, *Mensura Forestal*. San Jose, Costa Rica: Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura, 1997.
- [16] S. O. Akindele, "Volume Functions for Common Timber Species of Nigeria's Tropical Rain Forests," 2005.
- [17] D. S. Behar Rivero, *Introducción a la metodología de la investigación*. Editorial Shalom, 2008.
- [18] A. A. Hernández Escobar, M. P. Ramos Rodríguez, B. M. Placencia López, B. Indacochea Ganchozo, A. J. Quimis Gómez, and L. A. Moreno Ponce, *Metodología de la investigación científica*, no. March. ÁREA DE INNOVACIÓN Y DESARROLLO, S.L., 2018.
- [19] GOREMAD, "Estudio de diagnóstico y zonificación para el tratamiento de la demarcación territorial de la provincia Tahuamanu-Volumen I," Puerto

Maldonado, 2010.

- [20] J. Rondeux and A. Díaz de Barrionuevo, *Medición de árboles y masas forestales*. Mundi Prensa, 2010.
- [21] P. L. Marshall and V. M. LeMay, "Introduction to Forest Mensuration and Photogrammetry." University of British Columbia, Vancouver, p. 166, 1990.
- [22] M. R. Huanca Choque and W. Camala Huaquisto, "Ecuaciones de volumen y factor de forma para la *Apuleia leiocarpa* (VOGEL) J.F. MACBR. y *Myroxylon balsamun* (L.) HARMS, en bosques naturales de Tahuamanu, Madre de Dios," Universidad Nacional Amazónica de Madre de Dios, Puerto Maldonado, 2021.
- [23] J. A. Estremadoyro, "Determinación del factor de forma o coeficiente mórfico de *Manilkara bidentata* (Quinilla colorada) en el consolidado Otorongo-Provincia de Tahuamanu," Universidad Nacional Amazónica de Madre de Dios, 2014.
- [24] D. Ovalle F, "Determinación del factor de forma de *Dipteryx micrantha* Harms (Shihuahuaco) en el consolidado Otorongo-Provincia de Tahuamanu," Universidad Nacional Amazónica de Madre de Dios, 2008.