

UNIVERSIDAD NACIONAL AMAZÓNICA DE MADRE DE
DIOS

FACULTAD DE INGENIERÍA

ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA FORESTAL
Y MEDIO AMBIENTE



TESIS

**“Coeficiente mórfico y funciones de volumen de *Myroxylon
balsamum* (L.) Harms y *Dipteryx spp.* en el Departamento de
Madre de Dios, Perú”**

**PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL DE INGENIERO FORESTAL Y
MEDIO AMBIENTE**

Presentado por:

Bach. CUENCA CRUZ DE TUESTA, Lindsay
Massiel

Bach. AMAU SALLO, Yeni

ASESOR:

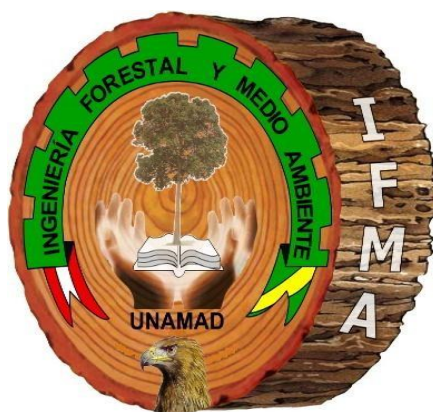
Dr. CHAMBI LEGOAS, Roger

Puerto Maldonado, junio 2026

UNIVERSIDAD NACIONAL AMAZÓNICA DE MADRE DE
DIOS

FACULTAD DE INGENIERÍA

ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA FORESTAL
Y MEDIO AMBIENTE



TESIS

**“Coeficiente mórfico y funciones de volumen de *Myroxylon
balsamum* (L.) Harms y *Dipteryx spp.* en el Departamento de
Madre de Dios, Perú”**

**PARA OPTAR EL TITULO PROFESIONAL DE INGENIERO FORESTAL Y
MEDIO AMBIENTE**

Presentado por:

Bach. CUENCA CRUZ DE TUESTA, Lindsay
Massiel

Bach. AMAU SALLO, Yeni

ASESOR:

Dr. CHAMBI LEGOAS, Roger

Puerto Maldonado, junio 2026

RST-RI_Coeficiente mórfico y funciones de volumen de Myroxylon balsamum (L.) Harms y Dipteryx spp. en el Departamento de Madre de Dios, Perú

INFORME DE ORIGINALIDAD

16%	16%	3%	1%
INDICE DE SIMILITUD	FUENTES DE INTERNET	PUBLICACIONES	TRABAJOS DEL ESTUDIANTE

FUENTES PRIMARIAS

1	repositorio.unamad.edu.pe	15%
	Fuente de Internet	
2	docslide.us	1%
	Fuente de Internet	

Excluir citas	Activo	Excluir coincidencias	< 1%
Excluir bibliografía	Activo		

DEDICATORIA

El presente estudio es en agradecimiento a “Dios” por ser mi fortaleza en todo momento. Seguidamente, a mis padres CESAR AUGUSTO CUENCA CHUQUIMIA y LUZ MAGDALENA CRUZ CHAVEZ, a quienes les debo todo lo que soy, por su amor y valores me dieron la mejor educación; por ser el motivo y el pilar fundamental en mi vida, sobre todo responsabilidad en todos los aspectos. Finalmente, a mis HERMANOS, a mi ESPOSO JAIME FERNANDO TUESTA VASQUEZ y a MIS HIJOS ANGELINA LINDSAY TUESTA CUENCA y JOHN JAIME TUESTA CUENCA son el amor de mi vida por brindarme todo su amor, cariño y apoyo incondicional para seguir adelante.

Lindsay Massiel Cuenca Cruz de Tuesta

Dedico esta tesis en primer lugar a mis padres por darme amor, valores, motivación, fuerzas para seguir adelante y la mejor educación que estuvo a su alcance. Les debo toda mi gratitud; sin ellos no hubiera alcanzado uno de mis sueños. Y finalmente a mis hermanas por sus consejos y ánimos para seguir adelante.

Yeni Amau Sallo

AGRADECIMIENTOS

A nuestros padres, quienes se esforzaron por darnos una buena educación, para poder desarrollar esta investigación, donde también fuimos apoyadas por nuestros hermanos y nuestro asesor por impulsarnos a continuar y no dejar que nos desmotiváramos en el camino y así poder culminar la tesis.

A la Universidad Nacional Amazónica de Madre de Dios – UNAMAD por acogernos y formar de nosotras buenas profesionales, en especial a todos los docentes que nos formaron durante el trayecto.

A la Concesión Forestal EMINI SAC (Contrato N° 17-TAH/C-J-019-02), la concesión forestal EMINI SAC está localizada en el Distrito de Iñapari, Provincia de Tahuamanu, Departamento de Madre de Dios, por permitirnos realizar nuestra investigación.

PRESENTACIÓN

El presente trabajo de tesis se presenta como parte de los requisitos para la obtención del título profesional de Ingeniero Forestal y Medio Ambiente de la Universidad Nacional Amazónica de Madre de Dios. La investigación tuvo como propósito determinar el coeficiente mórfico de *Myroxylon balsamum* y *Dipteryx spp.*, así como desarrollar funciones de volumen, para la estimación precisa del volumen comercial maderable de estas especies. La propuesta se fundamenta en la necesidad de contar con modelos confiables para la estimación del volumen de *M. balsamum* y *Dipteryx spp.* en los bosques naturales de Tahuamanu; de tal forma que sirvan como herramienta para el desarrollo de planes de manejo que muestren volúmenes reales de las especies, así como para referencia de la autoridad forestal, para un mejor control y fiscalización de los volúmenes autorizados.

RESUMEN

Con el objetivo de determinar el coeficiente mórfico y desarrollar funciones de volumen del fuste de árboles de *Myroxylon balsamum* y *Dipteryx spp.*, se realizaron mediciones sucesivas del diámetro en 120 árboles apeados de cada especie, en bosques de una concesión forestal ubicada en la provincia de Tahuamanu, departamento de Madre de Dios, Perú. A partir de esas mediciones se calculó el volumen real del fuste comercial de cada árbol para obtener el coeficiente mórfico, y se probaron funciones de volumen, seleccionándose la de mejor ajuste estadístico. Los resultados indicaron que el coeficiente mórfico de *M. balsamum* fue de 0,73, y el de *Dipteryx spp.* fue de 0,81; mientras que la mejor función de volumen de *M. balsamum* fue la Logarítmica de Schumacher (RSE = 0.67, R^2 adj = 0.75, y AIC = 246.43): $V = 0.0008417 \times DAP^{1.5741325} \times H^{0.6711147}$; en cuanto que para *Dipteryx spp.* la mejor función fue la de Naslund (RSE = 1.31, R^2 adj = 0.92, y AIC = 411.95): $V = 1.552 - 3.123 \times 10^{-4} \times DAP^2 + 9.812 \times 10^{-5} \times DAP^2 \times H + 3.365 \times 10^{-3} \times H^2 - 1.831 \times 10^{-4} \times DAP \times H^2$.

Palabras clave: Factor de forma; ecuaciones de volumen; volumen de árboles; medición forestal; Amazonía.

ABSTRACT

In order to determine the form factor and develop volume functions for the trunks of *Myroxylon balsamum* and *Dipteryx spp.* trees, successive diameter measurements were taken on 120 felled trees of each species in forests belonging to a forestry concession located in the province of Tahuamanu, department of Madre de Dios, Peru. Based on these measurements, the actual commercial stem volume of each tree was calculated to obtain the form factor, and volume functions were tested, selecting the one with the best statistical fit. The results indicated that the form factor of *M. balsamum* was 0.73, and that of *Dipteryx spp.* was 0.81, while the best volume function for *M. balsamum* was Schumacher's logarithmic function (RSE = 0.67, R² adj = 0.75, and AIC = 246.43): $V = 0.0008417 \times \text{DAP}^{1.5741325} \times H^{0.6711147}$; while for *Dipteryx spp.* the best function was that of Naslund (RSE = 1.31, R² adj = 0.92, and AIC = 411.95): $V = 1.552 - 3.123 \times 10^{-4} \times \text{DAP}^2 + 9.812 \times 10^{-5} \times \text{DAP}^2 \times H + 3.365 \times 10^{-3} \times H^2 - 1.831 \times 10^{-4} \times \text{DAP} \times H^2$.

Keywords: Form factor; volume equations; tree volume; forest measurement; Amazon.

INTRODUCCIÓN

La cuantificación confiable del potencial maderable es un factor crítico para la formulación de adecuados planes de manejo forestal, que posteriormente se ven reflejados en la eficiencia de las operaciones de aprovechamiento y transformación de la madera. Esto es importante, por ejemplo, para la valoración económica de la madera, selección de áreas forestales más productivas, estudios de crecimiento y rendimiento, así como la estimación de biomasa y carbono (Kachamba y Eid 2016). Entre los parámetros más empleados en la cuantificación del recurso maderable, destaca el coeficiente mórfico también conocido como factor de forma, que es de gran relevancia para la estimación confiable del volumen de los árboles, pues a partir de este valor, que expresa la proporción del volumen del fuste en relación al volumen del cilindro, puede estimarse el volumen real del fuste (Avery y Burkhart 2002). Similarmente las funciones de volumen, expresan matemáticamente el volumen del fuste a partir del diámetro y altura del árbol (Avery y Burkhart 2002). Tanto el coeficiente mórfico como las funciones de volumen adecuados para una especie determinada, pueden ser usadas en árboles en pie, permitiendo el cálculo preciso de los volúmenes con datos de inventarios y censos forestales, convirtiéndose en una de las herramientas mas importantes para el manejo forestal (Tonolli et al. 2011).

Sin embargo, hasta el momento, el Servicio Forestal y de Fauna Silvestre (SERFOR) dentro de sus lineamientos para la formulación de planes de manejo y planes operativos anuales propone el uso de un coeficiente mórfico general de 0,65 para la mayoría de las especies (SERFOR 2016b). Esto se debe a que no se cuenta con suficientes estudios para adoptar coeficientes mórficos propios de cada especie. Por ejemplo, *Myroxylon balsamum* (L.) Harms conocido como “estoraque” y *Dipteryx spp.* conocido como “shihuahuaco”, no cuentan con coeficiente mórfico específicos, en Madre de

Dios. Algunos pocos estudios para *Myroxylon balsamum* y *Dipteryx* spp. fueron realizados en bosques de Tahuamanu-Madre de Dios (Ovalle F 2008; Huanca Choque y Camala Huaquisto 2021; Jara y Fernandez 2019a); sin embargo, para la adopción de un nuevo coeficiente mórfico por la autoridad forestal es necesario el desarrollo de más estudios en otros bosques que permitan corroborar un coeficiente mórfico confiable.

El presente estudio aplica metodología estándar de determinación de los coeficientes mórficos a través de la medición de diámetros a lo largo del fuste comercial de una muestra representativa de árboles, los que se utilizarán para la cubicación de secciones sucesivas del fuste, estimándose el volumen real del fuste y el volumen del cilindro, cuya proporción se conoce como coeficiente mórfico o factor de forma. Además, usando las mismas mediciones, se desarrollarán ecuaciones de volumen mediante análisis de regresión lineal para predecir el volumen del fuste en función del dap y altura comercial (Avery y Burkhart 2002; Marshall y LeMay 1990).

En este contexto, la investigación tuvo por objetivo determinar el coeficiente mórfico y desarrollar funciones de volumen para *M. balsamum* y *Dipteryx* spp., los cuales son necesarios para la estimación confiable del volumen comercial de estas especies, en el marco del manejo forestal sostenible.

ÍNDICE

PRESENTACIÓN

RESUMEN

ABSTRACT

DEDICATORIA

AGRADECIMIENTOS

INTRODUCCIÓN

CAPÍTULO I: PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN.....	1
1.1. Descripción del problema	1
1.2. Formulación del problema	3
1.3. Objetivos.....	3
1.4. Variables.....	4
1.5. Operacionalización de variables	6
1.6. Hipótesis:.....	7
1.7. Justificación	7
1.8. Consideraciones éticas.....	8
CAPÍTULO II: MARCO TEÓRICO	10
2.1. Antecedentes de estudios	10
2.2. Marco teórico	15
2.2.1. Descripción general de <i>Myroxylon balsamum</i>	15
2.2.2. Descripción general de <i>Dipteryx spp.</i>	15
2.2.3. Medición de la forma del fuste.....	16
2.2.4. Perfil del fuste y volumen de trozas.....	19
2.2.5. Funciones de volumen	21
2.2.6. Regresión simple y múltiple.....	24
2.3. Definición de términos	27
CAPÍTULO III: METODOLOGÍA DE INVESTIGACIÓN	28
3.1. Tipo de estudio	28
3.2. Diseño del estudio	28
3.3. Población y Muestra	28
3.3.1. Población	28
3.3.2. Muestra.....	29
3.4. Métodos y técnicas	33

3.4.1.	Lugar de estudio.	33
3.4.2.	Determinación del Coeficiente mórfico	35
3.4.3.	Desarrollo de las funciones de volumen	37
3.5.	Tratamiento de los datos	39
CAPÍTULO IV: RESULTADOS DE LA INVESTIGACIÓN		40
CONCLUSIONES		54
RECOMENDACIONES.....		55
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....		56
ANEXOS.....		61
Anexo 1. Formato de medición del fuste para cubicación por trozas sucesivas		
Anexo 2. Matriz de consistencia		
Anexo 3. Compilación de script de R y resultados de construcción de ecuaciones de volumen de <i>M. balsamun</i>		
Anexo 4. Compilación de script de R y resultados de construcción de ecuaciones de volumen de <i>Dipteryx spp.</i>		

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Sólidos de revolución que representan la forma de las trozas del fuste	20
Figura 2. Representación esquemática de las observaciones (puntos), la recta de regresión (línea gruesa) y los residuos (líneas delgadas).....	25
Figura 3. Mapa de dispersión de árboles de <i>M. balsamum</i> en el Plan Operativo N° 18 de la Concesión Forestal EMINI SAC.....	31
Figura 4. Mapa de dispersión de árboles de <i>Dipteryx spp.</i> en el Plan Operativo N° 18 de la Concesión Forestal EMINI SAC.....	32
Figura 5. Mapa de ubicación de la Concesión Forestal EMINI SAC y Parcela de Corta N° 18.	34
Figura 6. Esquema de la forma de medición de los diámetros (d) y su respectiva área de la sección transversal (A), cada 2 metros de longitud a lo largo del fuste.	35
Figura 7. Diagramas de caja de las distribuciones de las dimensiones de los árboles muestreados de <i>Myroxylon balsamum</i>	40
Figura 8. Diagramas de caja de las distribuciones de las dimensiones de los árboles muestreados de <i>Dipteryx spp.</i>	41
Figura 9. Diagrama de caja de la distribución del coeficiente mórfico de <i>Myroxylon balsamum</i> (izquierda) y <i>Dipteryx spp.</i> (derecha).	42
Figura 10. Gráfico de QQ-plot de residuos por cada modelo para la especie <i>Myroxylon balsamum</i>	47
Figura 11. Gráfico de QQ-plot de residuos por cada modelo para la especie <i>Dipteryx spp.</i>	48
Figura 12. Gráfico de residuos por cada modelo para la especie <i>Myroxylon balsamum</i>	49
Figura 13. Gráfico de residuos por cada modelo para la especie <i>Dipteryx spp.</i>	50
Figura 14. Volumen estimado vs. Volumen observado por modelo, para la especie <i>Myroxylon balsamum</i>	51
Figura 15. Volumen estimado vs. Volumen observado por modelo, para la especie <i>Dipteryx spp.</i>	52

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Operacionalización de variables	6
Tabla 2. Coeficientes de las funciones de volumen y estadísticas para <i>Carapa guianensis</i> Aubl., <i>Bertholletia excelsa</i> Bonpl., <i>Tabebuia avellanedae</i> Lorentz ex Griseb e <i>Hymenaea courbaril</i> L, respectivamente. Tabla adaptada de Tonini, Arco-Verde y Pedreira Pereira de Sá (2005). La tabla original muestra información de muchas especies de otros biomas; por tanto, se extrajo información solo de estas cuatro especies.....	11
Tabla 3. Modelos más comúnmente usados para estimación del volumen a partir del DAP.....	22
Tabla 4. Modelos más comúnmente usados para la estimación del volumen a partir del DAP y la altura comercial.....	23
Tabla 5. Modelos de volumen que se probaron.....	37
Tabla 6. Media, mediana y coeficiente de variación del coeficiente mórfico de <i>Myroxylon balsamum</i> y <i>Dipteryx</i> spp.	42
Tabla 7. Funciones de volumen de <i>Myroxylon balsamum</i> con sus respectivos coeficientes, valores p, error estándar residual (RSE), coeficiente de determinación ajustado (R^2_{adj}) y criterio de información de Akaike (AIC). ..	43
Tabla 8. Funciones de volumen de <i>Dipteryx</i> spp. con sus respectivos coeficientes, valores p, error estándar residual (RSE), coeficiente de determinación ajustado (R^2_{adj}) y criterio de información de Akaike (AIC). ..	45

LISTA DE ABREVIATURAS

AIC: Criterio de información de Akaike

DAP: Diámetro a la altura del pecho

EMINI SAC: Empresa Maderera Industrial Isabelita S.A.C.

F: Coeficiente mórfico

H: Altura comercial o longitud comercial del fuste

RMSE: Raíz del cuadrado medio del error

SERFOR: Servicio Nacional Forestal

V: Volumen estimado del fuste

Vf: Volumen real del fuste

R²: Coeficiente de determinación ajustado

CAPÍTULO I: PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN

1.1. Descripción del problema

El manejo forestal sostenible requiere de herramientas, métodos y técnicas para su adecuado funcionamiento; entre ellos, los relacionados con la cuantificación del volumen de los recursos maderables disponibles para el aprovechamiento. Las ecuaciones, modelos o funciones de volumen permiten estimar de manera precisa el volumen de especies comerciales (Avery y Burkhart 2002). Su uso es de suma importancia para el adecuado manejo forestal (Akindele y LeMay 2006; Guendehou et al. 2012; Mauya et al. 2014). Por otro lado, las funciones de volumen junto con ecuaciones alométricas son herramientas que auxilian en la estimación de biomasa, captura de carbono y valorización de los servicios ambientales del bosque (Guendehou et al. 2012; Bi y Hamilton 1998; Brown y Food and Agriculture Organization of the United Nations. 1997). En el mismo orden de importancia, otra herramienta de utilidad práctica en la estimación del volumen comercial es el coeficiente mórfico o factor de forma, muy usado por la administración forestal y manejadores forestales. Se evidencia que, hasta la actualidad, el SERFOR (Servicio Nacional Forestal) continúa recomendando el uso de un coeficiente mórfico de 0,65 para la mayoría de especies forestales comerciales (SERFOR 2016b). Este coeficiente mórfico es irreal para muchas especies forestales, siendo que diversas investigaciones han encontrado factores de forma muy superiores a 0,65, por ejemplo, en Madre de Dios para *Manilkara bidentata* el coeficiente mórfico es de 0,82 (Estremadoyro 2014).

El género *Dipteryx*, que agrupa a las especies *Dipteryx micrantha*, *Dipteryx odorata*, *Dypteryx alata*, entre otras, es el grupo de madera de mayor volumen de extracción de las concesiones forestales maderables de Madre de Dios y otras regiones de la Amazonía (SERFOR 2016a). A pesar de su alta

importancia en el sector forestal, los estudios de funciones de volumen y coeficiente mórfico del género *Dipteryx* son escasos, existiendo sólo dos estudios en bosques de Tahuamanu-Madre de Dios, que revelan un coeficiente mórfico entre 0,79 y 0,80, y además una función logarítmica de Schumacher para predecir el volumen (Ovalle F 2008; Jara y Fernandez 2019a).

M. balsamum (estoraque) es una especie de madera dura de excelente calidad (Reynel et al. 2003). Actualmente es la segunda especie con mayor volumen de aprovechamiento en Madre de Dios, sólo por debajo de *Dipteryx* spp. (Shihuahuaco) (SERFOR 2016a). Existen dos estudios realizados en Madre de Dios que encontraron coeficientes mórficos de 0,73 y 0,76, y funciones de volumen Spurr y Schumacher que predicen bien el volumen de los árboles (Jara y Fernandez 2019a; Huanca Choque y Camala Huaquisto 2021).

SERFOR y los Gobiernos Regionales no han adoptado hasta el momento factores de forma específicos para estas especies, probablemente debido a los insuficientes estudios que permitan avalar y justificar la precisión de un determinado coeficiente mórfico. Siendo *M. balsamum* y *Dipterix spp.* las especies más importantes en los volúmenes forestales, ampliamente distribuidos en los bosques amazónicos, donde el crecimiento de los árboles puede variar dependiendo del tipo de bosque, suelo, y clima, es necesario contar con más estudios para justificar la incorporación de un nuevo coeficiente mórfico oficial para estas especies.

Se advierte que las distorsiones en la estimación del volumen maderable del fuste generan errores significativos en la determinación del pago por derecho de aprovechamiento forestal, además de dificultades en las labores de fiscalización y control del volumen autorizado frente al efectivamente extraído y transportado; esto, como consecuencia de las notables discrepancias entre el volumen real y el volumen obtenido mediante un cálculo distorsionado.

En este contexto, es imprescindible la determinación del coeficiente mórfico y desarrollo de funciones de volumen de *M. balsamum* y *Dipteryx spp.*, para un manejo sostenible de estas especies.

1.2. Formulación del problema

Problema general:

¿Qué factores de forma y funciones de volumen permiten estimar con alto grado de precisión el volumen comercial de árboles de *M. balsamum* y *Dipteryx spp.*?

Problemas específicos:

- ¿Cuál es el coeficiente mórfico de *M. balsamum* en los bosques de Madre de Dios?
- ¿Cuál es el coeficiente mórfico de *Dipteryx spp.*, en los bosques de Madre de Dios?
- ¿Qué funciones de volumen son precisas para la estimación del volumen comercial del fuste de *M. balsamum* en los bosques de Madre de Dios?
- ¿Qué funciones de volumen son precisas para la estimación del volumen comercial del fuste de *Dipteryx spp.* en los bosques de Madre de Dios?

1.3. Objetivos

Objetivo General

Determinar el coeficiente mórfico y desarrollar funciones de volumen del fuste de árboles de *M. balsamum* y *Dipteryx spp.*, en los bosques de Madre de Dios.

Objetivos Específicos

OE1. Determinar el coeficiente mórfico de árboles de *M. balsamum* en los bosques de Madre de Dios.

OE2. Determinar el coeficiente mórfico de árboles de *Dipteryx spp.* en los bosques de Madre de Dios.

OE3. Desarrollar funciones de volumen a partir del diámetro a la altura del pecho (DAP) y altura comercial del fuste (H), de árboles de *M. balsamum* en los bosques de Madre de Dios.

OE4. Desarrollar funciones de volumen a partir del diámetro a la altura del pecho (DAP) y altura comercial del fuste (H), de árboles de *Dipteryx spp.* en los bosques de Madre de Dios.

1.4. Variables

Las variables se definieron según los objetivos específicos:

OE1 y OE2:

- Determinar el coeficiente mórfico de árboles de *M. balsamum* en los bosques de Madre de Dios.
- Determinar el coeficiente mórfico de árboles de *Dipteryx spp.* en los bosques de Madre de Dios.

Variables Dependientes:

- Coeficiente mórfico (F): Valor entre 0 y 1 que representa la forma del fuste, definido como la proporción del volumen real del fuste, en relación con el volumen del cilindro.

Variables independientes:

- Volumen del cilindro: Volumen del cilindro con diámetro igual al DAP y altura igual a H.
- Volumen real del fuste (Vf): Volumen del fuste desde la base hasta las ramificaciones principales, calculado mediante cubicación por secciones sucesivas mediante la fórmula de Smalian a partir de las mediciones sucesivas de diámetros y longitud de secciones del fuste comercial.

OE3 y OE4:

- Desarrollar funciones de volumen y construir tablas de volumen, a partir del DAP y H del fuste, de árboles de *M. balsamum* en los bosques de Madre de Dios.
- Desarrollar funciones de volumen y construir tablas de volumen, a partir del DAP y H del fuste, de árboles de *Dipteryx spp.* en los bosques de Madre de Dios.

Variables Dependientes:

- Volumen estimado del fuste (V): Volumen del fuste estimado a partir del DAP y H mediante una ecuación de volumen que ajusta el Vf, DAP y H del árbol conocidos mediante regresiones lineales.

Variables independientes:

- Diámetro a la altura del pecho (DAP): Diámetro del fuste del árbol, medido a 1,3 m de altura desde la superficie del suelo.
- Altura comercial (H): Longitud comercial del fuste medido desde la superficie del suelo hasta las ramificaciones principales o inicio de la copa.
- Volumen real del fuste (Vf): Volumen del fuste desde la base hasta las ramificaciones principales, calculado mediante cubicación por secciones sucesivas (Vs) usando la fórmula de Smalian a partir de las mediciones sucesivas de los diámetros (d1 y d2) y longitud (L) de las secciones del fuste comercial.

1.5. Operacionalización de variables

Tabla 1. Operacionalización de variables

Definición conceptual	Definición operacional	Dimensiones	Indicadores	Ítems
Variables dependientes				
Coeficiente mórfico (F) Valor que representa la forma del fuste, definido como la proporción del volumen real del fuste, en relación al volumen del cilindro.	$F = \frac{\text{Volumen del fuste del árbol}}{\text{Volumen de un cilindro}}$	Estimación directa realizado a partir de mediciones directas del fuste.	Escala de valor entre 0 a 1. Un coeficiente mórfico cercano a 1 indica que el fuste tiene forma de cilindro.	¿Cuál es el coeficiente mórfico de <i>M. balsamum</i> en los bosques de Madre de Dios? ¿Cuál es el coeficiente mórfico de <i>Dipteryx</i> spp. en los bosques de Madre de Dios?
Volumen estimado del fuste (V) Volumen del fuste estimado a partir del DAP y H mediante una ecuación de volumen que ajusta el Vf, DAP y H del árbol conocidos mediante regresiones lineales	$V = f(\text{DAP}, H)$	Estimación indirecta realizado a partir de regresiones que ajustan el DAP, H, y Vf.	Coeficiente de determinación ajustado (R^2_{adj}) los modelos a probar. Criterio de información de Akaike (AIC) de los modelos a probar. Suma de los cuadrados residuales de las predicciones (SSE). Raíz del cuadrado medio del error (RMSE).	¿Qué funciones de volumen son precisas para la estimación del volumen comercial del fuste de <i>M. balsamum</i> en los bosques de Madre de Dios? ¿Qué funciones de volumen son precisas para la estimación del volumen comercial del fuste de <i>Dipteryx</i> spp en los bosques de Madre de Dios?
Variables independientes				
Volumen real del fuste (Vf) Volumen del fuste desde la base hasta las ramificaciones principales, calculado mediante cubicación por secciones sucesivas (Vs) usando la fórmula de Smalian a partir las mediciones sucesivas de los diámetros (d_1 y d_2) y longitud (L) de las n secciones del fuste comercial.	$V_s = \frac{\pi(d_1^2 + d_2^2)}{8} \times L$ $V_f = \sum_{n=1}^n V_{s_n}$	Estimación directa realizado a partir de mediciones directas del fuste.	Volumen de las secciones sucesivas.	¿Cuál es el coeficiente mórfico de <i>M. balsamum</i> en los bosques de Madre de Dios? ¿Cuál es el coeficiente mórfico de <i>Dipteryx</i> spp. en los bosques de Madre de Dios?
Volumen del cilindro Volumen del cilindro con diámetro igual al DAP y altura igual a H	$\text{Volumen del cilindro} = \frac{\pi \times \text{DAP}^2 \times H}{4}$	Estimación directa realizado a partir de mediciones directas del fuste.	Volumen de un cilindro.	¿Cuál es el coeficiente mórfico de <i>M. balsamum</i> en los bosques de Madre de Dios? ¿Cuál es el coeficiente mórfico de <i>Dipteryx</i> spp. en los bosques de Madre de Dios?
Diámetro a la altura del pecho (DAP) Diámetro medido a 1.3 m de altura sobre la superficie del suelo	DAP = Diámetro del fuste a la altura de 1.3 m	Medición directa del fuste.	Circunferencia del fuste a 1.3 m de altura	¿Cuál es el coeficiente mórfico de <i>Dipteryx</i> spp. en los bosques de Madre de Dios?
Altura comercial (H) Longitud del fuste desde la superficie del suelo hasta las ramificaciones principales o inicio de copa	H = Longitud del fuste desde la base hasta las ramificaciones principales	Medición directa del fuste.	Longitud comercial del fuste desde la base hasta las ramificaciones principales	

1.6. Hipótesis:

H1: El coeficiente mórfico de *M. balsamum*, en los bosques de Madre de Dios, es superior a 0,65.

H2: El coeficiente mórfico de *Dipteryx spp.*, en los bosques de Madre de Dios, es superior a 0,65.

H3: Las funciones de volumen basadas en el DAP y la altura total permiten estimar de manera confiable el volumen comercial del fuste de *M. balsamum* en bosques de Madre de Dios, con coeficientes de determinación superiores a 0,70.

H4: Las funciones de volumen basadas en el DAP y la altura total permiten estimar de manera confiable el volumen comercial del fuste de *Dipteryx spp.* en bosques de Madre de Dios, con coeficientes de determinación superiores a 0,70.

1.7. Justificación

La investigación se justifica por la necesidad de estimar con alta precisión el volumen de los árboles de *M. balsamum* y *Dipteryx spp.*, para un adecuado manejo forestal de estas especies que tienen los mayores volúmenes de extracción a nivel Regional y Nacional (SERFOR 2016a). Actualmente para la especie, se usa un coeficiente mórfico de 0,65 que subestimaría considerablemente los volúmenes disponibles de esta especie en los bosques del Tahuamanu (SERFOR 2016b). A pesar de los altos volúmenes extraídos de las especies del género *Dipteryx*, existen pocos estudios volumétricos que permitan desarrollar un consenso para la adopción oficial de un coeficiente mórfico más adecuado y realista por parte de la autoridad forestal.

Se conoce que el SERFOR y los Gobiernos Regionales no han adoptado factores de forma específicos para estas especies, probablemente debido a los insuficientes estudios que permitan avalar y justificar la precisión de un determinado coeficiente mórfico, porque la morfometría de los árboles puede variar dependiendo del tipo de bosque, suelo y clima, siendo necesario contar con mas estudios que amplíen el muestreo en diferentes tipos de bosques y localidades. Por tanto, este estudio contribuye a ampliar la información de

factores de forma de estas especies, en bosques de Tahuamanu, Madre de Dios, para *M. balsamum* y *Dipteryx spp.*, para contar con información corroborada y validada en múltiples estudios (considerando otros bosques, tamaño de muestra y metodología), y de esta manera consolidar la adopción de un nuevo coeficiente mórfico y funciones de volumen más confiables para la estimación del volumen real de madera de estas especies.

Contar con coeficientes mórficos y ecuaciones de volumen específicos para las especies impactaría positivamente el manejo forestal, permitiendo contar con datos de volumen de los POs y PGMFs más exactos en relación con los volúmenes reales de extracción, lo cual repercute en una mejora de la gestión que realiza la Autoridad Forestal, así como de los órganos encargados del control y la supervisión del sector. En la actualidad, se presentan marcadas diferencias entre el volumen autorizado y el efectivamente producido, situación que dificulta las labores de fiscalización por parte de las entidades competentes y que además afecta la correcta valoración del volumen realmente aprovechable.

1.8. Consideraciones éticas

La ejecución de la investigación no generará impactos ambientales negativos, ya que las mediciones se realizarán en árboles previamente apeados por el concesionario forestal según su Plan Operativo Anual, siguiendo las pautas de impacto reducido.

Para evitar riesgos a la salud e integridad física, las mediciones de los árboles se realizarán posteriores al apeo y limpieza de los árboles, reduciendo de esa manera accidentes por caída de ramas, picaduras de animales y cortes.

Por otro lado, en el aspecto social, la realización del presente estudio cuenta con autorización de los concesionarios forestales de las áreas a muestrear, quienes fueron informados previamente del tipo de estudio y las actividades a realizar.

Este trabajo de tesis sigue el método científico para la obtención de resultados comparables y replicables; asimismo, se adoptaron procedimientos estandarizados y validados en estudios de este tipo (Avery y Burkhart 2002;

Rondeux y Díaz de Barrionuevo 2010; Picard, Saint-André y Henry 2012; Prodan, Michail et al. 1997). Finalmente, el informe final de tesis será redactado respetando las disposiciones del Reglamento de Grados y Títulos de la Universidad Nacional Amazónica de Madre de Dios, con citas y referencias apropiadas.

CAPÍTULO II: MARCO TEÓRICO

2.1. Antecedentes de estudios

2.1.1. Funciones de volumen de especies comerciales de bosques tropicales.

En bosques de Madre de Dios, el volumen comercial de *Manilkara bidentata* “Quinilla” puede ser estimada con precisión mediante la ecuación logarítmica de Schumacher-Hall: $V = 1,450633 * DAP^{2,0690} * H^{0,7217}$ con un excelente ajuste ($R^2=0,95$) mediante las variables DAP y H (Estremadoyro 2014).

En Ucayali, el volumen comercial de *Swietenia macrohylla* “Caoba” fue altamente relacionado con el DAP y H los cuales explicaron el 99% de la variación del volumen, mediante el modelo $V = - 0,110787 + 0,651536 * DAP^2 + 0,465085 * DAP^2 * H$ (Romero 2017).

En Loreto, en un estudio realizado en el Centro de Investigaciones de Jenaro Herrera, Loreto, con una muestra de 197 árboles de *Cedrelinga cateniformis* proveniente de plantaciones forestales, de 21 a 25 años de edad (Otarola Acevedo y Linares Bensimon 2002), se encontró un modelo logarítmico de buen ajuste, de la forma $\ln(V) = -5,71242 * 10^{-2} + 2,11385 * 10^{-4} * DAP^2 - 5,40695 * 10^{-4} * DAP * H + 2,71391 * 10^{-5} * DAP^2 * H$, con un $R^2=0,813$, coeficiente de variación de 33,58% e índice de Fúrnival de 0,033458 (Otarola Acevedo y Linares Bensimon 2002)

En la Amazonía Boliviana, el modelo de Hohenadl, un tipo de modelo parabólico, de la forma $V = 5,09 - 11,37 * DAP + 13,70 * DAP^2$ fue el más adecuado para la estimación del volumen de árboles de *Hura crepitans* “Catahua” mostrando mejores ajustes ($R^2=0,92$ y menor índice de Furnival) en comparación con los modelos Lineal y Logarítmico (Haraus 2003).

Otro estudio, con grande número de árboles muestreados, en Rondonia, Brasil, se encontró que el modelo Logarítmico de variables combinadas o modelo Spurr logarítmico se ajusta mejor a la especie *Apuleia leiocarpa* “Ana

caspi” con una muestra de 157 árboles; la ecuación resultante $\ln V = -7,674 + 0,815 \ln(\text{DAP}^2 \cdot H)$ tuvo un $R^2=0,60$ (Cysneiros, Pelissari y Machado 2017).

Los estudios citados, realizados en la Amazonía, indican que en general, los modelos logarítmicos de Schumacher e Hall, y logarítmico y aritmético de Spur proporcionan los mejores ajustes en la mayoría de las especies tropicales comerciales en áreas de manejo forestal bajo sistema de concesiones forestales.

Por otro lado, en bosques de la Mata Atlántica en Brasil, las funciones de volumen desarrolladas para *Carapa guianensis* Aubl., *Bertholletia excelsa* Bonpl., *Tabebuia avellanedae* Lorentz ex Griseb y *M. balsamum* resultaron precisas para estimar el volumen comercial en árboles jóvenes, obteniéndose mejores resultados con los modelos que incorporan conjuntamente el diámetro a la altura del pecho y la altura (Tonini, Arco-Verde y Pedreira Pereira de Sá 2005). Asimismo, Batista, Marquesini y Viana (2004) reportan, para *Tabebuia cassinoides*, un modelo logarítmico Schumacher de dos variables que se ajusta adecuadamente en árboles jóvenes con diámetros entre 7 y 12 cm ($V=e^{-3,1184 \cdot \text{DAP}^{2,0584} \cdot H^{1,0555}}$ y $V= -70,448 + e^{-1,9419 \cdot \text{DAP}^{1,8547} \cdot H^{0,7005}}$, respectivamente).

Tabla 2. Coeficientes de las funciones de volumen y estadísticas para *Carapa guianensis* Aubl., *Bertholletia excelsa* Bonpl., *Tabebuia avellanedae* Lorentz ex Griseb e *Hymenaea courbaril* L, respectivamente. Tabla adaptada de Tonini, Arco-Verde y Pedreira Pereira de Sá (2005). La tabla original muestra información de muchas especies de otros biomas; por tanto, se extrajo información solo de estas cuatro especies.

Especie	Coeficientes				Estadísticos	
	b0	b1	b2	b3	R ² adj	SEE%
<i>Carapa guianensis</i>	-0,0927	-363,259	6,5393	27,6772	0,09	10,41
<i>Bertholletia excelsa</i>	0,4202	77,4569	0,6573	-9,249	0,62	7,27
<i>Tabebuia avellanedae</i>	1,0867	-0,4577	0,2695	-0,4804	0,49	16,11
<i>Hymenaea courbaril</i>	0,1755	0,6363	-3,3697	3,6973	0,61	10,87

Siendo: b₀, b₁, b₂, b₃ = coeficientes del modelo; R²adj = coeficiente de determinación ajustado; SEE% = error estándar de estimación en porcentaje.

En el continente africano, diversas investigaciones han reportado modelos volumétricos precisos para estimar el volumen de especies maderables

comerciales (Mate, Johansson y Siteo 2015; Kachamba y Eid 2016; Hofstad 2005; Akindele 2005; Akindele y LeMay 2006; Guendehou et al. 2012; Mauya et al. 2014), al igual que aproximaciones para estimar volumen y biomasa a nivel de conjuntos de especies o de áreas boscosas completas (Goussanou et al. 2016).

En Australia, las ecuaciones desarrolladas para especies nativas también han mostrado un desempeño satisfactorio (Bi y Hamilton 1998). En Europa, se ha modelado el volumen de especies nativas como el aliso gris o Grey alder (Johansson 2005); en esa misma línea, Zianis y Seura (2005) realizan una revisión que recopila numerosos modelos orientados a predecir la biomasa y el volumen de distintas especies comerciales y no comerciales europeas.

Asimismo, otros enfoques basados en técnicas de teledetección han demostrado un considerable potencial para la estimación de la biomasa aérea; en particular, el uso combinado de sensores hiperespectrales y LIDAR, procesados mediante técnicas remotas, permitió obtener un ajuste elevado, cercano a $R^2=0,96$, en la estimación de biomasa de bosques tropicales en Costa Rica (Clark et al. 2011). Similarmente en los bosques de Italia, este método tuvo buenos resultados para la estimación del volumen de árboles de extensas áreas (Tonolli et al. 2011).

2.1.2. Funciones de volumen para *M. balsamum* y *Dipteryx spp.* en bosques tropicales.

En Rondonia, Brasil, se encontró el modelo logarítmico de variables combinadas o modelo Spurr logarítmico como el de mejor ajuste para *Dipteryx odorata* “Shihuahuaco”, de la forma $\ln V = -7,798 + 0,825 \ln(DAP^2 \cdot H)$ con $R^2=0,72$, en 289 árboles muestreados (Cysneiros, Pelissari y Machado 2017)

En Madre de Dios, a pesar de la alta importancia económica de esta especie en la región, las investigaciones disponibles en la literatura científica sobre funciones de volumen de *Dipteryx spp.* son escasos.

Ovalle (2008) encontró un buen ajuste con el modelo logarítmico Schumacher-Hall para la predicción del volumen de árboles de *Dipteryx*: $\ln(V) = -0,8491 + 1,9696 \cdot \ln(DAP) + 0,7390 \cdot \ln(H)$, con $R^2=0,927$.

Similarmente, Jara y Fernandez (2019a) encontraron también que el mejor modelo para la predicción del volumen de *Dipteryx spp.* fue la función logarítmica Schumacher-Hall del tipo: $V = 0,8134 * D^{2,1529} * H^{0,8948}$, con $R^2 = 0,944$. Mientras que para *M. balsamum* la mejor función de volumen fue la Spurr o variable combinada de primer grado de la forma: $V = -0,0075 + 0,5928 (D^2 H)$, con un $R^2 = 0,938$.

En otro estudio para *M. balsamum*, (Huanca Choque y Camala Huaquisto 2021) reportaron como más adecuada la función de volumen de Schumacher-Hall del tipo: $\log V = -0,0752 + 1,8726 \log dap + 0,8569 \log hc$, con un $R^2 = 0,78$.

2.1.3. Coeficiente mórfico de especies comerciales de bosques tropicales

Las investigaciones disponibles en la Amazonía Peruana, encontraron factores de forma muy altos; por ejemplo, en bosques de la Concesión Forestal del Consolidado Otorongo en Madre de Dios, para *Manilkara bidentata*, evaluando 120 se reportó un coeficiente mórfico de 0,82 (Estremadoyro 2014).

Para *Cedrelinga cateniformis*, en Ecuador en base a mediciones de 40 árboles, fue estimado un coeficiente mórfico de 0,8 (Sánchez 2012). Para la misma especie, en plantaciones forestales, fue determinado un coeficiente mórfico promedio de 0,5, con una muestra de 197 árboles de entre 21 a 25 años de edad, y DAP promedio de 21,5 cm (Otarola Acevedo y Linares Bensimon 2002). Estos resultados, sugieren que el coeficiente mórfico de *Cedrelinga cateniformis* es menor en árboles jóvenes de plantaciones forestales, en comparación con árboles maduros de bosques naturales.

En Bolivia, estudios en *Cedrela fissilis* con 58 árboles de muestra, encontrarón un coeficiente mórfico de 0,76; similarmente en *Tabebuia sp.* se reportó un coeficiente mórfico de 0,77, en 194 árboles muestreados (BOLFOR 1997). Menor valor fue encontrado para *Hura crepitans*; en un estudio con 31 árboles, el coeficiente mórfico de esta especie fue de 0,71 (Harausz 2003).

Similarmente, en Ecuador, se reportó un coeficiente mórfico alrededor de 0,7 para *Ceiba samauma* “Lupuna” en 45 árboles muestreados (Sánchez 2012).

Por otro lado, en diversas especies de la Mata Atlántica el coeficiente mórfico sobrepasa 0,8 (Correia, Fantini y Piazza 2017), mientras que en bosques tropicales de Mato Grosso el coeficiente mórfico conjunto de especies de Bosques Ombrófilos varia entre 0,73 y 0,74 (Colpini et al. 2009).

En el Perú, el organismo rector del sector forestal, SERFOR, dispone actualmente, a través de sus lineamientos oficiales, un valor fijo de 0,65 como coeficiente mórfico general para las especies comerciales presentes en la Amazonía. Quedan fuera de esta disposición general *Cedrela odorata*, *Swietenia macrophylla*, y otras más, para las cuales se maneja un tratamiento diferenciado (SERFOR 2016b). Dicho valor se viene utilizando desde hace más de veinte años. La aplicación de este coeficiente responde a la falta de estudios científicos confiables que permitan determinar con exactitud el coeficiente mórfico correspondiente a cada especie comercial.

2.1.4. Coeficiente mórfico de *M. balsamum* y *Dipteryx spp.*

A pesar de la alta importancia económica de esta especie en la Región de Madre de Dios, las investigaciones disponibles en la literatura científica sobre el coeficiente mórfico de *Dipteryx spp.* son escasos.

El coeficiente mórfico o factor de forma de *Dipteryx spp.* es de 0,79 en los bosques de producción permanentes del Consolidado Otorongo con una muestra de 140 árboles (Ovalle F 2008). En otro estudio con una muestra de 100 árboles se encontró que el coeficiente mórfico es de 0,80 (Jara y Fernandez 2019a).

Por otro lado, en Madre de Dios, *M. balsamum* reporta un coeficiente mórfico de 0,76 con una muestra de 121 árboles (Huanca Choque y Camala Huaquisto 2021). Similarmente, otro estudio con 80 árboles se encontró un coeficiente mórfico de 0,73 (Jara y Fernandez 2019a).

Son necesarios más estudios para corroborar estos resultados en otros bosques de la región de Madre de Dios.

2.2. Marco teórico

2.2.1. Descripción general de *Myroxylon balsamum*

M. balsamum, conocido comúnmente como estoraque, es un árbol de follaje perenne que alcanza entre 30 y 35 m de altura (excepcionalmente hasta 40 m), con un diámetro a la altura del pecho que puede llegar a 1 m y copa de forma redondeada. Sus hojas se disponen en espiral, son imparipinnadas y miden entre 8 y 20 cm de largo incluyendo el pecíolo; cada hoja compuesta presenta entre 5 y 10 folíolos alternos, cuyas láminas exhiben numerosas líneas y puntos glandulosos translúcidos, además de un olor fragante al estrujarlas. El tronco es recto, con ramas de crecimiento ascendente y corteza externa lisa, de coloración pardo grisácea, con presencia abundante de lenticelas suberificadas y prominentes; la corteza interna, de color crema amarillento y textura granulosa, posee un olor fragante característico y un grosor total de 10 mm. La floración se produce de manera temprana durante la estación seca, entre abril y junio, mientras que la fructificación ocurre también en época seca, entre junio y julio (Bährle-Rapp 2007).

La madera es de densidad alta, de buena calidad, con grano recto a entrecruzado, de textura media a gruesa, y con albura de color crema y el duramen rojizo. Tiene alta durabilidad, apreciado para parquet y elementos de construcción que requieren alta resistencia (Bährle-Rapp 2007).

2.2.2. Descripción general de *Dipteryx spp.*

Reynel et al. (2003) describen a *Dipteryx spp.* como:

[...] Árbol de unos 50-150 cm de diámetro y 20-35 m de altura total, con el fuste cilíndrico, la ramificación desde el segundo tercio, la base del fuste recta o con raíces tablares pequeñas de hasta 1 m de alto. Corteza externa lenticelada, color marrón claro a grisáceo o verdusco; presenta escamas de ritidoma que desprenden aisladamente dejando huellas impresas ("martillado"), las lenticelas de 2-4 mm de diámetro. Corteza interna granular, color amarillo pálido, con gránulos de color blanquecino y amarillo oscuro. Ramitas terminales con sección circular, color marrón oscuro cuando secas, de unos 4-9 mm de diámetro, finamente agrietadas y glabras. Hojas compuestas imparipinnadas, alternas y dispuestas en espiral, de 13-30 cm de longitud, el pecíolo de 4-8 cm de longitud (p. 21).

(ITTO 2018) agrega además que:

[...] *Dipteryx spp.* son árboles grandes, que alcanzan alturas de hasta 40 m, con diámetros de tronco de 70 cm en promedio, a menudo hasta 120 cm o más. Los agujeros son cilíndricos, con longitudes comerciales de aproximadamente 18 a 24 m. Se encuentran en bosques tropicales primarios. Se desarrollan mejor en suelos bien drenados, grava o arenosos. Su distribución natural abarca comúnmente los bosques de América Central y América del Sur tropicales. El género *Dipteryx* se distribuye desde Honduras hacia el sur hasta Perú y Bolivia. Frutos oblongoides de 3-6 cm de longitud y 2-4 cm de diámetro, leñosos, indehiscientes, la superficie de color amarillento, el mesocarpio harinoso y oleoso, la semilla única (p. 01).

2.2.3. Medición de la forma del fuste

En un bosque natural o en una plantación es posible observar que el diámetro del árbol disminuye progresivamente desde la base hasta el ápice, fenómeno conocido en inglés como "taper" y en español como "ahusamiento" o "adelgazamiento", el cual constituye la causa principal de la variación del volumen del árbol en función de la especie, la edad y las condiciones del sitio (Imaña-Encinas 1998).

La forma del fuste de los árboles, varían según la especie, edad, diámetro, altura y atributos de los rodales tales como la densidad (Marshall y LeMay 1990).

No se puede medir directamente la forma de un árbol o una troza como se hace con el diámetro o la altura; en lugar de eso se pueden establecer parámetros o índices que la representen. De este modo, se han desarrollado diversas expresiones, como los factores de forma, los cocientes de forma y las series de ahusamiento, con la finalidad de describir la forma del fuste del árbol (Prodan, M et al. 1997).

Entre estos parámetros, los más utilizados son los factores de forma, también denominados coeficientes mórficos, los cuales relacionan el volumen del fuste con el volumen de un sólido geométrico regular, principalmente el cilindro (Marshall y LeMay 1990).

Por tanto, la forma del árbol se torna una variable muy importante, tanto como el diámetro o la altura, para determinar con precisión el volumen del fuste de los árboles (Imaña-Encinas 1998).

Las mediciones comunes de la forma del árbol se pueden dividir en dos tipos: los factores de forma y los cocientes de forma (Marshall y LeMay 1990).

a) Factores de forma (F)

Los factores de forma relacionan el volumen real de fuste con el volumen del cilindro cuyo diámetro es igual al diámetro del fuste a una cierta altura. Se expresa como:

$$F = \frac{\text{Volumen del fuste del árbol}}{\text{Volumen de un cilindro}}$$

Por tanto, el coeficiente mórfico siempre será un número entre 0 y 1; y generalmente, cuanto más cercano a 1 sea su valor, más cilíndrico será su fuste. Sin embargo, no siempre es así, puesto que este parámetro no toma en cuenta la variación del diámetro del árbol a lo largo del fuste.

A su vez los factores de forma se dividen en tres tipos, los cuales son los siguientes (Prodan, M et al. 1997):

- **Coeficiente mórfico absoluto:** expresa la relación entre el volumen del fuste y el volumen de un cilindro cuyo diámetro corresponde al diámetro medido en la base del fuste (0 m).
- **Coeficiente mórfico verdadero o real:** expresa la relación entre el volumen del fuste y el volumen de un cilindro cuyo diámetro corresponde al diámetro medido en la parte próxima a la base del árbol.
- **Coeficiente mórfico artificial:** expresa la relación entre el volumen del fuste y el volumen de un cilindro cuyo diámetro corresponde al diámetro a la altura del pecho (1,3 m). Este coeficiente es el de mayor uso en las estimaciones de la forma del árbol, debido a la facilidad que ofrece el empleo del DAP; no obstante, introduce una ligera distorsión en la forma real del fuste, pues tiende a sobreestimar el coeficiente mórfico al emplear el DAP como diámetro del cilindro de referencia (Prodan, M et al. 1997).

b) Cocientes de forma (q)

De acuerdo con Marshall y LeMay (1990), el uso de un cociente de forma es quizás una manera más práctica de medir la forma del fuste del árbol. Básicamente un cociente de forma es la razón de un diámetro de la parte superior del fuste con el diámetro a la altura del pecho (DAP). Es decir:

$$q = \frac{\text{Diámetro medido a una altura superior del fuste}}{\text{Diámetro a la altura del pecho}}$$

El cociente de forma expresada como una razón será siempre menor o igual a 1. Un valor más alto del cociente de forma, indicará un menor ahusamiento del fuste; es decir el cociente de forma es inversamente proporcional al ahusamiento (Marshall y LeMay 1990).

Generalmente, árboles creciendo en claros, tendrán mayor ahusamiento, es decir menor cociente de forma, que árboles creciendo en bosques cerrados (Marshall y LeMay 1990).

Según (Marshall y LeMay 1990), los cocientes de forma más comúnmente usados son los siguientes:

- **Cociente de forma normal:** Definido como la razón entre el diámetro medido a la mitad de la altura del fuste y el DAP. El problema de usar este cociente es que, si el fuste del árbol mide 2,6 m o menos de altura, los dos diámetros serán medidos a la misma altura, es decir, a 1,3 m. Por tanto, las diferencias en la forma, pueden ser debido a diferencias en la altura de los árboles antes que a la forma en sí (Marshall y LeMay 1990).
- **Cociente de forma absoluto:** Definido como la razón entre el diámetro medido en el punto medio de la sección superior por encima de 1,3 m de altura, y el DAP. Este cociente también tiene un problema, pues este parámetro varía según la combinación de altura y diámetro de las especies, y por tanto, diferencias en los cocientes de forma pueden indicar diferencias en el tamaño antes que simples diferencias en la forma del árbol (Marshall y LeMay 1990).

- **Cociente de forma de Girard:** Es el cociente de forma más comúnmente usado, siendo definido como la razón entre el diámetro medido a 16 pies de altura, entre el DAP. Para este cociente se considera que el topo del primer tronco era de 16,0 pies más un margen de ajuste de 0,3 pies más un tocón de 1,0 pies. Por tanto, el diámetro sin corteza debe tomarse a 17,3 pies de altura desde la superficie del suelo. Este cociente tiene tres ventajas: Medir a 17,3 pies de altura (5,3 m aproximadamente) es relativamente fácil y preciso, usando varas telescópicas o un relascopio; el espesor de la corteza es tomado en cuenta; y el diámetro de referencia (DAP) es suficientemente cercano a la superficie del suelo para reflejar el abultamiento de la base del fuste (Marshall y LeMay 1990).

2.2.4. Perfil del fuste y volumen de trozas

Según Ounekham (2009), el modelamiento del volumen individual del fuste es un asunto crítico en la medición forestal, así como en la estimación del crecimiento y rendimiento. Las funciones de volumen individual del fuste son usadas para convertir las mediciones de los inventarios forestales de altura y DAP en volumen de la madera del tronco o fuste, así como para generar estimaciones de volumen futuros a partir del crecimiento en altura y diámetro del árbol. Además, las ecuaciones de ahusamiento, modelos o perfiles del fuste, son herramientas indispensables para la estimación del tamaño y forma de las trozas que podrían obtenerse de un árbol. Por tanto, es esencial que los modelos de volumen y de ahusamiento sean insesgados y exactos tanto como sea posible. Los árboles tienen varios tamaños y formas. Un simple fuste también puede dividirse en segmentos o trozas que tengan diferente forma. Algunas regiones del fuste pueden ser cilíndricas, en cuanto a otras pueden ser cónicas u otra forma de sólidos geométricos. Por tanto, el volumen del fuste del árbol es muy difícil de estimar con exactitud. No obstante, los forestales (profesionales o técnicos) por cuestiones prácticas, asumen que, el fuste es un sólido geométrico común, para poder calcular el volumen de las trozas aplicando simples fórmulas existentes. Estos sólidos geométricos que

representan las trozas, son los neloides, conoides y paraboloides (Figura 1) (Avery y Burkhart 2002).

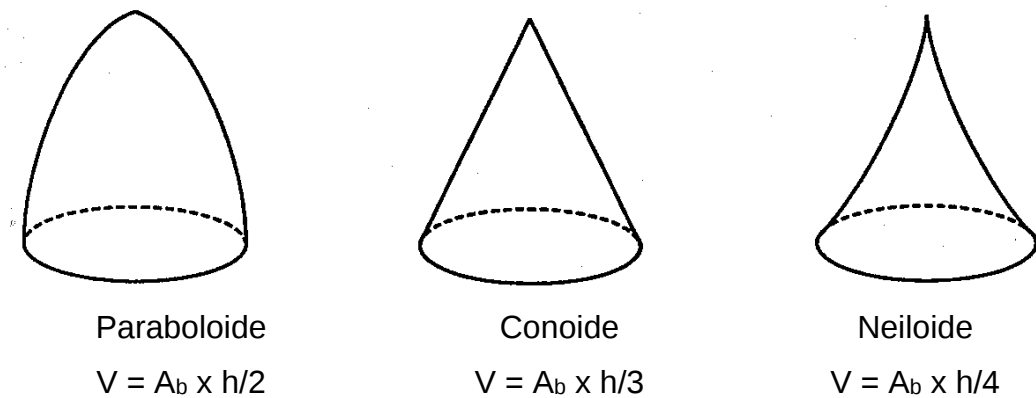


Figura 1. Sólidos de revolución que representan la forma de las trozas del fuste

De acuerdo a Avery y Burkhart (2002), el principal problema encontrado cuando calculamos el volumen de las trozas es la determinación con exactitud del área transversal promedio de la troza, debido a que los volúmenes de todos los sólidos de revolución son calculados a partir de su área transversal promedio y longitud. Existen tres fórmulas muy comúnmente usadas para estimar el volumen de la troza (V_t) de diferentes maneras (Marshall y LeMay 1990):

La fórmula de Smalian: $V_t = \frac{A_0 + A_f}{2} \times L$

La fórmula de Huber: $V_t = A_m \times L$

La fórmula de Newton: $V_t = \frac{A_0 + 4 \times A_m + A_f}{6} \times L$

Donde A_0 es el área transversal del extremo inferior de la troza, A_m es el área transversal en el punto medio de la longitud de la troza; A_f es el área transversal del extremo superior de la troza; y L es la longitud de la troza.

Según (Marshall y LeMay 1990), la fórmula de Newton es usada para calcular el volumen de una troza con forma de neiloide, cono o paraboloide de manera muy exacta. Sin embargo, es necesaria una medida del diámetro en el punto medio de la sección, así como también mediciones en el topo y en la base de la troza del fuste. El problema de usar esta fórmula es la dificultad de acceder

a medir el diámetro en el punto medio de la troza cuando las trozas están apiladas una sobre otra.

Marshall y LeMay (1990), también destacan que las fórmulas de Smalian y Huber son fórmulas exactas solo si la troza tiene una forma de paraboloides. Si la verdadera forma de la troza es cercana a la del cono o neiloide, la fórmula de Smalian sobrestimaré el volumen, y la fórmula de Huber lo subestimaré. Sin embargo, la sobreestimación o subestimación es minimizada si las longitudes de las trozas son menores que 2,5 m. Debido a que la fórmula de Smalian requiere solo de la medición del diámetro en el topo y base de la troza, así como su longitud, es muy frecuentemente usada. A diferencia de la fórmula de Huber tiene el mismo problema que la fórmula de Newton, la dificultad de medir el diámetro en el punto medio de la longitud de la troza; sin embargo, la fórmula de Huber requiere solo de la medición de un diámetro y longitud de la troza.

2.2.5. Funciones de volumen

Las funciones de volumen relacionan el volumen del fuste del árbol con características medibles como el DAP y la altura del fuste (H), e incluso, en algunos casos, con el factor de forma (F). No obstante, en la práctica, las funciones de volumen suelen construirse sin incorporar la forma del árbol como variable (Akindele 2005). Son útiles para estimar el volumen comercial de los árboles en pie (Avery y Burkhart 2002). Bajo este enfoque, el volumen del fuste es una función de variables independientes como el DAP y H (Prodan, M et al. 1997):

$$V = f(\text{DAP}, H)$$

Al respecto, se distinguen dos tipos de funciones de volumen:

a) Funciones de volumen local: Fueron las primeras ecuaciones, construidas para estimar el volumen de árboles a partir del DAP, desarrolladas en Francia, a inicios del siglo XX (Van Laar y Akça 2007).

Estos modelos relacionan el volumen del árbol con una sola variable independiente, generalmente el DAP, por lo que su aplicación se restringe a áreas reducidas donde existe una relación implícita entre el DAP y la altura;

es decir, zonas en las que la altura resulta relativamente homogénea dentro del rodal y donde los individuos suelen pertenecer a una clase de edad y sitio determinada (Prodan, M et al. 1997).

Las funciones de volumen local comúnmente usadas son de la forma:

Tabla 3. Modelos más comúnmente usados para estimación del volumen a partir del DAP.

Tipo	Forma original	Autor	Fuente
Lineal simple	$V = \beta_0 + \beta_1 \cdot \text{DAP} + \varepsilon_i$	Dissescu & Stanescu	(Prodan, M et al. 1997)
Lineal simple	$V = \beta_0 + \beta_1 \cdot \text{DAP}^2 + \varepsilon_i$	Kopezky & Gehrhardt	(Prodan, M et al. 1997)
Lineal múltiple	$V = \beta_0 + \beta_1 \cdot \text{DAP} + \beta_2 \cdot \text{DAP}^2 + \varepsilon_i$	Hohenald & Krenn	(Prodan, M et al. 1997)
Logarítmica	$V = \beta_0 \cdot \text{DAP}^{\beta_1} + \varepsilon_i$ $\log V = \log \beta_0 + \beta_1 \cdot \log \text{DAP} + \varepsilon_i$	Berkhout	(Prodan, M et al. 1997)

b) Funciones de volumen estándar:

Estos modelos incorporan dos variables para la estimación del volumen: el DAP y la altura comercial o altura del fuste (H). Su aplicación resulta más amplia que la de los modelos locales, ya que al incluir explícitamente la relación DAP/H, permite su uso en distintas clases de edad y condiciones de sitio (Prodan, M et al. 1997; Imaña-Encinas 1998). Este tipo de modelos es ampliamente utilizado en la estimación del volumen de especies de bosques naturales tropicales. Los modelos de este tipo son los siguientes:

Tabla 4. Modelos más comúnmente usados para la estimación del volumen a partir del DAP y la altura comercial.

Tipo	Forma original	Autor	Fuente
Coeficiente mórfico constante	$V = \beta_1 \cdot \text{DAP}^2 \cdot H + \varepsilon_i$	-	(Prodan, M et al. 1997; Imaña-Encinas 1998)
Variable combinada de 1er grado	$V = \beta_0 + \beta_1 \cdot \text{DAP}^2 \cdot H + \varepsilon_i$	Spurr	(Bi y Hamilton 1998)
Variable combinada generalizada, o Australiana	$V = \beta_0 + \beta_1 \cdot \text{DAP}^2 + \beta_2 \cdot H + \beta_3 \cdot \text{DAP}^2 \cdot H + \varepsilon_i$	-	(Clutter et al. 1983)
Meyer modificada	$V = \beta_0 + \beta_1 \cdot \text{DAP} + \beta_2 \cdot \text{DAP}^2 + \beta_3 \cdot \text{DAP} \cdot H + \beta_4 \cdot \text{DAP}^2 \cdot H + \varepsilon_i$	Meyer	(Imaña-Encinas 1998)
Comprensiva	$V = \beta_0 + \beta_1 \cdot \text{DAP} + \beta_2 \cdot \text{DAP}^2 + \beta_3 \cdot \text{DAP} \cdot H + \beta_4 \cdot \text{DAP}^2 \cdot H + \beta_5 \cdot H + \varepsilon_i$	Meyer	(Imaña-Encinas 1998; Cysneiros, Pelissari y Machado 2017)
Naslund	$V = \beta_0 + \beta_1 \cdot \text{DAP}^2 + \beta_2 \cdot \text{DAP}^2 \cdot H + \beta_3 \cdot H^2 + \beta_4 \cdot \text{DAP} \cdot H^2 + \varepsilon_i$	Naslund	(Van Laar y Akça 2007)
Variables transformadas de Honer	$V = \text{DAP}^2 / (\beta_0 + \beta_1 \cdot H^{-1}) + \varepsilon_i$	Honer	(Prodan, M et al. 1997)
Australiana de Stoa	$V = \beta_0 + \beta_1 \cdot \text{DAP}^2 + \beta_2 \cdot \text{DAP}^3 + \beta_3 \cdot H + \beta_4 / H + \varepsilon_i$	Stoa	(Prodan, M et al. 1997)
Variable combinada de 2do grado	$V = \beta_0 + \beta_1 \cdot \text{DAP}^2 \cdot H + \beta_2 \cdot (\text{DAP}^2 \cdot H)^2 + \varepsilon_i$	-	(Imaña-Encinas 1998)
Logarítmica de Schumacher	$V = \beta_0 \cdot \text{DAP}^{\beta_1} \cdot H^{\beta_2} + \varepsilon_i$ $\log V = \log \beta_0 + \beta_1 \cdot \log \text{DAP} + \beta_2 \cdot \log H + \varepsilon_i$	Schumacher	(Prodan, M et al. 1997; Clutter et al. 1983; an Laar y Akça 2007)
Variable combinada logarítmica	$V = \beta_0 \cdot (\text{DAP}^2 \cdot H)^{\beta_1} + \varepsilon_i$ $\log V = \log \beta_0 + \beta_1 \cdot \log (\text{DAP}^2 \cdot H) + \varepsilon_i$	-	(Imaña-Encinas 1998; Cysneiros, Pelissari y Machado 2017)
Logarítmica de Dwight	$\log V = \log \beta_0 + \beta_1 \cdot \log \text{DAP} + (3 - \beta_2) \cdot \log H + \varepsilon_i$	Dwight	(Romahn de la Vega, Maldonado y García 1994)

2.2.6. Regresión simple y múltiple

El término "lineal" hace referencia a que el modelo depende linealmente de sus coeficientes y no necesariamente de la variable explicativa. Así, por ejemplo, $Y = a + bX^2$ o $Y = a + b \ln(X)$ constituyen modelos lineales, dado que la variable de respuesta Y depende linealmente de los coeficientes a y b , aun cuando su dependencia respecto de la variable explicativa X no lo sea. En cambio, $Y = aX^b$ no puede considerarse un modelo lineal, puesto que Y no guarda una relación lineal con el coeficiente b . Cabe señalar, además, que otra característica propia del modelo lineal es la naturaleza aditiva del residuo (Picard, Saint-André y Henry 2012).

Con el fin de evidenciar esta propiedad, resulta conveniente incluir explícitamente el residuo dentro de la expresión del modelo. Así, para el caso de una regresión lineal de Y respecto de X , esta se expresará como: $Y = a + bX + \varepsilon$.

a) Regresión lineal simple

Según Picard, Saint-André y Henry (2012), la regresión lineal simple es la más simple de los modelos lineales. Este modelo supone, en primer lugar, que existe una única variable explicativa X y, en segundo lugar, que la relación entre la variable de respuesta Y y dicha variable X adopta la forma de una recta:

$$Y = a + bX + \varepsilon$$

Donde a corresponde al intercepto de la recta y b a su pendiente, cumpliéndose además que los residuos presentan varianza constante: $\text{Var}(\varepsilon) = \sigma^2$. A modo de ejemplo, el modelo $\ln(B) = a + b \ln(\text{DAP}) + \varepsilon$ constituye un caso de regresión lineal simple, en el que la variable de respuesta es $Y = \ln(B)$ y la variable explicativa es $X = \ln(\text{DAP})$, correspondiendo a un modelo de potencia para la biomasa: $B = \exp(a)D^b$. Este tipo de modelo suele emplearse con frecuencia para ajustar modelos de biomasa de una sola especie. A continuación, se presenta otro ejemplo, correspondiente al modelo de biomasa de dos entradas:

$$\ln(B) = a + b \ln(D^2H) + \varepsilon$$

A estas dos hipótesis: la de independencia y la de distribución normal de los residuos, se suma la de varianza constante, también denominada homocedasticidad. En conjunto, estas tres hipótesis pueden resumirse de la siguiente manera:

$$\varepsilon \underset{\text{i.i.d.}}{\sim} \mathcal{N}(0, \sigma)$$

donde $\mathcal{N}(\mu, \sigma)$ designa la ley normal de esperanza μ y desviación estándar σ ; el símbolo " $\sim$ " indica "se distribuye según"; e "i.i.d." corresponde a la abreviatura de "independiente e idénticamente distribuido".

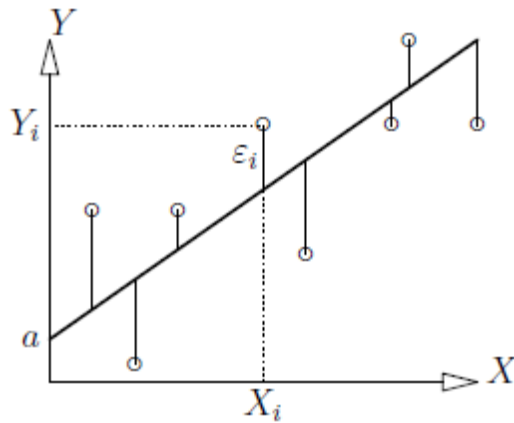


Figura 2. Representación esquemática de las observaciones (puntos), la recta de regresión (línea gruesa) y los residuos (líneas delgadas).

b) Estimación de los coeficientes

La Figura 1 muestra de forma esquemática las observaciones junto con la recta correspondiente a los valores predichos. En este contexto, el mejor ajuste es aquel que logra minimizar el error residual, existiendo diversas formas de cuantificar dicho error. Desde el punto de vista matemático, esto implica seleccionar una norma para medir ε , pudiendo emplearse para ello distintas normas. La más utilizada es la norma L2, la cual cuantifica la diferencia residual entre las observaciones y las predicciones a través de la suma de los cuadrados de los residuos, denominada también suma de cuadrados o suma de cuadrados del error (SCE):

$$SCE(a, b) = \sum_{i=1}^n \varepsilon_i^2 = \sum_{i=1}^n (Y_i - \hat{Y}_i)^2 = \sum_{i=1}^n (Y_i - a - bX_i)^2$$

El mejor ajuste corresponde, entonces, a aquel que minimiza la SCE; en otras palabras, los coeficientes estimados a y b son precisamente los valores de a y b que logran minimizar la suma de los cuadrados de las diferencias.

c) Regresión lineal múltiple

La regresión lineal múltiple es una generalización del modelo lineal simple, caracterizada por la presencia de más de una variable predictora o regresora (Balzarini et al. 1995). El modelo de regresión lineal múltiple puede expresarse de la siguiente manera.

$$Y_i = \beta_0 + \beta_1 x_{i1} + \beta_2 x_{i2} + \dots + \beta_{(p-1)} x_{i(p-1)} + \varepsilon_i$$

Suponiendo también que:

$$\varepsilon_i \sim N(0, \sigma^2); \text{cov}(\varepsilon_i, \varepsilon_j) = 0 \quad \forall i \neq j$$

Dentro de los distintos tipos de regresión múltiple, existe uno particular denominado regresión polinómica, que admite el uso de una única variable regresora o de varias simultáneamente. Tomando como referencia el caso más sencillo —aquel con una sola regresora— resulta necesario, para construir este tipo de modelo, definir previamente el grado del polinomio a ajustar (Balzarini et al. 1995). De esta manera, suponiendo que dicha variable regresora se denota como x y que se opta por un polinomio de segundo grado, el modelo lineal correspondiente, ajustado a través de regresión múltiple, quedaría expresado como sigue:

$$Y_i = \beta_0 + \beta_1 x_i + \beta_2 x_i^2 + \varepsilon_i$$

Suponiendo también que:

$$\varepsilon_i \sim N(0, \sigma^2); \text{cov}(\varepsilon_i, \varepsilon_j) = 0 \quad \forall i \neq j$$

Por tanto, el modelo de regresión polinómica con una sola regresora constituye, en realidad, un caso particular de regresión múltiple, en el cual las

distintas regresoras corresponden a potencias de la variable original. Sus aplicaciones más frecuentes se encuentran en modelos de crecimiento, aunque diversos modelos de regresión pueden incorporar términos polinómicos con el fin de obtener ajustes más adecuados a los datos observados. Si bien no constituye una regla fija, generalmente se recomienda no exceder el grado 3, pues de hacerlo, el modelo resultante dejaría de capturar únicamente lo esencial de la relación entre la variable dependiente y la regresora, incorporando también el error experimental. En consecuencia, un modelo sobreajustado a los datos de un experimento en particular pierde la generalidad y aplicabilidad que el investigador busca alcanzar (Balzarini et al. 1995).

2.3. Definición de términos

- **Funciones de volumen:** Son expresiones matemáticas que vinculan el volumen del árbol con atributos medibles como el diámetro a la altura del pecho (DAP) y/o la altura (H). Como resultado se tiene una ecuación que sirve para estimación del volumen (Marshall y LeMay 1990; Prodan, M et al. 1997; Van Laar y Akça 2007).
- **Coefficiente mórfico:** Es un índice que representa la forma del fuste del árbol comparándolo con el volumen del cilindro. Específicamente, relaciona el volumen real del fuste con el volumen de un cilindro cuyo diámetro es el equivalente al diámetro a la altura del pecho (1,3 m) (Marshall y LeMay 1990; Prodan, M et al. 1997; Van Laar y Akça 2007). Por tanto, teóricamente su valor varía entre 0 y 1; sin embargo, en la práctica los factores de forma son superiores a 0,5.
- **Tabla de Volumen:** Son tablas derivadas de las funciones de volumen, generalmente de dos entradas (DAP y altura); son de uso práctico pues muestran los volúmenes a partir de un determinado DAP y altura (Van Laar y Akça 2007).

CAPÍTULO III: METODOLOGÍA DE INVESTIGACIÓN

3.1. Tipo de estudio

La presente investigación es de tipo correlacional, dado que busca explicar un fenómeno a partir de mediciones precisas de las variables o eventos involucrados (Behar Rivero 2008).

Según su finalidad la investigación es aplicada porque busca resolver problemas prácticos (Hernández Escobar et al. 2018).

Según la profundidad es explicativa, porque además de describir el fenómeno de estudio busca la explicación del comportamiento de las variables (Behar Rivero 2008).

Según su alcance temporal, es de tipo transversal, dado que los métodos y técnicas empleados se aplicarán en una sola ocasión; es decir, las variables serán evaluadas una única vez en el tiempo (Hernández Escobar et al. 2018).

3.2. Diseño del estudio

La investigación se enmarca dentro de los estudios transversales explicativos, conocidos también como analíticos, no experimentales, porque se basa en la observación o medición simple de las variables, eventos o fenómenos para inferir en el comportamiento o características de ellas (Hernández Escobar et al. 2018).

3.3. Población y Muestra

3.3.1. Población

La población estuvo conformada por los árboles censados de *M. balsamum* y *Dipteryx spp.* en el Plan Operativo N° 18 de la Concesión Forestal de la Empresa Maderera Industrial Isabelita S.A.C. (EMINI SAC) con DAP mayor al

diámetro mínimo de corta, totalizando 699 (DAP>51 cm) y 1010 (DAP>65 cm) árboles respectivamente, en un área total de 1876 ha (Figura 3).

3.3.2. Muestra

El tamaño de muestra fue de 120 árboles con DAP > 51 cm de *M. balsamum*, y 120 árboles con DAP > 65 cm de *Dipteryx spp.*, libres de defectos como fuste muy torcido, fuste hueco y copa dañada, y seleccionados aleatoriamente de la población. Además, se descartaron aquellos árboles creciendo en grandes claros u otras zonas no representativas de la población, porque, por las condiciones ecológicas y físicas diferentes, pueden mostrar fustes con formas diferentes a las de árboles creciendo en bosques primarios.

La selección aleatoria de los árboles se realizó con base en los mapas de dispersión de la especie (Figura 3) del Plan Operativo N° 18 de EMINI SAC.

Se comprobó que el tamaño de muestra elegido sea superior al tamaño de muestra calculado a partir de la fórmula de tamaño de muestra para poblaciones finitas (Ecuación 1) (Avery y Burkhart 2002).

$$n = \frac{N \times t^2 \times CV^2}{E^2 \times (N-1) + t^2 \times CV^2} \quad \dots \text{ecuación 1}$$

Donde n representa el tamaño de la muestra, N el tamaño de la población, CV el coeficiente de variación en porcentaje del volumen de las trozas, t el valor correspondiente a la tabla de t de Student (1,96 para un nivel de confiabilidad del 95%), y E el error relativo de muestreo expresado en porcentaje.

De acuerdo con información secundaria de estudios realizados en Madre de Dios, el CV de volumen de árboles de *M. balsamum* es de 24,59 % (Huanca Choque y Camala Huaquisto 2021), mientras que el CV de *Dipteryx spp.* es 45,48 % (Jara y Fernandez 2019a). Con estos CVs y asumiendo el valor N= 699 árboles para *M. balsamum* y N = 1010 árboles para *Dipteryx spp.*, valor t = 1,96, y un E < 8 %, el tamaño de muestra da como resultado 35 árboles de *M. balsamum* y 111 árboles de *Dipteryx spp.* Sin embargo, con la finalidad de incrementar el tamaño de muestra y, por tanto, la precisión y confiabilidad del estudio, se optó por muestrear 120 árboles para cada especie, totalizando 240 árboles.

Esto es respaldado en diferentes estudios previos nacionales e internacionales que recomiendan un tamaño de muestra entre 100 y 120 árboles (Ovalle F 2008; Estremadoyro 2014; Cysneiros, Pelissari y Machado 2017; Sánchez 2012; Haraus 2003; BOLFOR 1997). Además, diversas metodologías recomiendan un tamaño de muestra mínimo de 100 árboles para obtención de funciones de volumen representativas de la población (Romahn de la Vega, Maldonado y García 1994; Rondeux y Díaz de Barrionuevo 2010).

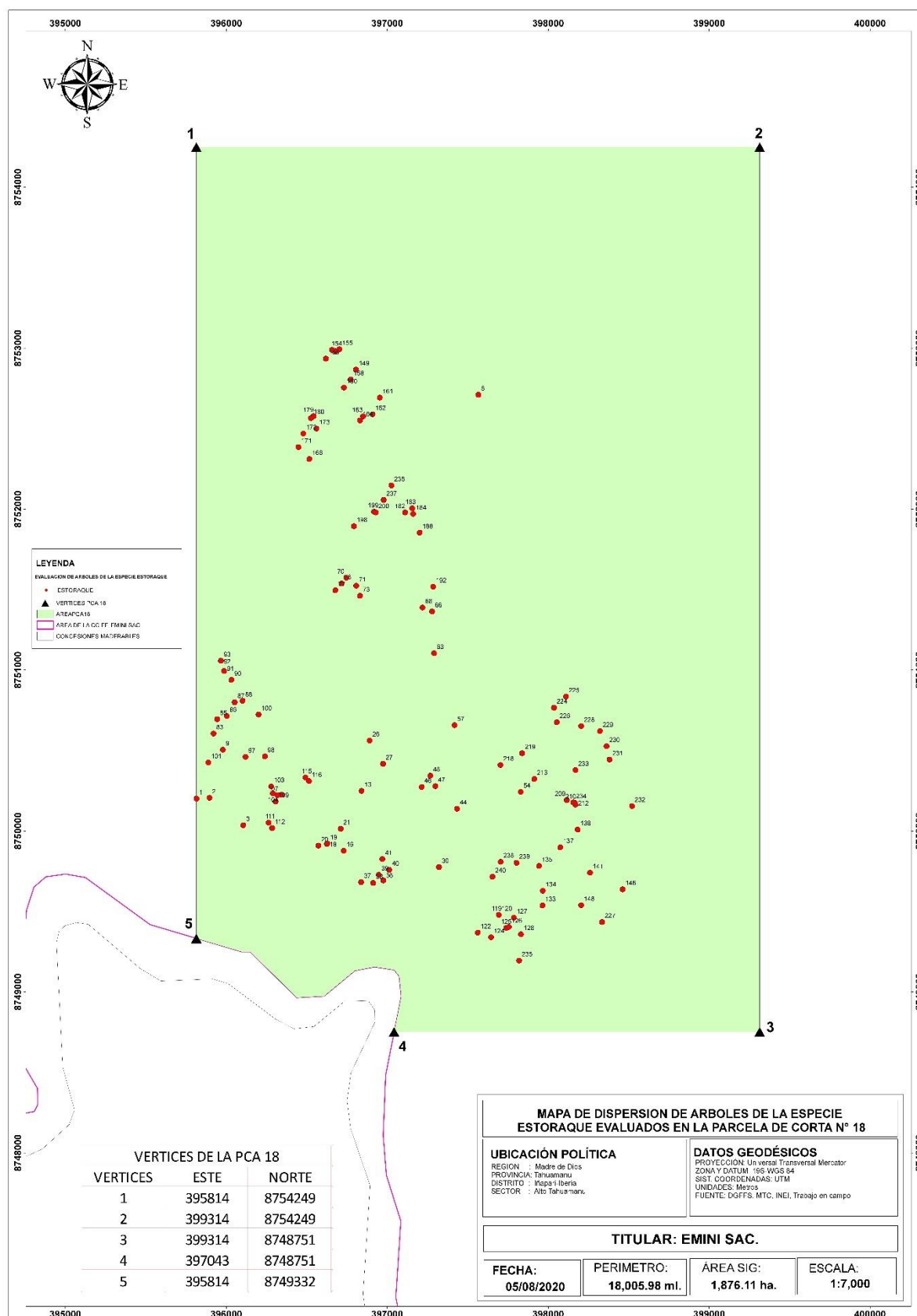


Figura 3. Mapa de dispersión de árboles de *M. balsamum* en el Plan Operativo N° 18 de la Concesión Forestal EMINI SAC.

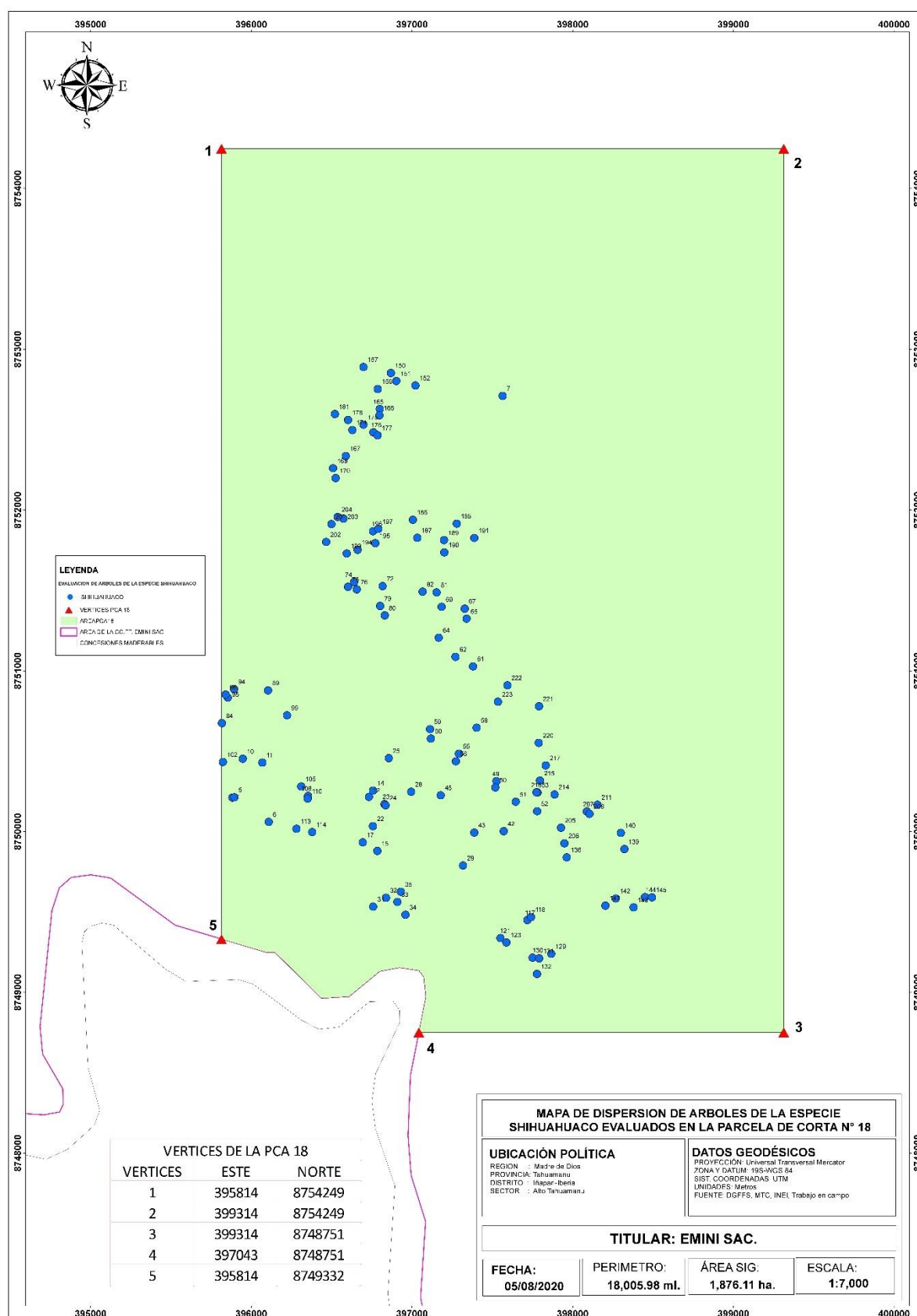


Figura 4. Mapa de dispersión de árboles de *Dipteryx spp.* en el Plan Operativo N° 18 de la Concesión Forestal EMINI SAC.

3.4. Métodos y técnicas

3.4.1. Lugar de estudio.

El lugar de estudio fue la parcela de corta N° 18 de la Concesión Forestal EMINI SAC (Contrato N° 17-TAH/C-J-019-02), que comprende un área de 1876 ha. La concesión forestal EMINI SAC está localizada en las coordenadas 11° 20' 37" Latitud Sur y 69° 48' 54" Longitud Oeste, en el Distrito de Iñapari, Provincia de Tahuamanu, Departamento de Madre de Dios, Perú (Figura 3). 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 milímetros (GOREMAD 2010). El área está conformada por bosques de colina baja fuerte con paca, bosque de colina baja suave con paca y bosque de terreta baja con paca; cuenta con alto potencial maderable, abundando especies como *Cedrelinga cateniformis*, *Dypterix spp.*, *Miroxylum balsamum*, *Tabebuia sp.*, *Amburana cearensis*, *Manilkara bidentata*, *Hymenaea spp.*, *Couratari guianensis*, entre muchas otras. Actualmente de estos bosques están extrayéndose árboles de especies comerciales con base en el Plan General de Manejo Forestal y el Plan Operativo Anual N° 18 (Figura 5) de la Concesión EMINI SAC.

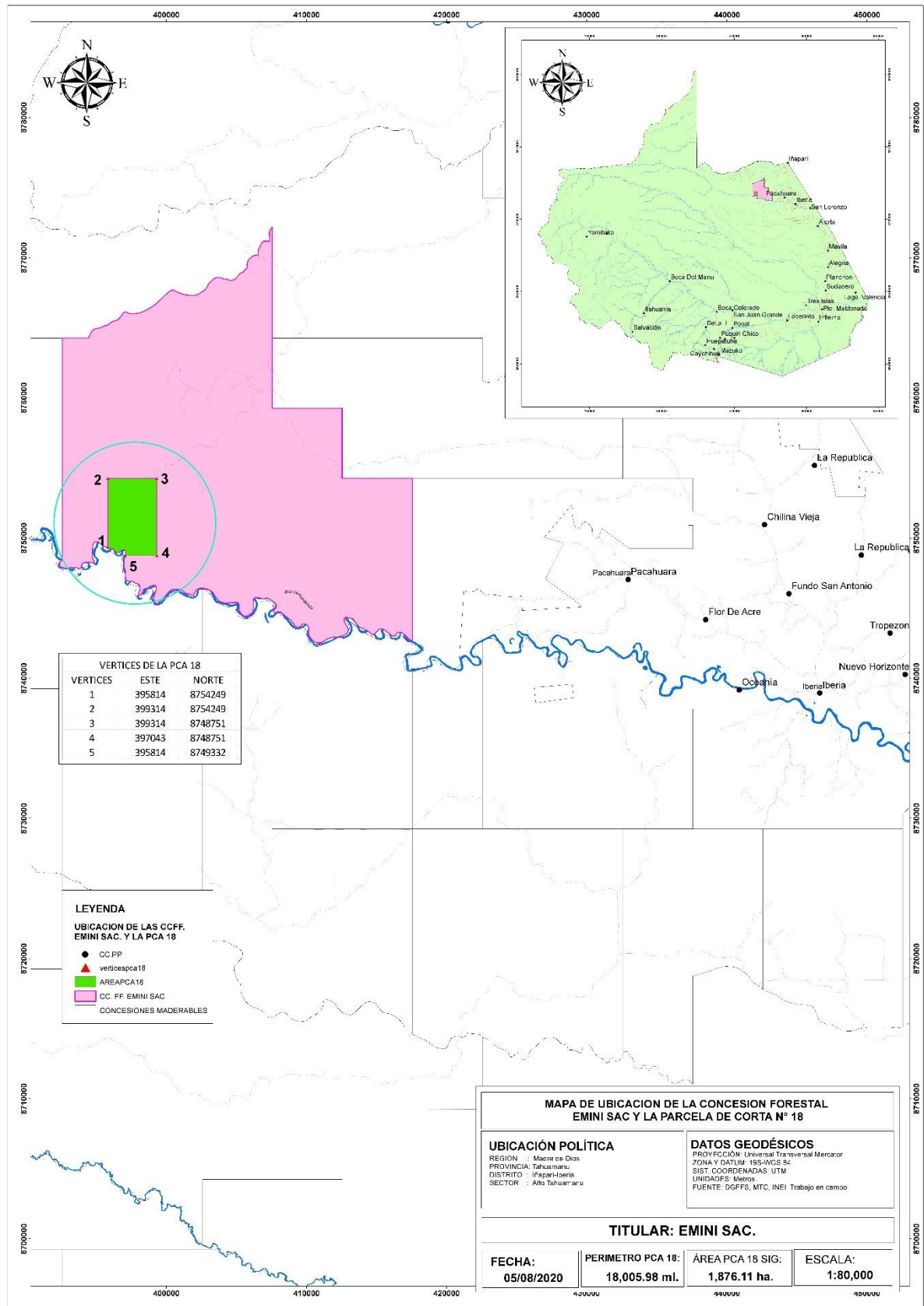


Figura 5. Mapa de ubicación de la Concesión Forestal EMINI SAC y Parcela de Corta N° 18.

3.4.2. Determinación del Coeficiente mórfico

Previo al apeo de los árboles, se midió la circunferencia a la altura del pecho (CAP) con cinta métrica en todos los árboles en pie que conformaban la muestra, para posteriormente calcular el DAP a partir de dicho valor.

Posteriormente, los árboles fueron apeados como parte de las actividades de aprovechamiento forestal. En ese momento, se realizaron mediciones sucesivas del diámetro (incluyendo la corteza) a lo largo del fuste, desde la base del fuste apeado (extremo inferior), y a partir de allí, a cada dos metros hasta el topo del fuste (extremo superior), abarcando toda la longitud comercial del fuste (H) (Figura 6). De tal forma que el fuste quedó subdividido imaginariamente en varias secciones de longitud igual a 2 m (no implica cortar, sino solo la marcación a lo largo del fuste), excepto la sección final, que tuvo una longitud variable menor a 2 m.

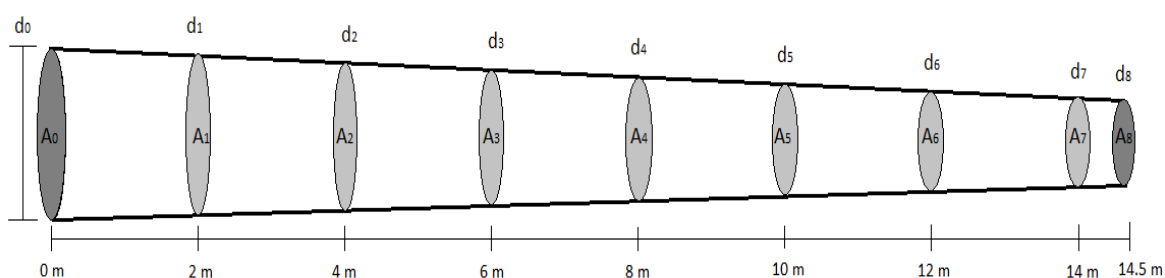


Figura 6. Esquema de la forma de medición de los diámetros (d) y su respectiva área de la sección transversal (A), cada 2 metros de longitud a lo largo del fuste.

Para la medición de los diámetros, se usó una forcípula de 1,5 m de longitud efectiva, construida artesanalmente en madera. Asimismo, la altura comercial fue medida usando una wincha métrica de 50 m de longitud desde la base (sección donde se realizó el corte) hasta el punto donde inicia la ramificación principal, que coincide con la última medición del diámetro. También fue medida la altura del tocón, desde la superficie del suelo hasta la sección de corte; así como el espesor de la corteza en los lados de la base del fuste apeado, usando un vernier digital.

Posteriormente, a partir de las mediciones sucesivas del diámetro del fuste y de la altura, se calculó el volumen real del fuste (V_f), mediante la cubicación por trozas sucesivas (Rondeux y Díaz de Barrionuevo 2010; Avery y Burkhart

2002). Para este método, se calculó el volumen de cada sección del fuste (V_s), a partir de los diámetros menores y mayores y de la longitud de la sección, empleando la fórmula de Smalian (ecuación 2). El volumen real del fuste (V_f) fue la suma del volumen de las secciones del fuste (V_s) (ecuación 3).

$$V_s = \frac{\pi(d_1^2 + d_2^2)}{8} \times L \quad \dots \text{ecuación 2}$$

Donde:

V_s =Volumen de la sección calculado mediante la fórmula de Smalian

d_1 = Diámetro mayor de la sección

d_2 = Diámetro menor de la sección

L = Longitud de la sección

$$V_f = V_{s_1} + V_{s_2} + V_{s_3} + V_{s_{n-1}} + V_{s_n} = \sum_{n=1}^n V_{s_n} \quad \dots \text{ecuación 3}$$

Donde:

V_{s_n} = Volumen de la sección n

n = Número de secciones del fuste

Para cada árbol, fue calculado el coeficiente mórfico (F), relacionando el volumen real del fuste (V_f), obtenido mediante la cubicación por secciones sucesivas, con el volumen del cilindro con diámetro igual al DAP (Prodan, Michail et al. 1997; Marshall y LeMay 1990), usando las ecuaciones 4 y 5. Posteriormente, se calculó la media del coeficiente mórfico promedio para cada especie.

$$F = \frac{V_f}{\text{Volumen del cilindro}_{d=DAP}} \quad \dots \text{ecuación 4}$$

$$\text{Volumen del cilindro} = \frac{\pi \times DAP^2 \times H}{4} \quad \dots \text{ecuación 5}$$

Donde:

V_f : Volumen real del fuste (m^3)

DAP= Diámetro a la altura del pecho (m)

H= Altura comercial (m)

3.4.3. Desarrollo de las funciones de volumen

El volumen de un árbol se calcula en función del DAP y la altura comercial (H), y la forma del árbol (F): $V = f(\text{DAP}, H, F)$. Sin embargo, dado que F es complicado de obtener para cada árbol, el volumen se estima solamente a partir del DAP y de H. En esta investigación, se probaron 9 modelos comúnmente usados para funciones de volumen de dos variables predictoras (DAP y H) (Van Laar y Akça 2007; Prodan, M et al. 1997; Marshall y LeMay 1990; Akindele 2005; Clutter et al. 1983; Romahn de la Vega, Maldonado y García 1994), los cuales se muestran en la Tabla 5.

Tabla 5. Modelos de volumen que se probaron.

Tipo	Forma original	Fuente
Variable combinada de 1er grado	$V = \beta_0 + \beta_1 \cdot \text{DAP}^2 \cdot H$	(Bi y Hamilton 1998)
Variable combinada generalizada, o Australiana	$V = \beta_0 + \beta_1 \cdot \text{DAP}^2 + \beta_2 \cdot H + \beta_3 \cdot \text{DAP}^2 \cdot H$	(Clutter et al. 1983)
Meyer modificada	$V = \beta_0 + \beta_1 \cdot \text{DAP} + \beta_2 \cdot \text{DAP}^2 + \beta_3 \cdot \text{DAP} \cdot H + \beta_4 \cdot \text{DAP}^2 \cdot H$	(Imaña-Encinas 1998)
Comprensiva	$V = \beta_0 + \beta_1 \cdot \text{DAP} + \beta_2 \cdot \text{DAP}^2 + \beta_3 \cdot \text{DAP} \cdot H + \beta_4 \cdot \text{DAP}^2 \cdot H + \beta_5 \cdot H$	(Imaña-Encinas 1998; Cysneiros, Pelissari y Machado 2017)
Naslund	$V = \beta_0 + \beta_1 \cdot \text{DAP}^2 + \beta_2 \cdot \text{DAP}^2 \cdot H + \beta_3 \cdot H^2 + \beta_4 \cdot \text{DAP} \cdot H^2$	(Van Laar y Akça 2007)
Australiana de Stoa	$V = \beta_0 + \beta_1 \cdot \text{DAP}^2 + \beta_2 \cdot \text{DAP}^3 + \beta_3 \cdot H + \beta_4 / H$	(Prodan, M et al. 1997)
Variable combinada de 2do grado	$V = \beta_0 + \beta_1 \cdot \text{DAP}^2 \cdot H + \beta_2 \cdot (\text{DAP}^2 \cdot H)^2$	(Imaña-Encinas 1998)
Logarítmica de Schumacher	$V = \beta_0 \cdot \text{DAP}^{\beta_1} \cdot H^{\beta_2} + \varepsilon_i$ $\log V = \log \beta_0 + \beta_1 \cdot \log \text{DAP} + \beta_2 \cdot \log H$	(Prodan, M et al. 1997; Clutter et al. 1983; Van Laar y Akça 2007)

Variable combinada logarítmica	$V = \beta_0 \cdot (DAP^2 \cdot H)^{\beta_1} + \epsilon_i$ $\log V = \log \beta_0 + \beta_1 \cdot \log (DAP^2 \cdot H)$	(Imaña-Encinas 1998; Cysneiros, Pelissari y Machado 2017)
--------------------------------------	---	---

Donde β_0 , β_1 , β_2 , β_3 , β_4 y β_5 corresponden a los coeficientes del modelo, y "log" representa el operador logaritmo en base 10.

Los coeficientes se calcularon mediante el método de regresión de mínimos cuadrados, evaluándose tanto la significancia individual de cada coeficiente como la significancia global de la regresión ($p < 0,05$). Asimismo, se realizaron los análisis correspondientes para verificar el cumplimiento de los supuestos del modelo de regresión lineal, esto es, la independencia de los residuos, la homogeneidad de las varianzas y la normalidad de las observaciones.

Con el propósito de evaluar los distintos modelos y seleccionar aquel que ofreciera predicciones más precisas del volumen comercial, se calcularon la suma de los cuadrados residuales de las predicciones (SSE), la raíz del cuadrado medio del error (RMSE) y el coeficiente de determinación ajustado (R^2_{adj}). Se consideraron como mejores modelos aquellos que presentaron los valores más bajos de SSE y RMSE, indicadores que resultan más sensibles que el R^2_{adj} al momento de seleccionar variables predictoras (Bi y Hamilton 1998). De manera complementaria, la bondad de ajuste se evaluó a través del criterio de información de Akaike (AIC), de modo que, entre dos modelos con igual número de parámetros, se consideró como mejor a aquel con mayor verosimilitud, es decir, con el menor valor de AIC (Picard, Saint-André y Henry 2012).

Finalmente, el modelo seleccionado fue sometido a un proceso de validación, contrastando sus predicciones con observaciones independientes de las utilizadas en su ajuste. Para ello, se graficaron los valores observados en el eje de las abscisas (eje X) frente a los valores predichos por el modelo en el eje de las ordenadas (eje Y), aplicándose los mismos criterios empleados en la selección del mejor modelo (SSE, RMSE, R^2 , AIC). En este sentido, cuanto mayor fuera el ajuste lineal entre las observaciones y las predicciones, mayor sería la validez del modelo para su aplicación en la estimación del volumen comercial (Picard, Saint-André y Henry 2012).

3.5. Tratamiento de los datos

La organización y estructura de los datos se realizaron en hojas de cálculo de Excel. Se realizaron comparaciones de la variación del DAP y H promedio entre las dos especies, usando un gráfico de boxplot.

Los análisis de determinación del coeficiente mórfico (F) consistieron en cálculos matemáticos de volumen de las secciones (ecuación 2), volumen real del fuste (ecuación 3), volumen del cilindro (ecuación 5) y finalmente el coeficiente mórfico (ecuación 4) de cada árbol. El coeficiente mórfico de la especie se obtuvo mediante el promedio aritmético de los coeficientes mórficos de cada árbol de la muestra.

Posteriormente, se obtuvieron las funciones de volumen mediante los análisis de regresión lineal probando los 12 modelos propuestos (Tabla 5). Los modelos fueron evaluados mediante la raíz del cuadrado medio del error (RMSE), el coeficiente de determinación ajustado (R^2), y el criterio de información de Akaike (AIC), siendo este último el parámetro que determinó la mejor ecuación (modelo con menor AIC) (Picard, Saint-André y Henry 2012). Los análisis fueron realizados en el software R, la significancia para los análisis fue de 5% ($p < 0,05$).

CAPÍTULO IV: RESULTADOS DE LA INVESTIGACIÓN

Los resultados muestran que las dimensiones (dap, altura comercial, y volumen comercial) de los árboles muestreados de *M. balsamum* y *Dipteryx spp.* tuvieron una distribución simétrica con algunos pocos valores atípicos (Figura 7 y Figura 8).

El dap de los árboles muestreados de *M. balsamum* varió entre 45,3 y 97,0 cm con un dap medio de 61,91 cm, y la altura comercial entre 10,5 m y 26,8 m con un valor medio de 18 m. El volumen comercial presentó mayor variación comparado con el dap y la altura comercial, siendo el volumen mínimo de 1,92 m³ y el volumen máximo de 8,07 m³, y un volumen promedio de 3,88 m³ (Figura 8).

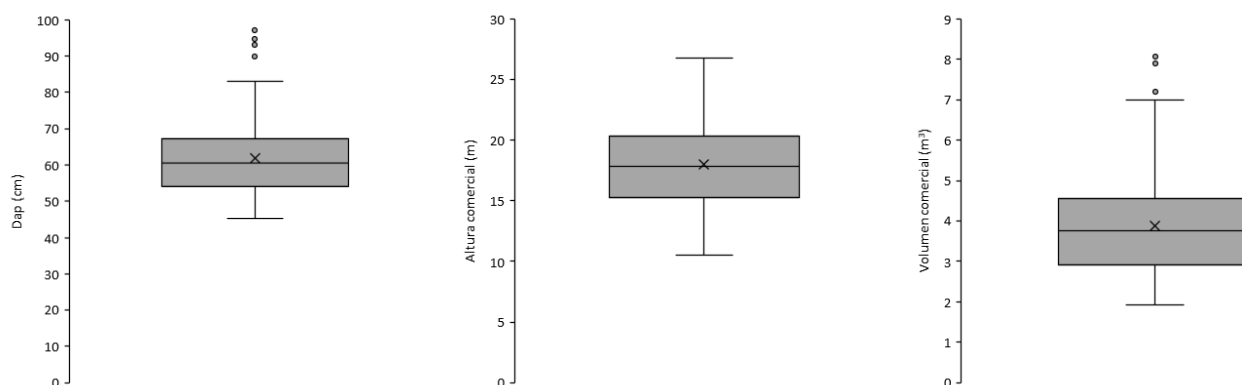


Figura 7. Diagramas de caja de las distribuciones de las dimensiones de los árboles muestreados de *Myroxylon balsamum*.

Respecto a *Dipteryx spp.*, las dimensiones de los árboles fueron mucho mayores que las de *M. balsamum*, con un dap promedio de 102,39 cm, variando entre 70,8 cm y 155 cm, altura comercial promedio de 16,5 m, con un rango entre 9,3 m y 29,8 m, y volumen comercial promedio de 11,36 m³, variando entre 3,61 m³ y 25,07 m³ (Figura 8).

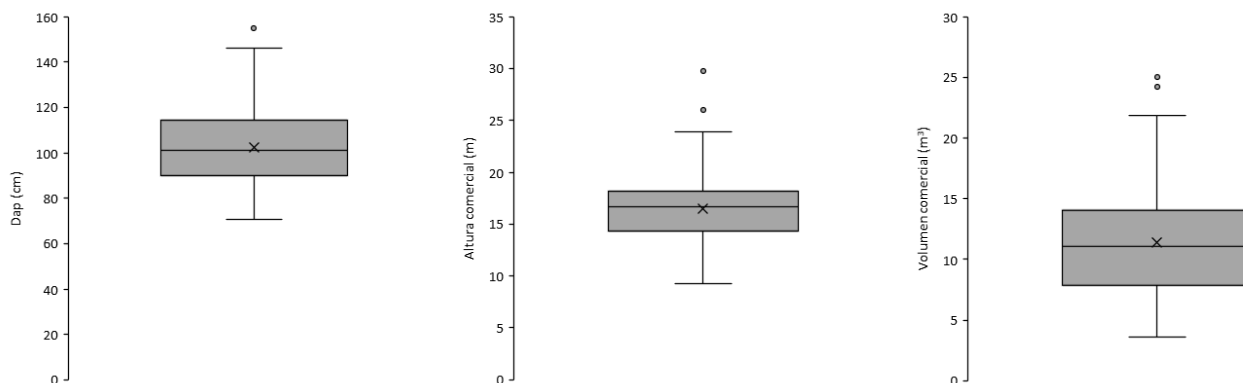


Figura 8. Diagramas de caja de las distribuciones de las dimensiones de los árboles muestreados de *Dipteryx spp.*

Las distribuciones de las dimensiones de los árboles muestreados revelan un amplio rango de variación del dap, altura y volumen comercial, en ambas especies, lo cual es deseable para la construcción de ecuaciones de volumen representativas y factor de forma no sesgados.

4.1. Coeficiente mórfico

El coeficiente mórfico o factor de forma promedio de *M. balsamum* fue de 0,73 con un coeficiente de variación de 17,54%, mientras que el factor de forma promedio de *Dipteryx spp.* fue de 0,81 con un coeficiente de variación de 11,67% (Tabla 6 y Figura 9).

En el caso de *M. balsamum*, la media (0,73) resulta apenas superior a la mediana (0,72), lo que sugiere una ligera asimetría positiva en la distribución de los coeficientes mórficos. Esto implica que existen algunos valores relativamente altos que elevan la media respecto de la mediana, aunque la diferencia es mínima y en general la distribución puede considerarse bastante simétrica. En el caso de *Dipteryx spp.*, la media (0,81) coincide exactamente con la mediana (0,81), reafirmando una distribución simétrica.

Tabla 6. Media, mediana y coeficiente de variación del coeficiente mórfico de *Myroxylon balsamum* y *Dipteryx spp.*

Especie	Media	Mediana	Coeficiente de variación (%)
<i>Myroxylon balsamum</i>	0,73	0,72	17,54
<i>Dipteryx spp</i>	0,81	0,81	11,67

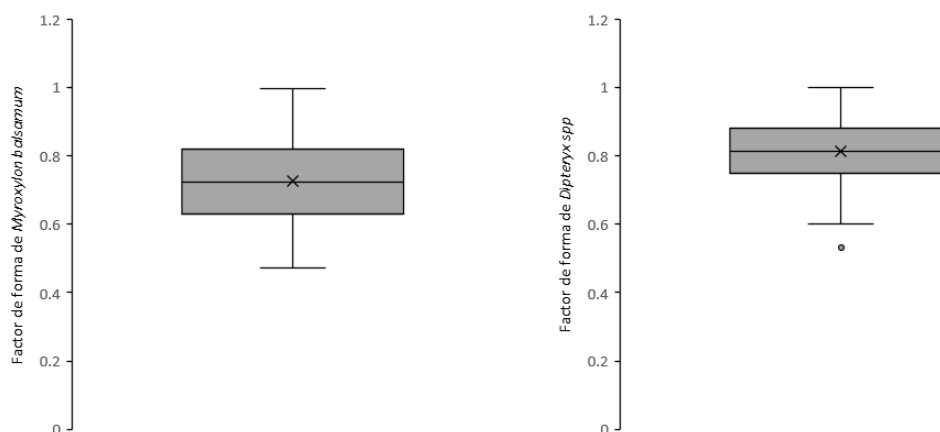


Figura 9. Diagrama de caja de la distribución del coeficiente mórfico de *Myroxylon balsamum* (izquierda) y *Dipteryx spp.* (derecha).

Estos valores son similares a lo obtenido en otros estudios en Madre de Dios con *M. balsamum*, con un coeficiente mórfico de 0,76 (Huanca Choque y Camala Huaquisto 2021), o 0,73 (Jara y Fernandez 2019a).

Respecto a *Dipteryx spp*, otros estudios en esta especie encontraron coeficiente mórfico ligeramente menor, de 0,79 (Ovalle F 2008), o de 0,80 (Jara y Fernandez 2019a). No existen más estudios realizados en la región de Madre de Dios.

Los resultados obtenidos en el presente estudio, con coeficientes mórficos de 0,73 para *M. balsamum* y 0,81 para *Dipteryx spp.*, son concordantes con los estudios previos realizados en estas especies; por tanto, tomando en cuenta los otros estudios, los coeficientes mórficos de *M. balsamum* estarían variando entre 0,73 y 0,76, mientras que para *Dipteryx spp.* estarían variando incluso menos, entre 0,79 y 0,81.

4.2. Funciones de volumen

Los coeficientes de las funciones de volumen (o ecuaciones de volumen), errores estándar de la estimación (RSE), coeficiente de determinación ajustado (R^2 adj) y criterio de información de Akaike (AIC) para las funciones de volumen para *M. balsamum* y *Dipteryx* spp. se presentan en las Tablas 7 y 8, respectivamente. Los coeficientes obtenidos para los modelos de ambas especies resultan comparables con los reportados en investigaciones realizadas en otras regiones tropicales (Akindele y LeMay 2006).

Al contrastar las distintas ecuaciones de regresión múltiple, lineales y no lineales, consideradas en el análisis, y tomando como referencia los criterios de bondad de ajuste correspondientes (el menor error estándar residual de la estimación o RSE, el mayor coeficiente de determinación múltiple ajustado o R^2 adj, y el menor valor del criterio de información de Akaike o AIC), la ecuación logarítmica de Schumacher resultó ser la que mejor se ajustó como función de volumen para *M. balsamum*, con valores de RSE = 0,67, R^2 adj = 0,75 y AIC = 246,43:

$$V = 0,0008417 \times DAP^{1,5741325} \times H^{0,6711147} \text{ (Tabla 7).}$$

Donde V es el volumen estimado, DAP es el diámetro a la altura del pecho, y H es la altura comercial.

La función de volumen de Schumacher obtenida es muy robusta para predecir con buena confiabilidad el volumen comercial de árboles de *M. balsamum*, porque el RSE de 0,67 m³ es muy bajo; además, el modelo explica un 75% de la variación del volumen comercial.

También se observó que la función de variable combinada logarítmica y la función de variable combinada de 1.er grado tuvieron un buen grado de ajuste, las cuales también son recomendables para estimar el volumen comercial de *M. balsamum*.

Tabla 7. Funciones de volumen de *Myroxylon balsamum* con sus respectivos coeficientes, valores *p*, error estándar residual (RSE), coeficiente de determinación ajustado (R^2 adj) y criterio de información de Akaike (AIC).

Tipo	Función de volumen	Valor p	RSE (m ³)	R ² _{adj}	AIC
Variable combinada de 1er grado	$V = 0,951 + 4,177 \times 10^{-5} \times \text{DAP}^2 \times H$	$< 2,2 \times 10^{-16}$	0,67	0,72	247,35
Variable combinada generalizada	$V = -0,4516 + 4,058 \times 10^{-4} \times \text{DAP}^2 + 7,705 \times 10^{-2} \times H + 1,923 \times 10^{-5} \times \text{DAP}^2 \times H$	$< 2,2 \times 10^{-16}$	0,66	0,73	247,88
Meyer modificada	$V = -1,216 \times 10^{-2} - 1,605 \times 10^{-2} \times \text{DAP} + 5,54 \times 10^{-4} \times \text{DAP}^2 + 2,518 \times 10^{-3} \times \text{DAP} \times H - 1,244 \times 10^{-6} \times \text{DAP}^2 \times H$	$< 2,2 \times 10^{-16}$	0,67	0,72	249,64
Comprensiva	$V = -2,164 + 4,817 \times 10^{-2} \times \text{DAP} + 8,581 \times 10^{-5} \times \text{DAP}^2 - 1,243 \times 10^{-3} \times \text{DAP} \times H + 2,635 \times 10^{-5} \times \text{DAP}^2 \times H + 1,254 \times H$	$< 2,2 \times 10^{-16}$	0,67	0,72	251,59
Naslund	$V = 0,3447 + 2,778 \times 10^{-4} \times \text{DAP}^2 + 3,056 \times 10^{-5} \times \text{DAP}^2 \times H + 2,672 \times 10^{-3} \times H^2 - 2,906 \times 10^{-5} \times \text{DAP} \times H^2$	$< 2,2 \times 10^{-16}$	0,67	0,72	250,30
Australiana de Stoat	$V = -0,6895 + 1,059 \times 10^{-3} \times \text{DAP}^2 - 3,161 \times 10^{-6} \times \text{DAP}^3 + 0,1088 \times H - 12,82/H$	$< 2,2 \times 10^{-16}$	0,67	0,72	250,51
Variable combinada de 2do grado	$V = 0,6617 + 4,968 \times 10^{-5} \times \text{DAP}^2 \times H - 4,766 \times 10^{-11} \times (\text{DAP}^2 \times H)^2$	$< 2,2 \times 10^{-16}$	0,67	0,72	248,74
Logarítmica de Schumacher	$V = 0,0008417 \times \text{DAP}^{1,5741325} \times H^{0,6711147}$ $\log V = -3,1068 + 1,56751 \times \log \text{DAP} + 0,70177 \times \log H$	$< 2,2 \times 10^{-16}$	0,67	0,75	246,43
Variable combinada logarítmica	$V = 0,0007767 \times (\text{DAP}^2 \times H)^{0,7642661}$ $\log V = -3,10263 + 0,76168 \times \log(\text{DAP}^2 \times H)$	$< 2,2 \times 10^{-16}$	0,67	0,75	246,53

Respecto a *Dipteryx spp.*, se observó que la mejor función de volumen fue la ecuación de Naslund (RSE = 1,31, R² adj = 0,92, y AIC = 411,95):

$$V = 1,552 - 3,123 \times 10^{-4} \times \text{DAP}^2 + 9,812 \times 10^{-5} \times \text{DAP}^2 \times H + 3,365 \times 10^{-3} \times H^2 - 1,831 \times 10^{-4} \times \text{DAP} \times H^2 \text{ (Tabla 8).}$$

Donde V es el volumen estimado, DAP es el diámetro a la altura del pecho, y H es la altura comercial.

La función de volumen de Naslund obtenida es muy robusta para predecir con buena confiabilidad el volumen comercial de árboles de *Dipteryx spp.*, porque

el RSE de 1,31 m³ es bajo; además, el modelo explica un 92% de la variación del volumen comercial.

También se observó que la función logarítmica de Schumacher tuvo un buen grado de ajuste, la cual también es recomendable para estimar el volumen comercial de *Dipteryx spp.*

Tabla 8. Funciones de volumen de *Dipteryx spp.* con sus respectivos coeficientes, valores p, error estándar residual (RSE), coeficiente de determinación ajustado (R^2_{adj}) y criterio de información de Akaike (AIC).

Tipo	Función de volumen	Valor p	RSE (m ³)	R ² _{adj}	AIC
Variable combinada de 1er grado	$V = 0,6054 + 6,008 \times 10^{-5} \times DAP^2 \times H$	$< 2,2 \times 10^{-16}$	1,42	0,90	429,83
Variable combinada generalizada	$V = 2,356 + 3,786 \times 10^{-5} \times DAP^2 - 0,1513 \times H + 6,2 \times 10^{-5} \times DAP^2 \times H$	$< 2,2 \times 10^{-16}$	1,35	0,91	419,21
Meyer modificada	$V = -5,116 + 0,1448 \times DAP - 6,303 \times 10^{-4} \times DAP^2 - 2,951 \times 10^{-3} \times DAP \times H + 7,52 \times 10^{-5} \times DAP^2 \times H$	$< 2,2 \times 10^{-16}$	1,35	0,91	418,59
Comprensiva	$V = -23,55 + 0,4889 \times DAP - 2,194 \times 10^{-3} \times DAP^2 - 2,551 \times 10^{-2} \times DAP \times H + 1,781 \times 10^{-4} \times DAP^2 \times H + 1,205 \times H$	$< 2,2 \times 10^{-16}$	1,34	0,91	419,29
Naslund	$V = 1,552 - 3,123 \times 10^{-4} \times DAP^2 + 9,812 \times 10^{-5} \times DAP^2 \times H + 3,365 \times 10^{-3} \times H^2 - 1,831 \times 10^{-4} \times DAP \times H^2$	$< 2,2 \times 10^{-16}$	1,31	0,92	411,95
Australiana de Stoa	$V = -2,908 + 1,814 \times 10^{-3} \times DAP^2 - 4,778 \times 10^{-6} \times DAP^3 + 0,265 \times H - 65,19/H$	$< 2,2 \times 10^{-16}$	1,49	0,89	443,03
Variable combinada de 2do grado	$V = -0,7279 + 7,512 \times 10^{-5} \times DAP^2 \times H - 3,66 \times 10^{-11} \times (DAP^2 \times H)^2$	$< 2,2 \times 10^{-16}$	1,41	0,90	428,29
Logarítmica de Schumacher	$V = 1,203 \times 10^{-4} \times DAP^{2,003} \times H^{0,7695}$ $\log V = -4,06664 + 2,05694 \times \log DAP + 0,79719 \times \log H$	$< 2,2 \times 10^{-16}$	1,34	0,92	415,62
Variable combinada logarítmica	$V = 1,351 \times 10^{-4} \times (DAP^2 \times H)^{0,938}$ $\log V = -4,03369 + 0,96851 \times \log(DAP^2 \times H)$	$< 2,2 \times 10^{-16}$	1,42	0,92	428,41

Las Figuras 10 y 11 muestran los gráficos de QQ-plots de los residuos de los modelos, que permiten evaluar gráficamente la distribución normal. Con un tamaño de muestra de $n = 120$, se tiene una situación en la que la prueba de Shapiro–Wilk es muy sensible: incluso desviaciones muy pequeñas de la normalidad producirán p-valores bajos, ya que con muestras grandes ($n > 100$), pequeñas desviaciones respecto a una distribución normal producen resultados estadísticamente significativos en Shapiro–Wilk, aunque no sean relevantes desde el punto de vista práctico (Wooldridge 2016; Montgomery, Peck y Vining 2021).

Por ello, es habitual complementar la prueba con una inspección visual mediante gráficos de QQ-plots de los residuos, ya que la normalidad en regresión lineal es un supuesto sobre los residuos, no sobre la variable dependiente.

En ambos casos, tanto para *M. balsamum* como para *Dipteryx spp.*, los gráficos no evidencian asimetría fuerte ni colas extremas. Esto sugiere que se cumple el supuesto de distribución normal, y aunque las desviaciones detectadas son leves para *M. balsamum* (Figura 10), no compromete las inferencias del modelo, especialmente considerando que el estimador de mínimos cuadrados ordinarios es robusto a desviaciones moderadas de normalidad por el Teorema Central del Límite, que indica que, si la muestra es suficientemente grande, la distribución muestral de los estimadores tiende a ser normal, aunque los errores no sean normales (Wooldridge 2016; Montgomery, Peck y Vining 2021).

En el caso específico de *Dipteryx spp.* no existen desviaciones según los QQ-plots en la mayoría de los modelos, y por tanto también se cumple el supuesto de distribución normal de los residuos (Figura 11).

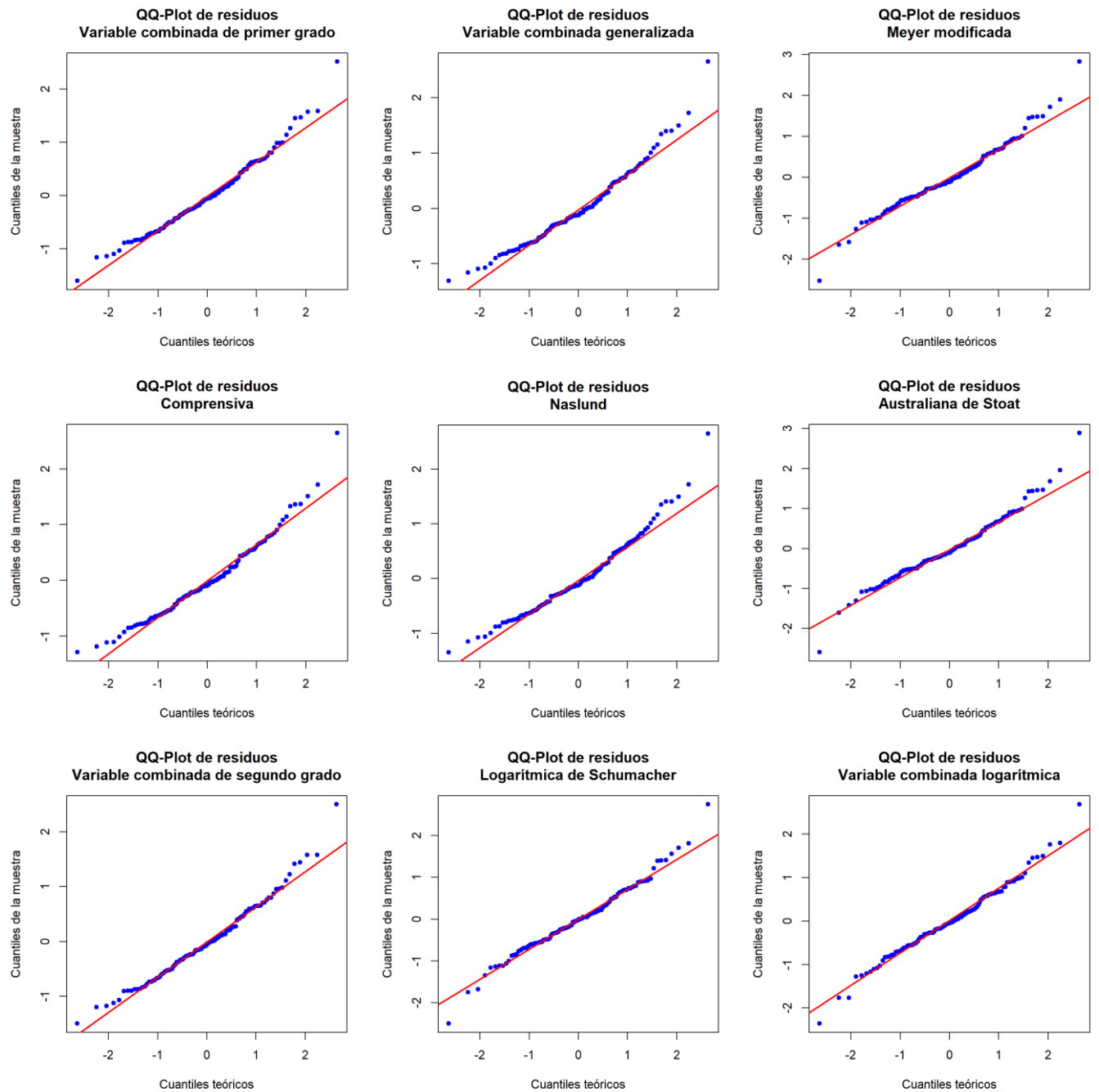


Figura 10. Gráfico de QQ-plot de residuos por cada modelo para la especie *Myroxylon balsamum*.

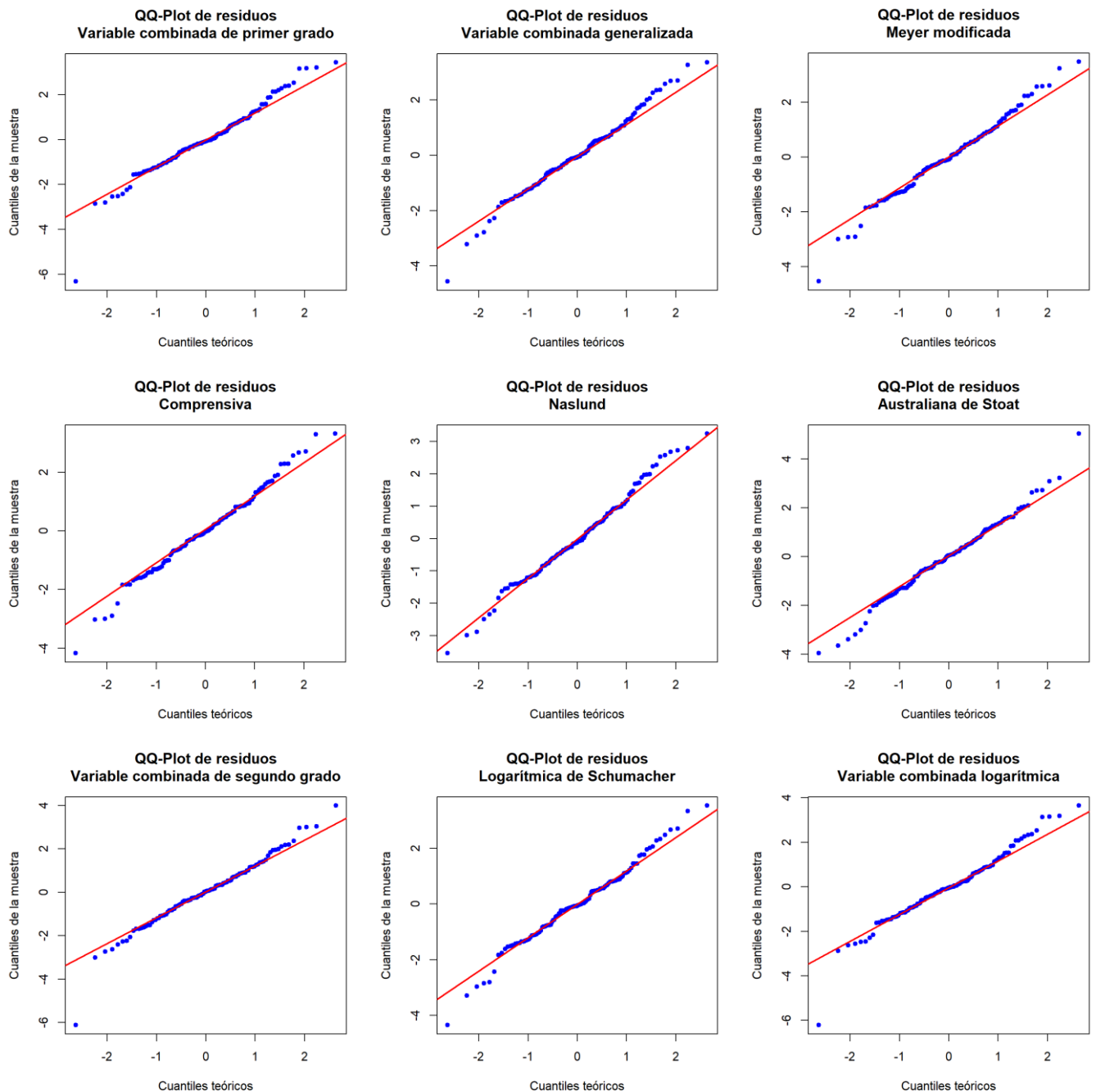


Figura 11. Gráfico de QQ-plot de residuos por cada modelo para la especie *Dipteryx spp.*

Los gráficos de residuos correspondientes a las funciones de volumen muestran, en general, una distribución uniforme de los residuos tanto por encima como por debajo de la línea cero, sin evidenciar una tendencia sistemática (Figura 12 y Figura 13). Este comportamiento sugiere que el método de mínimos cuadrados ponderados resultó efectivo para estabilizar la varianza del error, y que el empleo del recíproco de la transformación logarítmica $\log DAP$, $\log H$, así como de DAP^2 y DAP^2H , H^2 y $DAPH^2$ como

factor de ponderación, fue adecuado en este estudio para reducir la heterocedasticidad presente en todos los modelos.

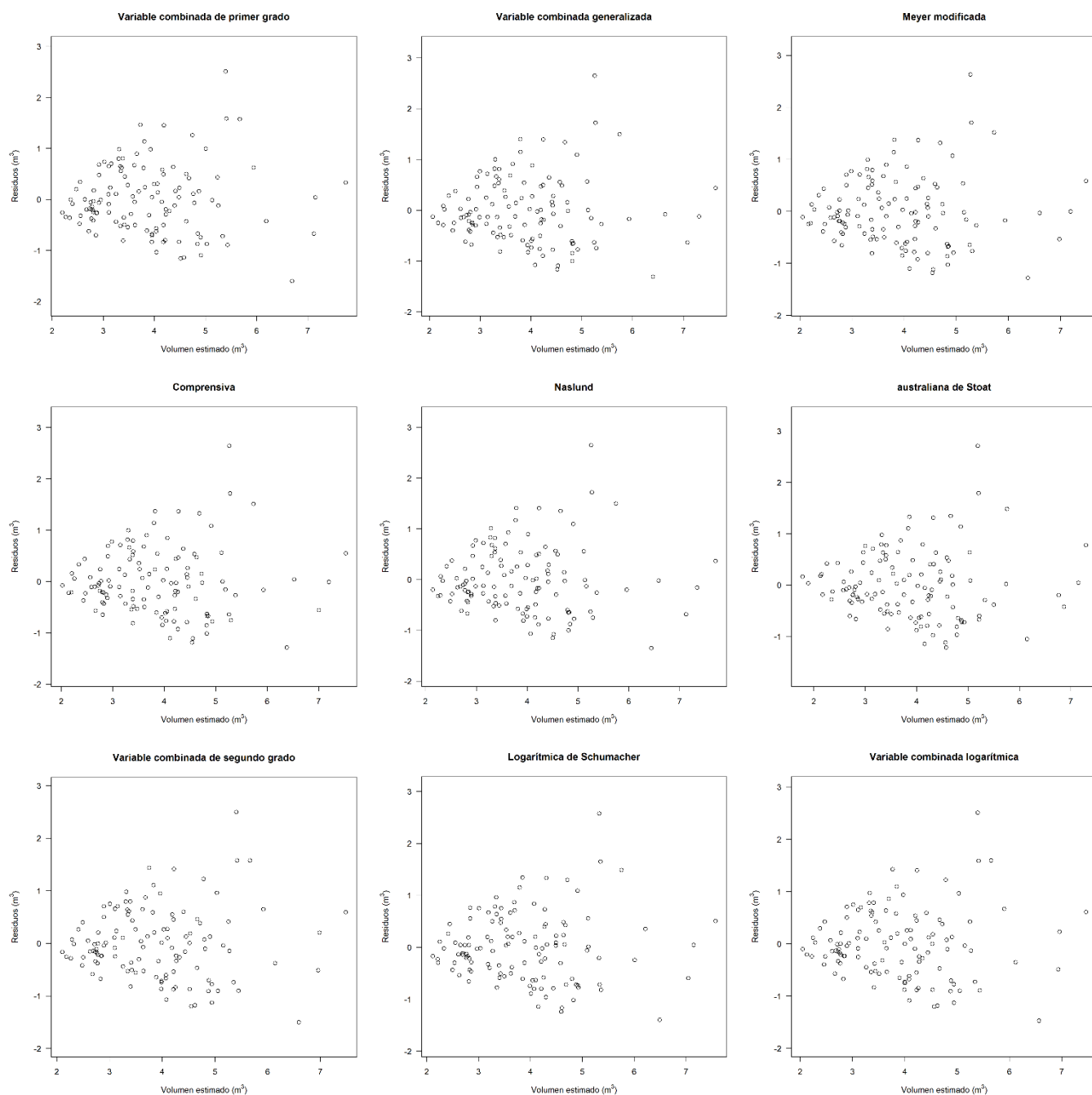


Figura 12. Gráfico de residuos por cada modelo para la especie *Myroxylon balsamum*.

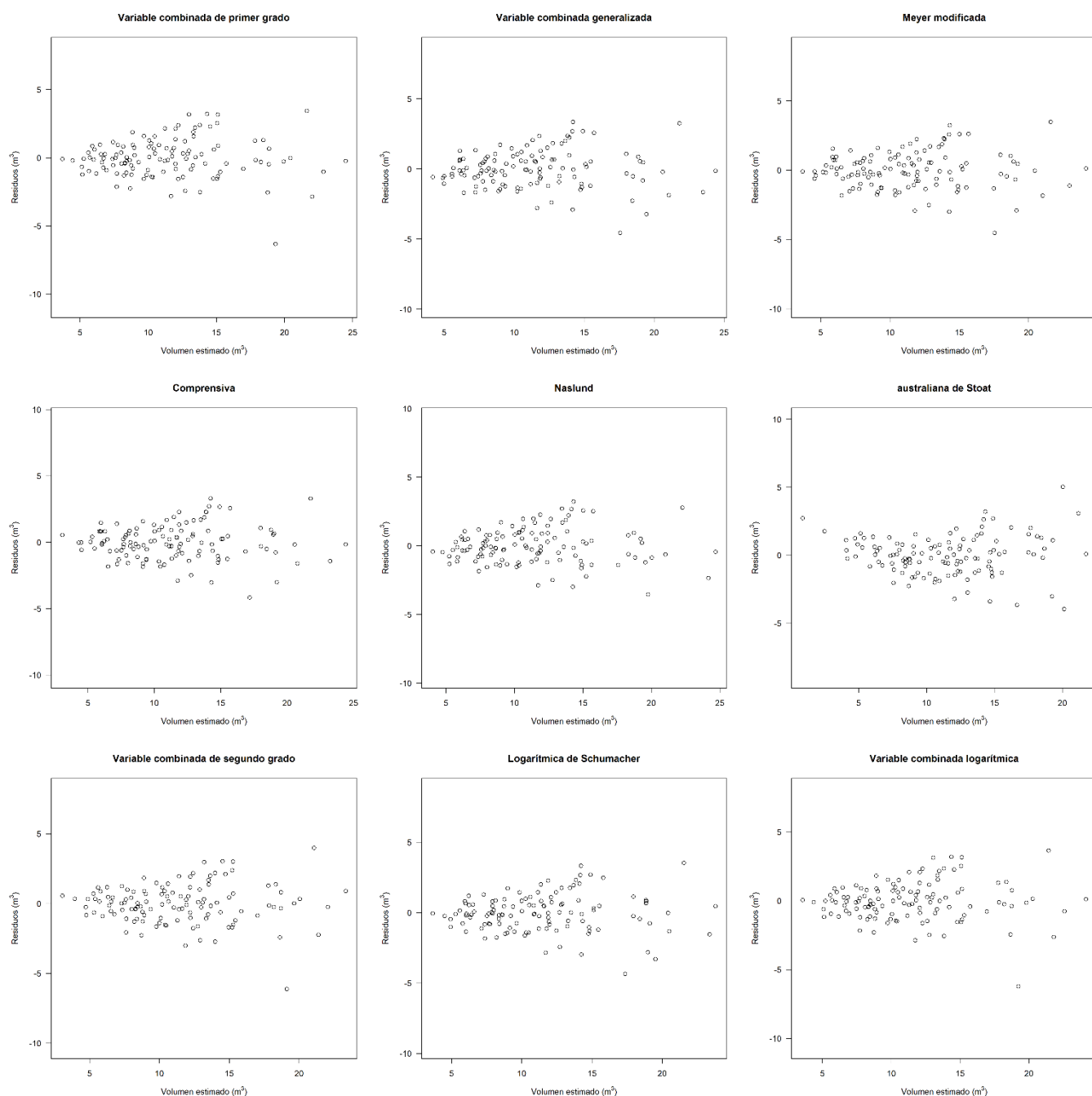


Figura 13. Gráfico de residuos por cada modelo para la especie *Dipteryx spp.*

Los gráficos de Estimados vs. Observados muestran que las predicciones de los volúmenes aplicando los modelos se ajustaron bien a los valores observados (valores medidos), y que existe una leve subestimación del volumen en el caso de árboles muy grandes, tanto en *M. balsamum* y *Dipteryx spp.* (Figura 14 y Figura 15).

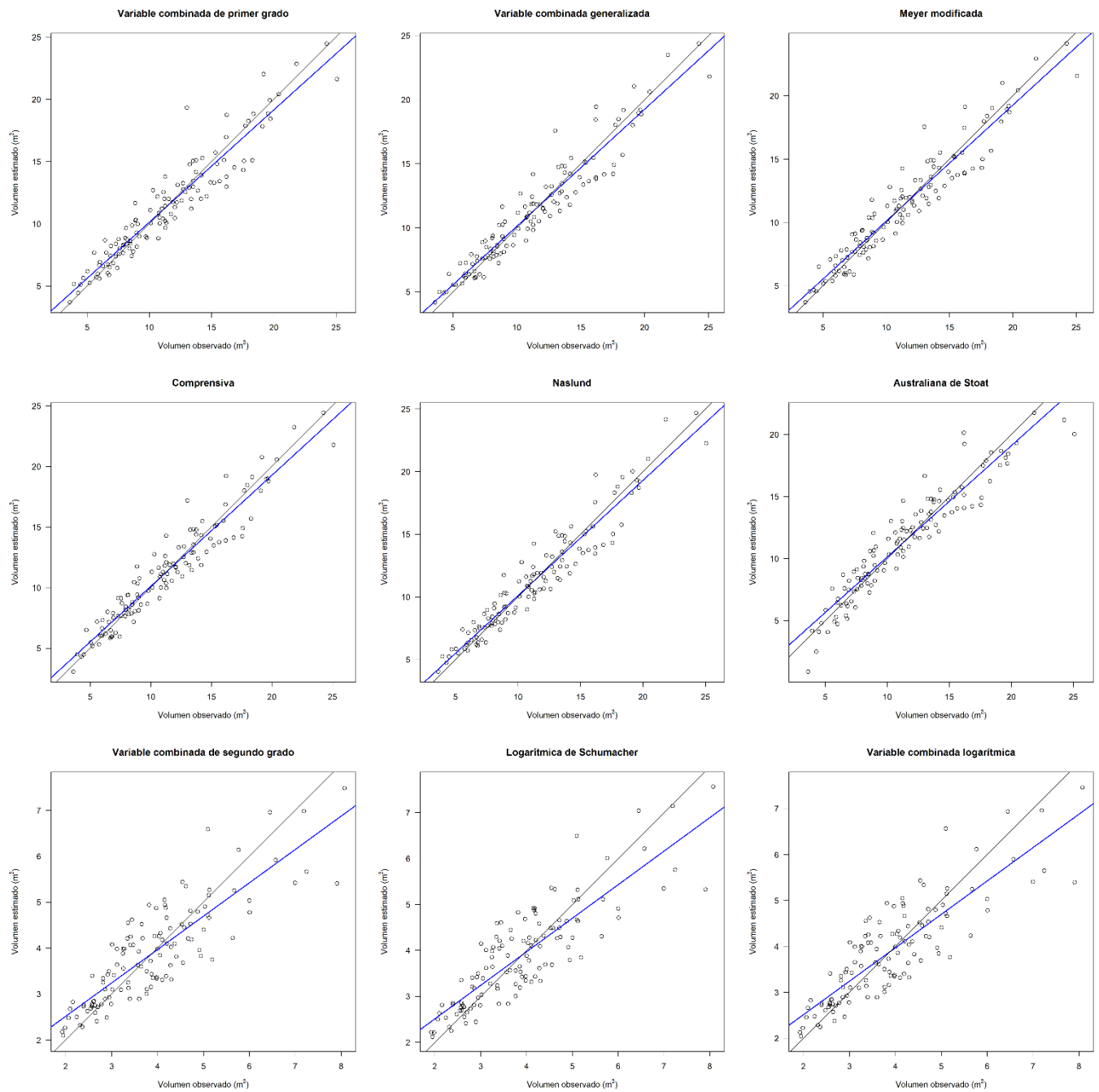


Figura 14. Volumen estimado vs. Volumen observado por modelo, para la especie *Myroxylon balsamum*.

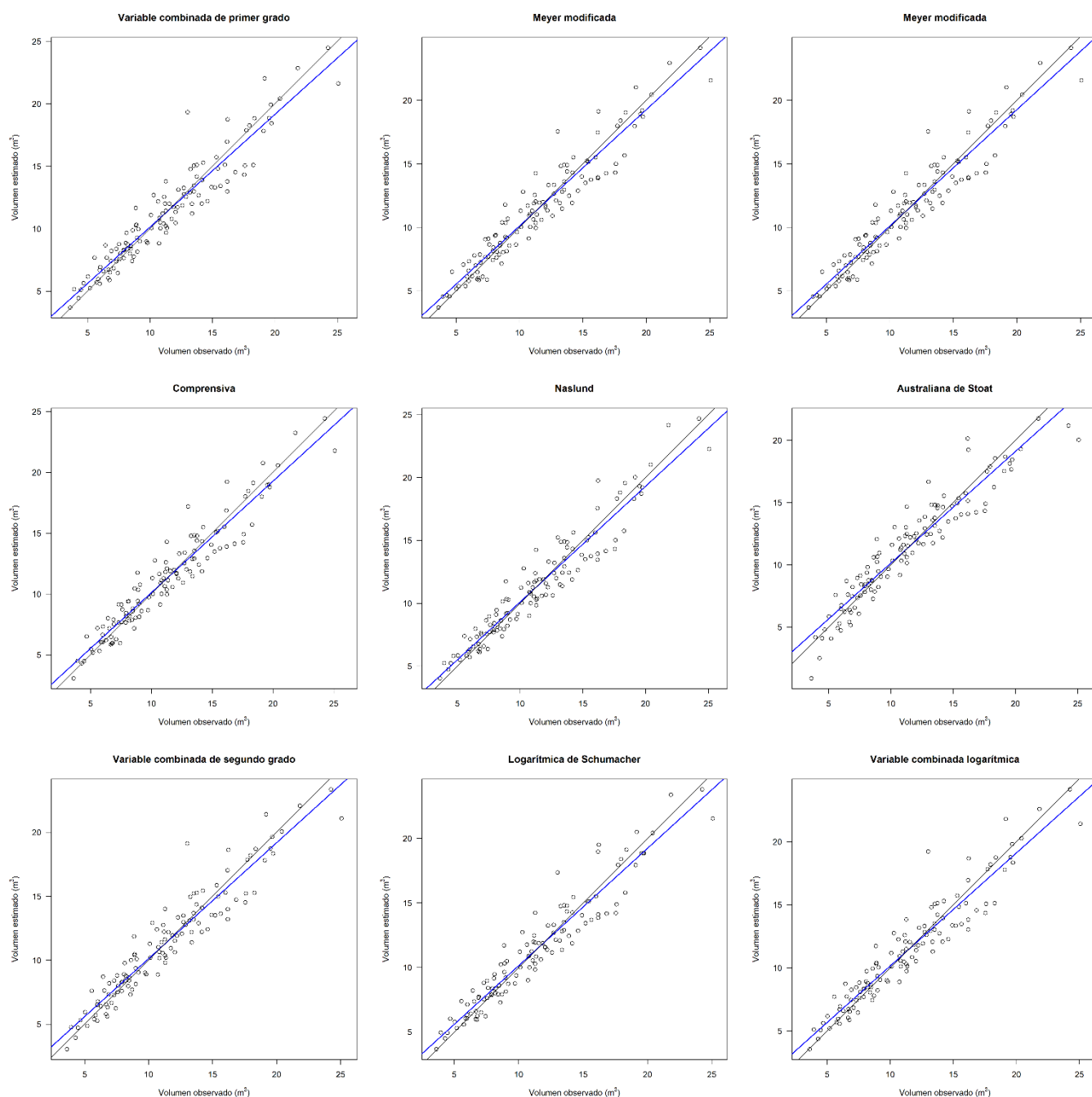


Figura 15. Volumen estimado vs. Volumen observado por modelo, para la especie *Dipteryx spp.*

A pesar de la alta importancia de estas dos especies en el sector forestal, los estudios de funciones de volumen y coeficiente mórfico aún son escasos. En un estudio realizado también en Madre de Dios, el mejor modelo para *M. balsamum* también fue el modelo logarítmico de Schumacher, con un R^2 de 0,78 y RSE de 0,815, una calidad de ajuste muy similar al presente estudio (Huanca Choque y Camala Huaquisto 2021). En contraste, otro estudio

reportó que el mejor modelo para *M. balsamum* fue la ecuación de variable combinada de primer grado, con $R^2 \text{ adj} = 0,93$ y $\text{RSE} = 0,48$ (Jara y Fernandez 2019b).

En el caso de *Dipteryx spp.*, se encontró un buen ajuste con el modelo logarítmico Schumacher, con $R^2=0,93$ (Ovalle F 2008). Similarmente, otro estudio más reciente encontró también que el mejor modelo para la predicción del volumen de *Dipteryx spp.* fue la función logarítmica Schumacher, con $R^2 = 0,94$ (Jara y Fernandez 2019a). Si bien en el presente estudio el mejor modelo fue el de Naslund con $R^2 \text{ adj} = 0,92$, el modelo de Schumacher también presentó una alta bondad de ajuste con igual $R^2 \text{ adj} = 0,92$, mostrando que este modelo es uno de los mejores para la estimación del volumen de árboles de *Dipteryx spp.*

Los estudios citados, realizados en la Amazonía, indican que, en general, el modelo logarítmico de Schumacher y el modelo de variable combinada de primer grado de Spurr proporcionan los mejores ajustes en la mayoría de las especies tropicales comerciales en áreas de manejo forestal bajo sistema de concesiones forestales. A esto se suma el modelo de Naslund, que fue el mejor para *Dipteryx spp.* encontrado en el presente estudio.

CONCLUSIONES

El coeficiente mórfico de *M. balsamum* fue de 0,73, superior al coeficiente mórfico de 0,65 que se viene empleando actualmente por la autoridad forestal.

Respecto a *Dipteryx spp.*, el coeficiente mórfico fue de 0,81, demostrando también que el verdadero factor de forma de la especie es muy superior a 0,65.

La mejor función de volumen de *M. balsamum* fue la Logarítmica de Schumacher (RSE = 0,67, R^2 adj = 0,75, y AIC = 246,43): $V = 0,0008417 \times DAP^{1,5741325} \times H^{0,6711147}$, la cual permite estimar con alta precisión el volumen comercial del fuste de *M. balsamum* en los bosques de Madre de Dios.

Mientras que para *Dipteryx spp.* la mejor función fue la de Naslund (RSE = 1,31, R^2 adj = 0,92, y AIC = 411,95): $V = 1,552 - 3,123 \times 10^{-4} \times DAP^2 + 9,812 \times 10^{-5} \times DAP^2 \times H + 3,365 \times 10^{-3} \times H^2 - 1,831 \times 10^{-4} \times DAP \times H^2$, la cual permite estimar con alta precisión el volumen comercial del fuste de *Dipteryx spp.* en los bosques de Madre de Dios.

Por lo tanto, se aceptan las hipótesis planteadas H1, H2, H3 y H4.

RECOMENDACIONES

Con base en los resultados del presente estudio, se recomienda que las autoridades del sector forestal actualicen los coeficientes mórficos de *M. balsamum* y de *Dipteryx spp.* los cuales son muy superiores a 0,65, coeficiente mórfico empleado por directrices del SERFOR.

Se recomienda profundizar la investigación en aquellas especies que aún no cuentan con información suficiente sobre su factor de forma, a fin de sustentar adecuadamente el procedimiento de ajuste de los factores de forma de las distintas especies forestales.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AKINDELE, S.O., 2005. Volume Functions for Common Timber Species of Nigeria's Tropical Rain Forests. S.I: International Tropical Timber Organization.
- AKINDELE, S.O. y LEMAY, V.M., 2006. Development of tree volume equations for common timber species in the tropical rain forest area of Nigeria. *Forest Ecology and Management*, vol. 226, no. 1-3, pp. 41-48. ISSN 03781127. DOI 10.1016/j.foreco.2006.01.022.
- AVERY, T. Eugene. y BURKHART, H.E., 2002. *Forest measurements*. S.I.: McGraw-Hill. ISBN 0073661767.
- BÄHRLE-RAPP, M., 2007. Myroxylon balsamum. *Springer Lexikon Kosmetik und Körperpflege*, pp. 121-123. DOI 10.1007/978-3-540-71095-0_6790.
- BALZARINI, M., RIENZO, J. Di, TABLADA, M., GONZALEZ, L., BRUNO, C., ROBLEDO, W. y CASANOVES, F., 1995. *Estadística y Biometría*. S.I.: Editorial Brujas.
- BATISTA, J.L.F., MARQUESINI, M. y VIANA, V.M., 2004. Equações de volume para árvores de caxeta (*Tabebuia cassinoides*) no Estado de São Paulo e sul do Estado do Rio de Janeiro. *Scientia Forestalis/Forest Sciences*, no. 65, pp. 162-175. ISSN 14139324.
- BEHAR RIVERO, D.S., 2008. *Introducción a la metodología de la investigación*. S.I.: Editorial Shalom. ISBN 978-959-212-783-7.
- BI, H. y HAMILTON, F., 1998. Stem volume equations for native tree species in southern New South Wales and Victoria. *Australian Forestry*, vol. 61, no. 4, pp. 275-286. ISSN 0004-9158. DOI 10.1080/00049158.1998.10674752.
- BOLFOR, 1997. Propuesta para la elaboración de tablas volumétricas y/o factores de forma. Documento técnico 54/1997. Proyecto de Manejo Forestal Sostenible BOLFOR – USAID. Santa Cruz, Bolivia: 54/1997.
- BROWN, S. (Sandra L.) y FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION OF THE UNITED NATIONS., 1997. *Estimating biomass and biomass change of tropical forests : a primer*. S.I.: Food and Agriculture Organization of the United Nations. ISBN 9251039550.
- CLARK, M.L., ROBERTS, D.A., EWEL, J.J. y CLARK, D.B., 2011. Estimation of tropical rain forest aboveground biomass with small-footprint lidar and hyperspectral sensors. *Remote Sensing of Environment*, vol. 115, no. 11, pp. 2931-2942. ISSN 00344257. DOI 10.1016/j.rse.2010.08.029.
- CLUTTER, J.L., FORTSON, J.C., PIENAAR, L. V., BRISTER, G.H. y BAILEY, R.L., 1983. *Timber management: a quantitative approach*. New York: John Wiley & Sons, Inc. ISBN 0471029610.

- COLPINI, C., TRAVAGIN, D.P., SOARES, T.S. y MORAES E SILVA, V.S., 2009. Determinação do volume, do fator de forma e da porcentagem de casca de árvores individuais em uma Floresta Ombrófila Aberta na região noroeste de Mato Grosso. *Acta Amazonica*, vol. 39, no. 1, pp. 97-104. ISSN 0044-5967. DOI 10.1590/S0044-59672009000100010.
- CORREIA, J., FANTINI, A. y PIAZZA, G., 2017. Equações volumétricas e fator de forma e de casca para florestas secundárias do litoral de Santa Catarina. *Floresta e Ambiente*, vol. 24, ISSN 21798087. DOI 10.1590/2179-8087.023715.
- CYSNEIROS, V.C., PELISSARI, A.L. y MACHADO, S.A., 2017. Modelos genéricos e específicos para estimativa do volume comercial em uma floresta sob concessão na Amazônia. *Scientia Forestalis*, vol. 45, no. 114, pp. 295-304. DOI dx.doi.org/10.18671/scifor.v45n114.06.
- ESTREMADOYRO, J.A., 2014. *Determinación del factor de forma o coeficiente mórfico de Manilkara bidentata (Quinilla colorada) en el consolidado Otorongo-Provincia de Tahuamanu*. S.l.: Universidad Nacional Amazónica de Madre de Dios.
- GOREMAD, 2010. Estudio de diagnóstico y zonificación para el tratamiento de la demarcación territorial de la provincia Tahuamanu-Volumen I. . Puerto Maldonado:
- GOUSSANOU, C.A., GUENDEHOU, S., ASSOGBADJO, A.E., KAIRE, M., SINSIN, B. y CUNI-SANCHEZ, A., 2016. Specific and generic stem biomass and volume models of tree species in a West African tropical semi-deciduous forest. *Silva Fennica*, vol. 50, no. 2, pp. 1-22. ISSN 22424075. DOI 10.14214/sf.1474.
- GUENDEHOU, G., LEHTONEN, a, MOUDACHIROU, M., MÄKIPÄÄ, R. y SINSIN, B., 2012. Stem biomass and volume models of selected tropical tree species in West Africa. *Southern Forests: a Journal of Forest Science*, vol. 74, no. 2, pp. 77-88. ISSN 2070-2620. DOI 10.2989/20702620.2012.701432.
- HARAUSZ, A., 2003. Tablas volumétricas para Yesquero Blanco (*Cariniana ianeirensis*), Ochoó (*Hura crepitans*) y Saúco (*Zanthoxylum* sp.) en Bolivia. . Santa Cruz, Bolivia: 116/2003.
- HERNÁNDEZ ESCOBAR, A.A., RAMOS RODRÍGUEZ, M.P., PLACENCIA LÓPEZ, B.M., INDACOCHEA GANCHOZO, B., QUIMIS GÓMEZ, A.J. y MORENO PONCE, L.A., 2018. *Metodología de la investigación científica*. S.l.: ÁREA DE INNOVACIÓN Y DESARROLLO, S.L. ISBN 9788494825705.
- HOFSTAD, O., 2005. *Review of biomass and volume functions for individual trees and shrubs in Southeast Africa*. 2005. S.l.: s.n. ISBN 01281283.

- HUANCA CHOQUE, M.R. y CAMALA HUAQUISTO, W., 2021. *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*. Puerto Maldonado: Universidad Nacional Amazónica de Madre de Dios.
- IMAÑA-ENCINAS, J., 1998. *Dasometría práctica*. Brasilia: Universidade de Brasilia.
- ITTO, 2018. Cumaru (Dipteryx spp) | ITTO. *ITTO Lesser used species* [en línea]. [consulta: 27 noviembre 2018]. Disponible en: <http://www.tropicaltimber.info/es/specie/cumaru-dipteryx-spp/#lower-content>.
- JARA, A. y FERNANDEZ, J.D., 2019a. *Determinación del factor de forma de Myroxylon balsamum Harms, Hymenaea oblongifolia Huber y Dipteryx odorata Willd en el consolidado Otorongo - provincia de Tahuamanu*. S.I.: Universidad Nacional Amazónica de Madre de Dios.
- JARA, A. y FERNANDEZ, J.D., 2019b. *Determinación del factor de forma de Myroxylon balsamum Harms, Hymenaea oblongifolia Huber y Dipteryx odorata Willd en el consolidado Otorongo - provincia de Tahuamanu*. Tesis de grado. S.I.: Universidad Nacional Amazónica de Madre de Dios.
- JOHANSSON, T., 2005. Stem volume equations and basic density for grey alder and common alder in Sweden. *Forestry*, vol. 78, no. 3, pp. 249-262. ISSN 0015752X. DOI 10.1093/forestry/cpi023.
- KACHAMBA, D.J. y EID, T., 2016. Total tree, merchantable stem and branch volume models for miombo woodlands of Malawi Total tree , merchantable stem and branch volume models for miombo. *Southern Forests*, vol. m, no. July, ISSN 20702639. DOI 10.2989/20702620.2015.1108615.
- MARSHALL, P.L. y LEMAY, V.M., 1990. *Introduction to Forest Mensuration and Photogrammetry*. Vancouver: The University of British Columbia.
- MATE, R., JOHANSSON, T. y SITOIE, A., 2015. Stem Volume Equations for Valuable Timber Species in Mozambique. *Journal of Sustainable Forestry*, vol. 34, no. 8, pp. 787-806. ISSN 1054-9811. DOI 10.1080/10549811.2015.1039043.
- MAUYA, E.W., MUGASHA, W.A., ZAHABU, E., BOLLANDSÅS, O.M. y EID, T., 2014. Models for estimation of tree volume in the miombo woodlands of Tanzania. *Southern Forests: a Journal of Forest Science*, vol. 76, no. 4, pp. 209-219. ISSN 2070-2620. DOI 10.2989/20702620.2014.957594.

- MONTGOMERY, D.C., PECK, E.A. y VINING, G.G., 2021. *Introduction to Linear Regression Analysis*. 7. Hoboken, NJ: Wiley. ISBN 9781119665285.
- OTAROLA ACEVEDO, E. y LINARES BENSIMON, C., 2002. Tablas de volumen total y comercial de *Cedrelinga catenaeformis* Ducke "Tornillo" para plantaciones en Loreto, Peru. *Folia Amazonica*, vol. 13, no. 1,2, pp. 151-174.
- OUNEKHAM, K., 2009. *Developing volume and taper equations for Styrax tonkinensis in Laos*. S.I.: University of Canterbury.
- OVALLE F, D., 2008. *Determinación del factor de forma de Dipteryx micrantha Harms (Shihuahuaco) en el consolidado Otorongo-Provincia de Tahuamanu*. S.I.: Universidad Nacional Amazónica de Madre de Dios.
- PICARD, N., SAINT-ANDRÉ, L. y HENRY, M., 2012. *Manual de construcción de ecuaciones alométricas para estimar el volumen y la biomasa de los árboles: del trabajo de campo a la predicción*. S.I.: Las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura y el Centre de Coopération Internationale en Recherche Agronomique pour le Développement. ISBN 9789253073474.
- PRODAN, Michail, PETERS, R., COX, F. y REAL, P., 1997. *Mensura Forestal*. San Jose, Costa Rica: Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura.
- PRODAN, M, PETERS, R., COX, F. y REAL, P., 1997. *Mensura Forestal*. San Jose, Costa Rica: Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura. ISBN 9290393041.
- REYNEL, C., PENNINGTON, R.T., PENNINGTON, T.D., FLORES, C. y DAZA, A., 2003. *Arboles útiles de la Amazonía peruana: un manual con apuntes de identificación, ecología y propagación de las especies*. S.I.: Tarea Gráfica Educativa. ISBN 9789972973314.
- ROMAHN DE LA VEGA, C.F., MALDONADO, H.R. y GARCÍA, J.L.T., 1994. *Dendrometría*. S.I.: Universidad Autónoma Chapingo. ISBN 9789688842652.
- ROMERO, C.N., 2017. *Estimación del volumen de árboles en pie de Caoba (Swietenia macrophylla King) en el Departamento de Ucayali, Perú*. S.I.: Universidad Nacional Agraria la Molina.
- RONDEUX, Jacques. y DÍAZ DE BARRIONUEVO, A., 2010. *Medición de árboles y masas forestales*. S.I.: Mundi Prensa. ISBN 9788484763864.
- SÁNCHEZ, Y.A.S., 2012. *Elaboración de tablas de volúmenes y determinación del factores de forma de las especies forestales: Chuncho (Cedrelinga cateniformis), Laurel (Cordia Alliodora), Sangre de*

gallina (Otoba sp.) Ceibo (Ceiba samauma) y Canelo (Nectandra sp.), en la provinci. S.l.: Escuela Superior Politécnica de Chimborazo.

SERFOR, 2016a. Anuario Forestal 2015 «Perú Forestal en Números 2015». . Lima, Perú:

SERFOR, 2016b. *RESOLUCIÓN DE DIRECCIÓN EJECUTIVA N° 046-2016-SERFOR-DE*. 2016. Perú: Servicio Forestal y de Fauna Silvestre.

TONINI, H., ARCO-VERDE, M.F. y PEDREIRA PEREIRA DE SÁ, S., 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*,

TONOLLI, S., DALPONTE, M., VESCOVO, L., RODEGHIERO, M., BRUZZONE, L. y GIANELLE, D., 2011. Mapping and modeling forest tree volume using forest inventory and airborne laser scanning. *European Journal of Forest Research*, vol. 130, no. 4, pp. 569-577. ISSN 1612-4669. DOI 10.1007/s10342-010-0445-5.

VAN LAAR, Anthonie. y AKÇA, A., 2007. *Forest mensuration*. S.l.: Springer. ISBN 9781402059919.

VAN LAAR, Anthonie. y AKÇA, A., 2007. *Forest mensuration*. S.l.: Springer. ISBN 9781402059919.

WOOLDRIDGE, J.M., 2016. *Introductory Econometrics: A Modern Approach*. 6. Boston, MA: Cengage Learning. ISBN 9781305270107.

ZIANIS, D. y SEURA, S., 2005. *Biomass and stem volume equations for tree species in Europe*. S.l.: s.n. vol. 4. ISBN 9514019830.

ANEXOS

Anexo 1. *Formato de medición del fuste para cubicación por trozas sucesivas.*

[illegible]

Anexo 2. Matriz de consistencia.

Formulación del problema	Variables e indicadores	Objetivos	Hipótesis	Metodología
¿Qué factores de forma y ecuaciones de volumen permiten estimar con alto grado de precisión el volumen comercial de árboles de <i>M. balsamum</i> y <i>Dipteryx spp</i> ?	VARIABLES dependientes Coefficiente mórfico (F): Valor de 0 a 1. Volumen estimado del fuste (V): Coeficiente de determinación ajustado (R2adj) los modelos a probar. Criterio de información de Akaike (AIC) de los modelos a probar. Raíz del cuadrado medio del error (RMSE).	Objetivo General Determinar el factor de forma y desarrollar ecuaciones de volumen del fuste de árboles de <i>M. balsamum</i> y <i>Dipteryx spp</i> , en los bosques de Madre de Dios. Objetivos específicos Determinar el coeficiente mórfico de árboles de <i>M. balsamum</i> en los bosques de Madre de Dios. Determinar el coeficiente mórfico de árboles de <i>Dipteryx spp</i> en los bosques de Madre de Dios. Desarrollar ecuaciones de volumen y construir tablas de volumen, a partir del DAP y H, de árboles de <i>M. balsamum</i> en los bosques de Madre de Dios. Desarrollar ecuaciones de volumen y construir tablas de volumen, a partir del DAP y H, de árboles de <i>Dipteryx spp</i> en los bosques de Madre de Dios.	H₀-1: El coeficiente mórfico de <i>M. balsamum</i> y <i>Dipteryx spp.</i> , en los bosques de Madre de Dios, no es superior a 0,65. H₁-1: El coeficiente mórfico de <i>M. balsamum</i> y <i>Dipteryx spp.</i> , en los bosques de Madre de Dios, es superior a 0,65. H₀-2: Las funciones de volumen no permiten estimar con alta precisión el volumen comercial del fuste de <i>M. balsamum</i> y <i>Dipteryx spp.</i> , en los bosques de Madre de Dios. H₁-2: Las funciones de volumen permiten estimar con alta precisión el volumen comercial del fuste de <i>M. balsamum</i> y <i>Dipteryx spp.</i> , en los bosques de Madre de Dios.	Tipo de estudio Es de tipo correlacional, porque tiene el propósito de explicar un fenómeno a partir de mediciones precisas de variables o eventos. Según su finalidad la investigación es aplicada porque busca resolver problemas prácticos. Según la profundidad es explicativa, porque además de describir el fenómeno de estudio busca la explicación del comportamiento de las variables. Diseño del estudio Es transversal explicativo, conocido también como analítico, no experimental, porque se basa en la observación o medición simple de las variables, eventos o fenómenos para inferir en el comportamiento o características de ellas.
	VARIABLES independientes Volumen real del fuste (Vf): Volumen de las secciones sucesivas (m3). Diámetro a la altura del pecho (DAP): Circunferencia del fuste a 1.3 m de altura Altura comercial (H): Longitud del fuste desde la base hasta las ramificaciones principales, medido en metros (m)			

Anexo 3. Compilación de script de R y resultados de construcción de ecuaciones de volumen de *M. balsamun*

```
library(readxl)
estor<-read_excel("G:/Mi unidad/UNAMAD 2023 en adelante/Asesoramiento de tesis/Lindsay y Yeni/datos_esto2.xlsx", sheet = "estoraqueok")
attach(estor)

### CONSTRUCCIÓN DE ECUACIONES DE VOLUMEN ###

# Variable combinada de primer grado
var.comb.primer <- lm(v ~ dap2h, data=estor)
summary(var.comb.primer)

##
## Call:
## lm(formula = v ~ dap2h, data = estor)
##
## Residuals:
##      Min       1Q   Median       3Q      Max
## -1.59881 -0.44548 -0.05769  0.42379  2.51209
##
## Coefficients:
##              Estimate Std. Error t value Pr(>|t|)
## (Intercept)  9.510e-01  1.772e-01   5.367 4.05e-07 ***
## dap2h        4.177e-05  2.369e-06  17.632 < 2e-16 ***
## ---
## Signif. codes:  0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1
##
## Residual standard error: 0.6671 on 118 degrees of freedom
## Multiple R-squared:  0.7249, Adjusted R-squared:  0.7225
## F-statistic: 310.9 on 1 and 118 DF,  p-value: < 2.2e-16

AIC(var.comb.primer)

## [1] 247.3573

residuos <- residuals(var.comb.primer)
# Crear y guardar gráficos de normalidad
png("G:/Mi unidad/UNAMAD 2023 en adelante/Asesoramiento de tesis/Lindsay y Yeni/graficos de normalidad/var.comb.primer.png", width = 1000, height = 1000, res = 200)
# QQ-plot
qqnorm(residuos,
        main = "QQ-Plot de residuos\nVariable combinada de primer grado",
        xlab = "Cuantiles teóricos",
        ylab = "Cuantiles de la muestra",
        pch = 19, col = "blue", cex = 0.8)
qqline(residuos, col = "red", lwd = 2)
dev.off()
```

```
## png
## 2

# Variable combinada generalizada
var.com.gen.aust <- lm(v ~ dap2 + h + dap2h, data=estor)
summary(var.com.gen.aust)

##
## Call:
## lm(formula = v ~ dap2 + h + dap2h, data = estor)
##
## Residuals:
##      Min       1Q   Median       3Q      Max
## -1.3068 -0.4511 -0.1210  0.4032  2.6513
##
## Coefficients:
##              Estimate Std. Error t value Pr(>|t|)
## (Intercept) -4.516e-01  1.058e+00  -0.427   0.670
## dap2        4.058e-04  2.509e-04   1.618   0.108
## h           7.705e-02  6.088e-02   1.266   0.208
## dap2h       1.923e-05  1.477e-05   1.301   0.196
##
## Residual standard error: 0.6631 on 116 degrees of freedom
## Multiple R-squared:  0.7327, Adjusted R-squared:  0.7258
## F-statistic: 106 on 3 and 116 DF,  p-value: < 2.2e-16

AIC(var.com.gen.aust)

## [1] 247.8777

residuos <- residuals(var.com.gen.aust)
# Crear y guardar gráficos de normalidad
png("G:/Mi unidad/UNAMAD 2023 en adelante/Asesoramiento de tesis/Lindsay y
Yeni/graficos de normalidad/var.com.gen.aust.png", width = 1000, height = 1
000, res = 200)
# QQ-plot
qqnorm(residuos,
      main = "QQ-Plot de residuos\nVariable combinada generalizada",
      xlab = "Cuantiles teóricos",
      ylab = "Cuantiles de la muestra",
      pch = 19, col = "blue", cex = 0.8)
qqline(residuos, col = "red", lwd = 2)
dev.off()

## png
## 2

# Meyer modificada
meyer.mod <- lm(v ~ dap + dap2 + daph + dap2h, data=estor)
summary(meyer.mod)

##
## Call:
```

```

## lm(formula = v ~ dap + dap2 + daph + dap2h, data = estor)
##
## Residuals:
##      Min       1Q   Median       3Q      Max
## -1.2788 -0.4421 -0.0878  0.4383  2.6328
##
## Coefficients:
##              Estimate Std. Error t value Pr(>|t|)
## (Intercept) -1.216e-02  1.727e+00  -0.007   0.994
## dap         -1.605e-02  5.490e-02  -0.292   0.771
## dap2         5.540e-04  5.445e-04   1.017   0.311
## daph         2.518e-03  1.892e-03   1.330   0.186
## dap2h        -1.244e-06  2.906e-05  -0.043   0.966
##
## Residual standard error: 0.6653 on 115 degrees of freedom
## Multiple R-squared:  0.7333, Adjusted R-squared:  0.724
## F-statistic: 79.03 on 4 and 115 DF,  p-value: < 2.2e-16

AIC(meyer.mod)

## [1] 249.6425

residuos <- residuals(meyer.mod)
# Crear y guardar gráficos de normalidad
png("G:/Mi unidad/UNAMAD 2023 en adelante/Asesoramiento de tesis/Lindsay y
Yeni/graficos de normalidad/meyer.png", width = 1000, height = 1000, res =
200)
# QQ-plot
qqnorm(residuos,
      main = "QQ-Plot de residuos\nMeyer modificada",
      xlab = "Cuantiles teóricos",
      ylab = "Cuantiles de la muestra",
      pch = 19, col = "blue", cex = 0.8)
qqline(residuos, col = "red", lwd = 2)
dev.off()

## png
## 2

# Comprensiva
compre <- lm(v ~ dap + dap2 + daph + dap2h + h, data = estor)
summary(compre)

##
## Call:
## lm(formula = v ~ dap + dap2 + daph + dap2h + h, data = estor)
##
## Residuals:
##      Min       1Q   Median       3Q      Max
## -1.28536 -0.44477 -0.08744  0.43517  2.64177
##
## Coefficients:
##              Estimate Std. Error t value Pr(>|t|)

```

```
## (Intercept) -2.164e+00 1.026e+01 -0.211 0.833
## dap 4.817e-02 3.066e-01 0.157 0.875
## dap2 8.581e-05 2.266e-03 0.038 0.970
## daph -1.243e-03 1.777e-02 -0.070 0.944
## dap2h 2.635e-05 1.329e-04 0.198 0.843
## h 1.254e-01 5.889e-01 0.213 0.832
##
## Residual standard error: 0.6681 on 114 degrees of freedom
## Multiple R-squared: 0.7334, Adjusted R-squared: 0.7217
## F-statistic: 62.71 on 5 and 114 DF, p-value: < 2.2e-16

AIC(compren)

## [1] 251.5947

residuos <- residuals(compren)
# Crear y guardar gráficos de normalidad
png("G:/Mi unidad/UNAMAD 2023 en adelante/Asesoramiento de tesis/Lindsay y
Yeni/graficos de normalidad/comprendensiva.png", width = 1000, height = 1000,
res = 200)
# QQ-plot
qqnorm(residuos,
main = "QQ-Plot de residuos\nComprendensiva",
xlab = "Cuantiles teóricos",
ylab = "Cuantiles de la muestra",
pch = 19, col = "blue", cex = 0.8)
qqline(residuos, col = "red", lwd = 2)
dev.off()

## png
## 2

# NasLund
naslund <- lm(v ~ dap2 + dap2h + h2 + daph2, data = estor)
summary(naslund)

##
## Call:
## lm(formula = v ~ dap2 + dap2h + h2 + daph2, data = estor)
##
## Residuals:
## Min 1Q Median 3Q Max
## -1.3495 -0.4490 -0.1224 0.3785 2.6478
##
## Coefficients:
## Estimate Std. Error t value Pr(>|t|)
## (Intercept) 3.447e-01 5.180e-01 0.665 0.507
## dap2 2.778e-04 2.750e-04 1.010 0.314
## dap2h 3.056e-05 2.602e-05 1.175 0.242
## h2 2.672e-03 4.091e-03 0.653 0.515
## daph2 -2.906e-05 9.925e-05 -0.293 0.770
##
## Residual standard error: 0.6672 on 115 degrees of freedom
```

```
## Multiple R-squared:  0.7318, Adjusted R-squared:  0.7225
## F-statistic: 78.44 on 4 and 115 DF,  p-value: < 2.2e-16

AIC(naslund)

## [1] 250.3008

residuos <- residuals(naslund)
# Crear y guardar gráficos de normalidad
png("G:/Mi unidad/UNAMAD 2023 en adelante/Asesoramiento de tesis/Lindsay y
Yeni/graficos de normalidad/naslund.png", width = 1000, height = 1000, res
= 200)
# QQ-plot
qqnorm(residuos,
      main = "QQ-Plot de residuos\nNaslund",
      xlab = "Cuantiles teóricos",
      ylab = "Cuantiles de la muestra",
      pch = 19, col = "blue", cex = 0.8)
qqline(residuos, col = "red", lwd = 2)
dev.off()

## png
## 2

shapiro.test(residuos)

##
## Shapiro-Wilk normality test
##
## data:  residuos
## W = 0.95937, p-value = 0.001126

# Australiana de Stoat
austral.stoat <- lm(v ~ dap2 + dap3 + h + I(1/h), data = estor)
summary(austral.stoat)

##
## Call:
## lm(formula = v ~ dap2 + dap3 + h + I(1/h), data = estor)
##
## Residuals:
##      Min       1Q   Median       3Q      Max
## -1.21770 -0.44162 -0.08645  0.41068  2.71696
##
## Coefficients:
##              Estimate Std. Error t value Pr(>|t|)
## (Intercept) -6.895e-01  2.332e+00  -0.296  0.76803
## dap2        1.059e-03  3.814e-04   2.778  0.00639 **
## dap3       -3.161e-06  3.616e-06  -0.874  0.38383
## h           1.088e-01  6.795e-02   1.601  0.11209
## I(1/h)      -1.282e+01  1.958e+01  -0.655  0.51405
## ---
## Signif. codes:  0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1
```

```
##
## Residual standard error: 0.6677 on 115 degrees of freedom
## Multiple R-squared:  0.7313, Adjusted R-squared:  0.722
## F-statistic: 78.26 on 4 and 115 DF,  p-value: < 2.2e-16

AIC(austral.stoat)

## [1] 250.5089

residuos <- residuals(austral.stoat)
# Crear y guardar gráficos de normalidad
png("G:/Mi unidad/UNAMAD 2023 en adelante/Asesoramiento de tesis/Lindsay y
Yeni/graficos de normalidad/austral.stoat.png", width = 1000, height = 1000
, res = 200)
# QQ-plot
qqnorm(residuos,
      main = "QQ-Plot de residuos\nAustraliana de Stoat",
      xlab = "Cuantiles teóricos",
      ylab = "Cuantiles de la muestra",
      pch = 19, col = "blue", cex = 0.8)
qqline(residuos, col = "red", lwd = 2)
dev.off()

## png
## 2

shapiro.test(residuos)

##
## Shapiro-Wilk normality test
##
## data:  residuos
## W = 0.95909, p-value = 0.001071

# Variable combinada de segundo grado
var.comb.segun <- lm(v ~ dap2h + I((dap2h)^2), data = estor)
summary(var.comb.segun)

##
## Call:
## lm(formula = v ~ dap2h + I((dap2h)^2), data = estor)
##
## Residuals:
##      Min       1Q   Median       3Q      Max
## -1.49671 -0.44431 -0.05446  0.42024  2.49867
##
## Coefficients:
##              Estimate Std. Error t value Pr(>|t|)
## (Intercept)   6.617e-01  4.114e-01   1.608   0.110
## dap2h         4.968e-05  1.043e-05   4.764 5.5e-06 ***
## I((dap2h)^2) -4.766e-11  6.116e-11  -0.779   0.437
## ---
## Signif. codes:  0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1
```

```
##
## Residual standard error: 0.6682 on 117 degrees of freedom
## Multiple R-squared:  0.7263, Adjusted R-squared:  0.7216
## F-statistic: 155.2 on 2 and 117 DF,  p-value: < 2.2e-16

AIC(var.comb.segun)

## [1] 248.7359

residuos <- residuals(var.comb.segun)
# Crear y guardar gráficos de normalidad
png("G:/Mi unidad/UNAMAD 2023 en adelante/Asesoramiento de tesis/Lindsay y
Yeni/graficos de normalidad/var.comb.segun.png", width = 1000, height = 100
0, res = 200)
# QQ-plot
qqnorm(residuos,
        main = "QQ-Plot de residuos\nVariable combinada de segundo grado",
        xlab = "Cuantiles teóricos",
        ylab = "Cuantiles de la muestra",
        pch = 19, col = "blue", cex = 0.8)
qqline(residuos, col = "red", lwd = 2)
dev.off()

## png
## 2

shapiro.test(residuos)

##
## Shapiro-Wilk normality test
##
## data:  residuos
## W = 0.97718, p-value = 0.039

# Logarítmica de Schumacher (con modelo no lineal)
log.schum = nls(v ~ a * dap^b * h^c, data = estor, start = c(a = 0.0015,
                    b = 1.4, c = 0.65), trace = FALSE, nls.control(maxiter = 10
000))
summary(log.schum)

##
## Formula: v ~ a * dap^b * h^c
##
## Parameters:
##      Estimate Std. Error t value Pr(>|t|)
## a 0.0008417  0.0004054   2.076  0.0401 *
## b 1.5741325  0.0898634  17.517 < 2e-16 ***
## c 0.6711147  0.0773165   8.680 2.72e-14 ***
## ---
## Signif. codes:  0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1
##
## Residual standard error: 0.6618 on 117 degrees of freedom
##
```

```

## Number of iterations to convergence: 4
## Achieved convergence tolerance: 3.615e-06

AIC(log.schum)

## [1] 246.4304

residuos <- residuals(log.schum)
# Crear y guardar gráficos de normalidad
png("G:/Mi unidad/UNAMAD 2023 en adelante/Asesoramiento de tesis/Lindsay y
Yeni/graficos de normalidad/log.schum.png", width = 1000, height = 1000, re
s = 200)
# QQ-plot
qqnorm(residuos,
        main = "QQ-Plot de residuos\nLogarítmica de Schumacher",
        xlab = "Cuantiles teóricos",
        ylab = "Cuantiles de la muestra",
        pch = 19, col = "blue", cex = 0.8)
qqline(residuos, col = "red", lwd = 2)
dev.off()

## png
## 2

shapiro.test(residuos)

##
## Shapiro-Wilk normality test
##
## data:  residuos
## W = 0.97206, p-value = 0.01334

# Logarítmica de Schumacher (linealizado)
log.schum2 <- lm(logv ~ logdap + logh, data = estor)
summary(log.schum2)

##
## Call:
## lm(formula = logv ~ logdap + logh, data = estor)
##
## Residuals:
##      Min       1Q   Median       3Q      Max
## -0.132595 -0.057441  0.003695  0.045792  0.174563
##
## Coefficients:
##              Estimate Std. Error t value Pr(>|t|)
## (Intercept) -3.10680    0.19336  -16.07  <2e-16 ***
## logdap       1.56751    0.09071   17.28  <2e-16 ***
## logh         0.70177    0.07014   10.01  <2e-16 ***
## ---
## Signif. codes:  0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1
##
## Residual standard error: 0.06787 on 117 degrees of freedom

```

```

## Multiple R-squared:  0.7557, Adjusted R-squared:  0.7515
## F-statistic:   181 on 2 and 117 DF,  p-value: < 2.2e-16

AIC(log.schum2)

## [1] -300.1205

# Variable combinada Logarítmica (modelo no lineal)
var.comb.log = nls(v ~ a * dap2h^b, data = estor, start = c(a=0.0016, b=0.
6),
                    trace = FALSE, nls.control(maxiter = 10000))
summary(var.comb.log)

##
## Formula: v ~ a * dap2h^b
##
## Parameters:
##      Estimate Std. Error t value Pr(>|t|)
## a 0.0007767   0.0003754   2.069   0.0407 *
## b 0.7642661   0.0427892  17.861   <2e-16 ***
## ---
## Signif. codes:  0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1
##
## Residual standard error: 0.6648 on 118 degrees of freedom
##
## Number of iterations to convergence: 6
## Achieved convergence tolerance: 1.545e-08

AIC(var.comb.log)

## [1] 246.533

residuos <- residuals(var.comb.log)
# Crear y guardar gráficos de normalidad
png("G:/Mi unidad/UNAMAD 2023 en adelante/Asesoramiento de tesis/Lindsay y
Yeni/graficos de normalidad/var.comb.log.png", width = 1000, height = 1000,
res = 200)
# QQ-plot
qqnorm(residuos,
        main = "QQ-Plot de residuos\nVariable combinada logarítmica",
        xlab = "Cuantiles teóricos",
        ylab = "Cuantiles de la muestra",
        pch = 19, col = "blue", cex = 0.8)
qqline(residuos, col = "red", lwd = 2)
dev.off()

## png
## 2

shapiro.test(residuos)

##
## Shapiro-Wilk normality test
##

```

```
## data:  residuos
## W = 0.97675, p-value = 0.03562

# Variable combinada Logarítmica (linealizado)
var.com.log2 <- lm(logv ~ logdap2h, data = estor)
summary(var.com.log2)

##
## Call:
## lm(formula = logv ~ logdap2h, data = estor)
##
## Residuals:
##      Min       1Q   Median       3Q      Max
## -0.128006 -0.055513 -0.002166  0.046958  0.171779
##
## Coefficients:
##              Estimate Std. Error t value Pr(>|t|)
## (Intercept) -3.10263     0.19339  -16.04  <2e-16 ***
## logdap2h      0.76168     0.04011   18.99  <2e-16 ***
## ---
## Signif. codes:  0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1
##
## Residual standard error: 0.0679 on 118 degrees of freedom
## Multiple R-squared:  0.7535, Adjusted R-squared:  0.7514
## F-statistic: 360.6 on 1 and 118 DF,  p-value: < 2.2e-16

AIC(var.com.log2)

## [1] -301.0142

# Figuras de Validación de modelos: Valores estimados vs. Valores observado
# s o medidos.
tiff(filename = "G:/Mi unidad/UNAMAD 2023 en adelante/Asesoramiento de tesi
s/Lindsay y Yeni/var.comb.primer.tiff",
      width=7.5, height=7.5, unit="in", res=300, compression = 'lzw')
par(mar = c(5.1, 4.5, 4.1, 2.1))
plot(var.comb.primer$fitted.values ~ var.comb.primer$model$v, xlab=expressi
on("Volumen observado (m^3*)"),
      ylab=expression("Volumen estimado (m^3*)"), asp=1, las=1, main="Vari
able combinada de primer grado")
lm <- lm(var.comb.primer$fitted.values ~ var.comb.primer$model$v)
abline(lm, lw=2, col="blue")
abline(0,1)
dev.off()

## png
## 2

tiff(filename = "G:/Mi unidad/UNAMAD 2023 en adelante/Asesoramiento de tesi
s/Lindsay y Yeni/var.com.gen.aust.tiff",
      width=7.5, height=7.5, unit="in", res=300, compression = 'lzw')
par(mar = c(5.1, 4.5, 4.1, 2.1))
plot(var.com.gen.aust$fitted.values ~ var.com.gen.aust$model$v, xlab=expres
```

```

sion("Volumen observado (m^3*)"),
  ylab=expression("Volumen estimado (m^3*)"), asp=1, las=1, main="Variable combinada generalizada")
lm <- lm(var.com.gen.aust$fitted.values ~ var.com.gen.aust$model$v)
abline(lm, lw=2, col="blue")
abline(0,1)
dev.off()

## png
## 2

tiff(filename = "G:/Mi unidad/UNAMAD 2023 en adelante/Asesoramiento de tesis/Lindsay y Yeni/meyer.mod.tiff",
  width=7.5, height=7.5, unit="in", res=300, compression = 'lzw')
par(mar = c(5.1, 4.5, 4.1, 2.1))
plot(meyer.mod$fitted.values ~ meyer.mod$model$v, xlab=expression("Volumen observado (m^3*)"),
  ylab=expression("Volumen estimado (m^3*)"), asp=1, las=1, main="Meyer modificada")
lm <- lm(meyer.mod$fitted.values ~ meyer.mod$model$v)
abline(lm, lw=2, col="blue")
abline(0,1)
dev.off()

## png
## 2

tiff(filename = "G:/Mi unidad/UNAMAD 2023 en adelante/Asesoramiento de tesis/Lindsay y Yeni/compren.tiff",
  width=7.5, height=7.5, unit="in", res=300, compression = 'lzw')
par(mar = c(5.1, 4.5, 4.1, 2.1))
plot(compren$fitted.values ~ compren$model$v, xlab=expression("Volumen observado (m^3*)"),
  ylab=expression("Volumen estimado (m^3*)"), asp=1, las=1, main="Comprensiva")
lm <- lm(compren$fitted.values ~ compren$model$v)
abline(lm, lw=2, col="blue")
abline(0,1)
dev.off()

## png
## 2

tiff(filename = "G:/Mi unidad/UNAMAD 2023 en adelante/Asesoramiento de tesis/Lindsay y Yeni/naslund.tiff",
  width=7.5, height=7.5, unit="in", res=300, compression = 'lzw')
par(mar = c(5.1, 4.5, 4.1, 2.1))
plot(naslund$fitted.values ~ naslund$model$v, xlab=expression("Volumen observado (m^3*)"),
  ylab=expression("Volumen estimado (m^3*)"), asp=1, las=1, main="Naslund")
lm <- lm(naslund$fitted.values ~ naslund$model$v)
abline(lm, lw=2, col="blue")

```

```

abline(0,1)
dev.off()

## png
## 2

tiff(filename = "G:/Mi unidad/UNAMAD 2023 en adelante/Asesoramiento de tesis/Lindsay y Yeni/austral.stoat.tiff",
      width=7.5, height=7.5, unit="in", res=300, compression = 'lzw')
par(mar = c(5.1, 4.5, 4.1, 2.1))
plot(austral.stoat$fitted.values ~ austral.stoat$model$v, xlab=expression("Volumen observado (m^3)"),
      ylab=expression("Volumen estimado (m^3)"), asp=1, las=1, main="Australiana de Stoat")
lm <- lm(austral.stoat$fitted.values ~ austral.stoat$model$v)
abline(lm, lw=2, col="blue")
abline(0,1)
dev.off()

## png
## 2

tiff(filename = "G:/Mi unidad/UNAMAD 2023 en adelante/Asesoramiento de tesis/Lindsay y Yeni/var.comb.segun.tiff",
      width=7.5, height=7.5, unit="in", res=300, compression = 'lzw')
par(mar = c(5.1, 4.5, 4.1, 2.1))
plot(var.comb.segun$fitted.values ~ var.comb.segun$model$v, xlab=expression("Volumen observado (m^3)"),
      ylab=expression("Volumen estimado (m^3)"), asp=1, las=1, main="Variable combinada de segundo grado")
lm <- lm(var.comb.segun$fitted.values ~ var.comb.segun$model$v)
abline(lm, lw=2, col="blue")
abline(0,1)
dev.off()

## png
## 2

fit.schum <- predict(log.schum, estor[,2:3])
vol.observado <- estor$v
tiff(filename = "G:/Mi unidad/UNAMAD 2023 en adelante/Asesoramiento de tesis/Lindsay y Yeni/log.schum.tiff",
      width=7.5, height=7.5, unit="in", res=300, compression = 'lzw')
par(mar = c(5.1, 4.5, 4.1, 2.1))
plot(fit.schum ~ vol.observado, xlab=expression("Volumen observado (m^3)"),
      ylab=expression("Volumen estimado (m^3)"), asp=1, las=1, main="Logarítmica de Schumacher")
lm <- lm(fit.schum ~ vol.observado)
abline(lm, lw=2, col="blue")
abline(0,1)
dev.off()

```

```

## png
## 2

fit.com.log <- predict(var.comb.log, estor[,8])
tiff(filename = "G:/Mi unidad/UNAMAD 2023 en adelante/Asesoramiento de tesis/Lindsay y Yeni/var.comb.log.tiff",
      width=7.5, height=7.5, unit="in", res=300, compression = 'lzw')
par(mar = c(5.1, 4.5, 4.1, 2.1))
plot(fit.com.log ~ vol.observado, xlab=expression("Volumen observado (m^3*")"),
      ylab=expression("Volumen estimado (m^3*")"), asp=1, las=1, main="Variable combinada logarítmica")
lm <- lm(fit.com.log ~ vol.observado)
abline(lm, lw=2, col="blue")
abline(0,1)
dev.off()

## png
## 2

# Gráficos de residuos
tiff(filename = "G:/Mi unidad/UNAMAD 2023 en adelante/Asesoramiento de tesis/Lindsay y Yeni/res_var.comb.primer.tiff",
      width=7.5, height=7.5, unit="in", res=300, compression = 'lzw')
par(mar = c(5.1, 4.5, 4.1, 2.1))
plot(var.comb.primer$residuals ~ var.comb.primer$fitted.values, xlab=expression("Volumen estimado (m^3*")"),
      ylab=expression("Residuos (m^3*")"), asp=1, las=1, main="Variable combinada de primer grado")
dev.off()

## png
## 2

tiff(filename = "G:/Mi unidad/UNAMAD 2023 en adelante/Asesoramiento de tesis/Lindsay y Yeni/res_var.com.gen.aust.tiff",
      width=7.5, height=7.5, unit="in", res=300, compression = 'lzw')
par(mar = c(5.1, 4.5, 4.1, 2.1))
plot(var.com.gen.aust$residuals ~ var.com.gen.aust$fitted.values, xlab=expression("Volumen estimado (m^3*")"),
      ylab=expression("Residuos (m^3*")"), asp=1, las=1, main="Variable combinada generalizada")
dev.off()

## png
## 2

tiff(filename = "G:/Mi unidad/UNAMAD 2023 en adelante/Asesoramiento de tesis/Lindsay y Yeni/res_meyer.mod.tiff",
      width=7.5, height=7.5, unit="in", res=300, compression = 'lzw')
par(mar = c(5.1, 4.5, 4.1, 2.1))
plot(meyer.mod$residuals ~ meyer.mod$fitted.values, xlab=expression("Volumen estimado (m^3*")"),

```

```

        ylab=expression("Residuos (m3*)"), asp=1, las=1, main="Meyer modifi
cada")
dev.off()

## png
## 2

tiff(filename = "G:/Mi unidad/UNAMAD 2023 en adelante/Asesoramiento de tesi
s/Lindsay y Yeni/res_compren.tiff",
      width=7.5, height=7.5, unit="in", res=300, compression = 'lzw')
par(mar = c(5.1, 4.5, 4.1, 2.1))
plot(compren$residuals ~ compren$fitted.values, xlab=expression("Volumen es
timado (m3*)"),
      ylab=expression("Residuos (m3*)"), asp=1, las=1, main="Comprensiva"
)
dev.off()

## png
## 2

tiff(filename = "G:/Mi unidad/UNAMAD 2023 en adelante/Asesoramiento de tesi
s/Lindsay y Yeni/res_naslund.tiff",
      width=7.5, height=7.5, unit="in", res=300, compression = 'lzw')
par(mar = c(5.1, 4.5, 4.1, 2.1))
plot(naslund$residuals ~ naslund$fitted.values, xlab=expression("Volumen es
timado (m3*)"),
      ylab=expression("Residuos (m3*)"), asp=1, las=1, main="Naslund")
dev.off()

## png
## 2

tiff(filename = "G:/Mi unidad/UNAMAD 2023 en adelante/Asesoramiento de tesi
s/Lindsay y Yeni/res_austral.stoat.tiff",
      width=7.5, height=7.5, unit="in", res=300, compression = 'lzw')
par(mar = c(5.1, 4.5, 4.1, 2.1))
plot(austral.stoat$residuals ~ austral.stoat$fitted.values, xlab=expression
("Volumen estimado (m3*)"),
      ylab=expression("Residuos (m3*)"), asp=1, las=1, main="australiana
de Stoat")
dev.off()

## png
## 2

tiff(filename = "G:/Mi unidad/UNAMAD 2023 en adelante/Asesoramiento de tesi
s/Lindsay y Yeni/res_var.comb.segun.tiff",
      width=7.5, height=7.5, unit="in", res=300, compression = 'lzw')
par(mar = c(5.1, 4.5, 4.1, 2.1))
plot(var.comb.segun$residuals ~ var.comb.segun$fitted.values, xlab=expressi
on("Volumen estimado (m3*)"),
      ylab=expression("Residuos (m3*)"), asp=1, las=1, main="Variable com

```

```

binada de segundo grado")
dev.off()

## png
## 2

res_schu <- estor$v- fit.schum
tiff(filename = "G:/Mi unidad/UNAMAD 2023 en adelante/Asesoramiento de tesis/Lindsay y Yeni/res_log.schum.segun.tiff",
      width=7.5, height=7.5, unit="in", res=300, compression = 'lzw')
par(mar = c(5.1, 4.5, 4.1, 2.1))
plot(res_schu ~ fit.schum, xlab=expression("Volumen estimado (m3*)"),
      ylab=expression("Residuos (m3*)"), asp=1, las=1, main="Logarítmica de Schumacher")
dev.off()

## png
## 2

res_var.comb.log <- estor$v- fit.com.log
tiff(filename = "G:/Mi unidad/UNAMAD 2023 en adelante/Asesoramiento de tesis/Lindsay y Yeni/res_var.comb.log.segun.tiff",
      width=7.5, height=7.5, unit="in", res=300, compression = 'lzw')
par(mar = c(5.1, 4.5, 4.1, 2.1))
plot(res_var.comb.log ~ fit.com.log, xlab=expression("Volumen estimado (m3*)"),
      ylab=expression("Residuos (m3*)"), asp=1, las=1, main="Variable com binada logarítmica")
dev.off()

## png
## 2

```

Anexo 4. Compilación de *script de R* y resultados de construcción de ecuaciones de volumen de *Dipteryx spp.*

```
library(readxl)
shihua<-read_excel("G:/Mi unidad/UNAMAD 2023 en adelante/Asesoramiento de t
esis/Lindsay y Yeni/datos.xlsx", sheet = "shihuahuacook")

## CONSTRUCCIÓN DE ECUACIONES DE VOLUMEN ##

# Variable combinada de primer grado
var.comb.primer <- lm(v ~ dap2h, data=shihua)
summary(var.comb.primer)

##
## Call:
## lm(formula = v ~ dap2h, data = shihua)
##
## Residuals:
##      Min       1Q   Median       3Q      Max
## -6.3232 -0.8232 -0.0712  0.8036  3.4445
##
## Coefficients:
##              Estimate Std. Error t value Pr(>|t|)
## (Intercept)  6.054e-01  3.516e-01   1.722  0.0877 .
## dap2h        6.008e-05  1.824e-06  32.942 <2e-16 ***
## ---
## Signif. codes:  0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1
##
## Residual standard error: 1.427 on 118 degrees of freedom
## Multiple R-squared:  0.9019, Adjusted R-squared:  0.9011
## F-statistic: 1085 on 1 and 118 DF,  p-value: < 2.2e-16

AIC(var.comb.primer)

## [1] 429.8285

residuos <- residuals(var.comb.primer)
# Crear y guardar Los gráficos
png("G:/Mi unidad/UNAMAD 2023 en adelante/Asesoramiento de tesis/Lindsay y
Yeni/graficos de normalidad/var.comb.primer.shihua.png", width = 1000, heig
ht = 1000, res = 200)
# QQ-plot
qqnorm(residuos,
        main = "QQ-Plot de residuos\nVariable combinada de primer grado",
        xlab = "Cuantiles teóricos",
        ylab = "Cuantiles de la muestra",
        pch = 19, col = "blue", cex = 0.8)
qqline(residuos, col = "red", lwd = 2)
dev.off()

## png
## 2
```

```
# Variable combinada generalizada
```

```
var.com.gen.aust <- lm(v ~ dap2 + h + dap2h, data=shihua)  
summary(var.com.gen.aust)
```

```
##
```

```
## Call:
```

```
## lm(formula = v ~ dap2 + h + dap2h, data = shihua)
```

```
##
```

```
## Residuals:
```

```
##      Min       1Q   Median       3Q      Max  
## -4.5602 -0.8361 -0.0686  0.7306  3.3517
```

```
##
```

```
## Coefficients:
```

```
##              Estimate Std. Error t value Pr(>|t|)  
## (Intercept)  2.356e+00  1.977e+00   1.191   0.236  
## dap2         3.786e-05  1.735e-04   0.218   0.828  
## h           -1.513e-01  1.213e-01  -1.247   0.215  
## dap2h        6.200e-05  1.062e-05   5.840 4.86e-08 ***
```

```
## ---
```

```
## Signif. codes:  0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1
```

```
##
```

```
## Residual standard error: 1.354 on 116 degrees of freedom
```

```
## Multiple R-squared:  0.9132, Adjusted R-squared:  0.9109
```

```
## F-statistic: 406.7 on 3 and 116 DF,  p-value: < 2.2e-16
```

```
AIC(var.com.gen.aust)
```

```
## [1] 419.2142
```

```
residuos <- residuals(var.com.gen.aust)
```

```
# Crear y guardar Los gráficos
```

```
png("G:/Mi unidad/UNAMAD 2023 en adelante/Asesoramiento de tesis/Lindsay y  
Yeni/graficos de normalidad/var.com.gen.aust.shihua.png", width = 1000, hei  
ght = 1000, res = 200)
```

```
# QQ-plot
```

```
qqnorm(residuos,  
        main = "QQ-Plot de residuos\nVariable combinada generalizada",  
        xlab = "Cuantiles teóricos",  
        ylab = "Cuantiles de la muestra",  
        pch = 19, col = "blue", cex = 0.8)
```

```
qqline(residuos, col = "red", lwd = 2)
```

```
dev.off()
```

```
## png
```

```
## 2
```

```
# Meyer modificada
```

```
meyer.mod <- lm(v ~ dap + dap2 + daph + dap2h, data=shihua)
```

```
summary(meyer.mod)
```

```
##
```

```
## Call:
```

```
## lm(formula = v ~ dap + dap2 + daph + dap2h, data = shihua)
```

```
##
## Residuals:
##      Min       1Q   Median       3Q      Max
## -4.5356 -0.7600 -0.0858  0.7747  3.4835
##
## Coefficients:
##              Estimate Std. Error t value Pr(>|t|)
## (Intercept) -5.116e+00  3.511e+00  -1.457 0.147792
## dap         1.448e-01  7.391e-02   1.959 0.052561 .
## dap2        -6.303e-04  4.343e-04  -1.451 0.149474
## daph        -2.951e-03  2.275e-03  -1.297 0.197121
## dap2h        7.520e-05  2.077e-05   3.621 0.000438 ***
## ---
## Signif. codes:  0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1
##
## Residual standard error: 1.345 on 115 degrees of freedom
## Multiple R-squared:  0.915, Adjusted R-squared:  0.9121
## F-statistic: 309.7 on 4 and 115 DF,  p-value: < 2.2e-16

AIC(meyer.mod)

## [1] 418.5895

residuos <- residuals(meyer.mod)
# Crear y guardar Los gráficos
png("G:/Mi unidad/UNAMAD 2023 en adelante/Asesoramiento de tesis/Lindsay y
Yeni/graficos de normalidad/meyer.shihua.png", width = 1000, height = 1000,
res = 200)
# QQ-plot
qqnorm(residuos,
      main = "QQ-Plot de residuos\nMeyer modificada",
      xlab = "Cuantiles teóricos",
      ylab = "Cuantiles de la muestra",
      pch = 19, col = "blue", cex = 0.8)
qqline(residuos, col = "red", lwd = 2)
dev.off()

## png
## 2

# Comprensiva
compren <- lm(v ~ dap + dap2 + daph + dap2h + h, data = shihua)
summary(compren)

##
## Call:
## lm(formula = v ~ dap + dap2 + daph + dap2h + h, data = shihua)
##
## Residuals:
##      Min       1Q   Median       3Q      Max
## -4.1693 -0.7147 -0.0292  0.8189  3.3147
##
## Coefficients:
```

```
##               Estimate Std. Error t value Pr(>|t|)
## (Intercept) -2.355e+01 1.694e+01 -1.390 0.1672
## dap         4.889e-01 3.181e-01 1.537 0.1270
## dap2        -2.194e-03 1.471e-03 -1.491 0.1387
## daph        -2.551e-02 2.041e-02 -1.250 0.2139
## dap2h        1.781e-04 9.480e-05 1.879 0.0629 .
## h           1.205e+00 1.083e+00 1.112 0.2683
## ---
## Signif. codes:  0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1
##
## Residual standard error: 1.344 on 114 degrees of freedom
## Multiple R-squared:  0.916, Adjusted R-squared:  0.9123
## F-statistic: 248.5 on 5 and 114 DF, p-value: < 2.2e-16

AIC(compren)

## [1] 419.2941

residuos <- residuals(compren)
# Crear y guardar los gráficos
png("G:/Mi unidad/UNAMAD 2023 en adelante/Asesoramiento de tesis/Lindsay y
Yeni/graficos de normalidad/comprendensiva.shihua.png", width = 1000, height =
1000, res = 200)
# QQ-plot
qqnorm(residuos,
      main = "QQ-Plot de residuos\nComprensiva",
      xlab = "Cuantiles teóricos",
      ylab = "Cuantiles de la muestra",
      pch = 19, col = "blue", cex = 0.8)
qqline(residuos, col = "red", lwd = 2)
dev.off()

## png
## 2

shapiro.test(residuos)

##
## Shapiro-Wilk normality test
##
## data:  residuos
## W = 0.98975, p-value = 0.5123

# NasLund
naslund <- lm(v ~ dap2 + dap2h + h2 + daph2, data = shihua)
summary(naslund)

##
## Call:
## lm(formula = v ~ dap2 + dap2h + h2 + daph2, data = shihua)
##
## Residuals:
##      Min       1Q   Median       3Q      Max
```

```
## -3.5384 -0.8352 -0.1131 0.8002 3.2357
##
## Coefficients:
##             Estimate Std. Error t value Pr(>|t|)
## (Intercept)  1.552e+00  1.015e+00   1.529   0.1290
## dap2        -3.123e-04  1.785e-04  -1.750   0.0828 .
## dap2h        9.812e-05  1.746e-05   5.620 1.35e-07 ***
## h2           3.365e-03  8.551e-03   0.393   0.6947
## daph2       -1.831e-04  1.191e-04  -1.537   0.1269
## ---
## Signif. codes:  0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1
##
## Residual standard error: 1.308 on 115 degrees of freedom
## Multiple R-squared:  0.9196, Adjusted R-squared:  0.9168
## F-statistic: 328.9 on 4 and 115 DF,  p-value: < 2.2e-16

AIC(naslund)

## [1] 411.9451

residuos <- residuals(naslund)
# Crear y guardar Los gráficos
png("G:/Mi unidad/UNAMAD 2023 en adelante/Asesoramiento de tesis/Lindsay y
Yeni/graficos de normalidad/naslund.shihua.png", width = 1000, height = 100
0, res = 200)
# QQ-plot
qqnorm(residuos,
        main = "QQ-Plot de residuos\nNaslund",
        xlab = "Cuantiles teóricos",
        ylab = "Cuantiles de la muestra",
        pch = 19, col = "blue", cex = 0.8)
qqline(residuos, col = "red", lwd = 2)
dev.off()

## png
## 2

shapiro.test(residuos)

##
## Shapiro-Wilk normality test
##
## data:  residuos
## W = 0.99009, p-value = 0.5428

# Australiana de Stoa
austral.stoa <- lm(v ~ dap2 + dap3 + h + I(1/h), data = shihua)
summary(austral.stoa)

##
## Call:
## lm(formula = v ~ dap2 + dap3 + h + I(1/h), data = shihua)
##
```

```
## Residuals:
##      Min       1Q   Median       3Q      Max
## -3.9601 -0.8182  0.0477  0.8871  5.0400
##
## Coefficients:
##              Estimate Std. Error t value Pr(>|t|)
## (Intercept) -2.908e+00  4.727e+00  -0.615   0.5397
## dap2         1.814e-03  3.507e-04   5.172 9.91e-07 ***
## dap3        -4.778e-06  2.128e-06  -2.245   0.0267 *
## h            2.650e-01  1.384e-01   1.915   0.0580 .
## I(1/h)       -6.519e+01  3.549e+01  -1.837   0.0688 .
## ---
## Signif. codes:  0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1
##
## Residual standard error: 1.489 on 115 degrees of freedom
## Multiple R-squared:  0.8959, Adjusted R-squared:  0.8922
## F-statistic: 247.3 on 4 and 115 DF,  p-value: < 2.2e-16

AIC(austral.stoat)

## [1] 443.0274

residuos <- residuals(austral.stoat)
# Crear y guardar Los gráficos
png("G:/Mi unidad/UNAMAD 2023 en adelante/Asesoramiento de tesis/Lindsay y
Yeni/graficos de normalidad/austral.stoat.shihua.png", width = 1000, height
= 1000, res = 200)
# QQ-plot
qqnorm(residuos,
      main = "QQ-Plot de residuos\nAustraliana de Stoat",
      xlab = "Cuantiles teóricos",
      ylab = "Cuantiles de la muestra",
      pch = 19, col = "blue", cex = 0.8)
qqline(residuos, col = "red", lwd = 2)
dev.off()

## png
## 2

shapiro.test(residuos)

##
## Shapiro-Wilk normality test
##
## data:  residuos
## W = 0.98764, p-value = 0.3486

# Variable combinada de segundo grado
var.comb.segun <- lm(v ~ dap2h + I((dap2h)^2), data = shihua)
summary(var.comb.segun)

##
## Call:
```

```
## lm(formula = v ~ dap2h + I((dap2h)^2), data = shihua)
##
## Residuals:
##      Min       1Q   Median       3Q      Max
## -6.1223 -0.7868  0.0313  0.8210  3.9950
##
## Coefficients:
##              Estimate Std. Error t value Pr(>|t|)
## (Intercept)  -7.279e-01  7.925e-01  -0.918   0.3603
## dap2h          7.512e-05  8.234e-06   9.124 2.51e-15 ***
## I((dap2h)^2) -3.660e-11  1.955e-11  -1.872   0.0637 .
## ---
## Signif. codes:  0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1
##
## Residual standard error: 1.412 on 117 degrees of freedom
## Multiple R-squared:  0.9048, Adjusted R-squared:  0.9032
## F-statistic: 555.9 on 2 and 117 DF,  p-value: < 2.2e-16

AIC(var.comb.segun)

## [1] 428.2859

residuos <- residuals(var.comb.segun)
# Crear y guardar Los gráficos
png("G:/Mi unidad/UNAMAD 2023 en adelante/Asesoramiento de tesis/Lindsay y
Yeni/graficos de normalidad/var.comb.segun.shihua.png", width = 1000, height = 1000, res = 200)
# QQ-plot
qqnorm(residuos,
        main = "QQ-Plot de residuos\nVariable combinada de segundo grado",
        xlab = "Cuantiles teóricos",
        ylab = "Cuantiles de la muestra",
        pch = 19, col = "blue", cex = 0.8)
qqline(residuos, col = "red", lwd = 2)
dev.off()

## png
## 2

shapiro.test(residuos)

##
## Shapiro-Wilk normality test
##
## data:  residuos
## W = 0.97043, p-value = 0.00956

# Logarítmica de Schumacher (no lineal)
log.schum = nls(v ~ a * dap^b * h^c, data = shihua, start = c(a = 0.0001,
                                                                b = 2, c =
0.7), trace = FALSE, nls.control(maxiter = 10000))
summary(log.schum)
```

```
##
## Formula: v ~ a * dap^b * h^c
##
## Parameters:
##      Estimate Std. Error t value Pr(>|t|)
## a 1.203e-04  4.176e-05   2.882  0.00471 **
## b 2.003e+00  6.504e-02  30.789 < 2e-16 ***
## c 7.695e-01  5.253e-02  14.649 < 2e-16 ***
## ---
## Signif. codes:  0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1
##
## Residual standard error: 1.339 on 117 degrees of freedom
##
## Number of iterations to convergence: 4
## Achieved convergence tolerance: 4.358e-06

AIC(log.schum)

## [1] 415.6156

residuos <- residuals(log.schum)
# Crear y guardar Los gráficos
png("G:/Mi unidad/UNAMAD 2023 en adelante/Asesoramiento de tesis/Lindsay y
Yeni/graficos de normalidad/log.schum.shihua.png", width = 1000, height = 1
000, res = 200)
# QQ-plot
qqnorm(residuos,
        main = "QQ-Plot de residuos\nLogarítmica de Schumacher",
        xlab = "Cuantiles teóricos",
        ylab = "Cuantiles de la muestra",
        pch = 19, col = "blue", cex = 0.8)
qqline(residuos, col = "red", lwd = 2)
dev.off()

## png
## 2

shapiro.test(residuos)

##
## Shapiro-Wilk normality test
##
## data:  residuos
## W = 0.98584, p-value = 0.2439

# Logarítmica de Schumacher (linealizado)
log.schum2 <- lm(logv ~ logdap + logh, data = shihua)
summary(log.schum2)

##
## Call:
## lm(formula = logv ~ logdap + logh, data = shihua)
##
```

```
## Residuals:
##      Min       1Q   Median       3Q      Max
## -0.128273 -0.033828  0.002338  0.033492  0.092314
##
## Coefficients:
##              Estimate Std. Error t value Pr(>|t|)
## (Intercept) -4.06664    0.13409  -30.33  <2e-16 ***
## logdap       2.05694    0.06110   33.67  <2e-16 ***
## logh         0.79719    0.05399   14.76  <2e-16 ***
## ---
## Signif. codes:  0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1
##
## Residual standard error: 0.04959 on 117 degrees of freedom
## Multiple R-squared:  0.9249, Adjusted R-squared:  0.9237
## F-statistic: 720.9 on 2 and 117 DF,  p-value: < 2.2e-16

AIC(log.schum2)

## [1] -375.4399

# Variable combinada Logarítmica (no lineal)
var.comb.log = nls(v ~ a * dap2h^b, data = shihua, start = c(a=0.0001, b=0.8),
                  trace = FALSE, nls.control(maxiter = 10000))
summary(var.comb.log)

##
## Formula: v ~ a * dap2h^b
##
## Parameters:
##      Estimate Std. Error t value Pr(>|t|)
## a 1.351e-04  4.931e-05   2.741  0.00708 **
## b 9.380e-01  2.967e-02  31.618  < 2e-16 ***
## ---
## Signif. codes:  0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1
##
## Residual standard error: 1.418 on 118 degrees of freedom
##
## Number of iterations to convergence: 6
## Achieved convergence tolerance: 5.399e-07

AIC(var.comb.log)

## [1] 428.4056

residuos <- residuals(var.comb.log)
# Crear y guardar los gráficos
png("G:/Mi unidad/UNAMAD 2023 en adelante/Asesoramiento de tesis/Lindsay y
Yeni/graficos de normalidad/var.comb.log.shihua.png", width = 1000, height
= 1000, res = 200)
# QQ-plot
qqnorm(residuos,
       main = "QQ-Plot de residuos\nVariable combinada logarítmica",
```

```

        xlab = "Cuantiles teóricos",
        ylab = "Cuantiles de la muestra",
        pch = 19, col = "blue", cex = 0.8)
qqline(residuos, col = "red", lwd = 2)
dev.off()

## png
## 2

shapiro.test(residuos)

##
## Shapiro-Wilk normality test
##
## data:  residuos
## W = 0.96461, p-value = 0.003023

# Variable combinada logarítmica (linealizado)
var.com.log2 <- lm(logv ~ logdap2h, data = shihua)
summary(var.com.log2)

##
## Call:
## lm(formula = logv ~ logdap2h, data = shihua)
##
## Residuals:
##      Min       1Q   Median       3Q      Max
## -0.172731 -0.032076  0.004578  0.036772  0.095818
##
## Coefficients:
##              Estimate Std. Error t value Pr(>|t|)
## (Intercept) -4.03369     0.14041  -28.73  <2e-16 ***
## logdap2h      0.96851     0.02689   36.01  <2e-16 ***
## ---
## Signif. codes:  0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1
##
## Residual standard error: 0.05205 on 118 degrees of freedom
## Multiple R-squared:  0.9166, Adjusted R-squared:  0.9159
## F-statistic: 1297 on 1 and 118 DF,  p-value: < 2.2e-16

AIC(var.com.log2)

## [1] -364.8028

# Figuras de validación de modelos: Valores estimados vs. valores observado
# o medidos
tiff(filename = "G:/Mi unidad/UNAMAD 2023 en adelante/Asesoramiento de tesi
s/Lindsay y Yeni/var.comb.primer.tiff",
      width=7.5, height=7.5, unit="in", res=300, compression = 'lzw')
par(mar = c(5.1, 4.5, 4.1, 2.1))
plot(var.comb.primer$fitted.values ~ var.comb.primer$model$v, xlab=expressi
on("Volumen observado (m"^3*")"),
      ylab=expression("Volumen estimado (m"^3*")"), asp=1, las=1, main="Vari

```

```

able combinada de primer grado")
lm <- lm(var.comb.primer$fitted.values ~ var.comb.primer$model$v)
abline(lm, lw=2, col="blue")
abline(0,1)
dev.off()

## png
## 2

tiff(filename = "G:/Mi unidad/UNAMAD 2023 en adelante/Asesoramiento de tesis/Lindsay y Yeni/var.com.gen.aust.tiff",
      width=7.5, height=7.5, unit="in", res=300, compression = 'lzw')
par(mar = c(5.1, 4.5, 4.1, 2.1))
plot(var.com.gen.aust$fitted.values ~ var.com.gen.aust$model$v, xlab=expression("Volumen observado (m^3)"),
      ylab=expression("Volumen estimado (m^3)"), asp=1, las=1, main="Variable combinada generalizada")
lm <- lm(var.com.gen.aust$fitted.values ~ var.com.gen.aust$model$v)
abline(lm, lw=2, col="blue")
abline(0,1)
dev.off()

## png
## 2

tiff(filename = "G:/Mi unidad/UNAMAD 2023 en adelante/Asesoramiento de tesis/Lindsay y Yeni/meyer.mod.tiff",
      width=7.5, height=7.5, unit="in", res=300, compression = 'lzw')
par(mar = c(5.1, 4.5, 4.1, 2.1))
plot(meyer.mod$fitted.values ~ meyer.mod$model$v, xlab=expression("Volumen observado (m^3)"),
      ylab=expression("Volumen estimado (m^3)"), asp=1, las=1, main="Meyer modificada")
lm <- lm(meyer.mod$fitted.values ~ meyer.mod$model$v)
abline(lm, lw=2, col="blue")
abline(0,1)
dev.off()

## png
## 2

tiff(filename = "G:/Mi unidad/UNAMAD 2023 en adelante/Asesoramiento de tesis/Lindsay y Yeni/compren.tiff",
      width=7.5, height=7.5, unit="in", res=300, compression = 'lzw')
par(mar = c(5.1, 4.5, 4.1, 2.1))
plot(compren$fitted.values ~ compren$model$v, xlab=expression("Volumen observado (m^3)"),
      ylab=expression("Volumen estimado (m^3)"), asp=1, las=1, main="Comprensiva")
lm <- lm(compren$fitted.values ~ compren$model$v)
abline(lm, lw=2, col="blue")
abline(0,1)
dev.off()

```

```

## png
## 2

tiff(filename = "G:/Mi unidad/UNAMAD 2023 en adelante/Asesoramiento de tesis/Lindsay y Yeni/naslund.tiff",
      width=7.5, height=7.5, unit="in", res=300, compression = 'lzw')
par(mar = c(5.1, 4.5, 4.1, 2.1))
plot(naslund$fitted.values ~ naslund$model$v, xlab=expression("Volumen observado (m^3)"),
      ylab=expression("Volumen estimado (m^3)"), asp=1, las=1, main="Naslund")
lm <- lm(naslund$fitted.values ~ naslund$model$v)
abline(lm, lw=2, col="blue")
abline(0,1)
dev.off()

## png
## 2

tiff(filename = "G:/Mi unidad/UNAMAD 2023 en adelante/Asesoramiento de tesis/Lindsay y Yeni/austral.stoat.tiff",
      width=7.5, height=7.5, unit="in", res=300, compression = 'lzw')
par(mar = c(5.1, 4.5, 4.1, 2.1))
plot(austral.stoat$fitted.values ~ austral.stoat$model$v, xlab=expression("Volumen observado (m^3)"),
      ylab=expression("Volumen estimado (m^3)"), asp=1, las=1, main="Australiana de Stoat")
lm <- lm(austral.stoat$fitted.values ~ austral.stoat$model$v)
abline(lm, lw=2, col="blue")
abline(0,1)
dev.off()

## png
## 2

tiff(filename = "G:/Mi unidad/UNAMAD 2023 en adelante/Asesoramiento de tesis/Lindsay y Yeni/var.comb.segun.tiff",
      width=7.5, height=7.5, unit="in", res=300, compression = 'lzw')
par(mar = c(5.1, 4.5, 4.1, 2.1))
plot(var.comb.segun$fitted.values ~ var.comb.segun$model$v, xlab=expression("Volumen observado (m^3)"),
      ylab=expression("Volumen estimado (m^3)"), asp=1, las=1, main="Variable combinada de segundo grado")
lm <- lm(var.comb.segun$fitted.values ~ var.comb.segun$model$v)
abline(lm, lw=2, col="blue")
abline(0,1)
dev.off()

## png
## 2

fit.schum <- predict(log.schum, shihua[,2:3])
vol.observado <- shihua$v

```

```

tiff(filename = "G:/Mi unidad/UNAMAD 2023 en adelante/Asesoramiento de tesis/Lindsay y Yeni/log.schum.tiff",
      width=7.5, height=7.5, unit="in", res=300, compression = 'lzw')
par(mar = c(5.1, 4.5, 4.1, 2.1))
plot(fit.schum ~ vol.observado, xlab=expression("Volumen observado (m3*)"),
     ylab=expression("Volumen estimado (m3*)"), asp=1, las=1, main="Logarítmica de Schumacher")
lm <- lm(fit.schum ~ vol.observado)
abline(lm, lw=2, col="blue")
abline(0,1)
dev.off()

## png
## 2

fit.com.log <- predict(var.comb.log, shihua[,8])
tiff(filename = "G:/Mi unidad/UNAMAD 2023 en adelante/Asesoramiento de tesis/Lindsay y Yeni/var.comb.log.tiff",
      width=7.5, height=7.5, unit="in", res=300, compression = 'lzw')
par(mar = c(5.1, 4.5, 4.1, 2.1))
plot(fit.com.log ~ vol.observado, xlab=expression("Volumen observado (m3*)"),
     ylab=expression("Volumen estimado (m3*)"), asp=1, las=1, main="Variable combinada logarítmica")
lm <- lm(fit.com.log ~ vol.observado)
abline(lm, lw=2, col="blue")
abline(0,1)
dev.off()

## png
## 2

# Figuras de Residuos
tiff(filename = "G:/Mi unidad/UNAMAD 2023 en adelante/Asesoramiento de tesis/Lindsay y Yeni/res_var.comb.primer.tiff",
      width=7.5, height=7.5, unit="in", res=300, compression = 'lzw')
par(mar = c(5.1, 4.5, 4.1, 2.1))
plot(var.comb.primer$residuals ~ var.comb.primer$fitted.values, xlab=expression("Volumen estimado (m3*)"),
     ylab=expression("Residuos (m3*)"), asp=1, las=1, main="Variable combinada de primer grado")
dev.off()

## png
## 2

tiff(filename = "G:/Mi unidad/UNAMAD 2023 en adelante/Asesoramiento de tesis/Lindsay y Yeni/res_var.com.gen.aust.tiff",
      width=7.5, height=7.5, unit="in", res=300, compression = 'lzw')
par(mar = c(5.1, 4.5, 4.1, 2.1))
plot(var.com.gen.aust$residuals ~ var.com.gen.aust$fitted.values, xlab=expression("Volumen estimado (m3*)"),

```

```

        ylab=expression("Residuos (m"^3*")"), asp=1, las=1, main="Variable com
binada generalizada")
dev.off()

## png
## 2

tiff(filename = "G:/Mi unidad/UNAMAD 2023 en adelante/Asesoramiento de tesi
s/Lindsay y Yeni/res_meyer.mod.tiff",
      width=7.5, height=7.5, unit="in", res=300, compression = 'lzw')
par(mar = c(5.1, 4.5, 4.1, 2.1))
plot(meyer.mod$residuals ~ meyer.mod$fitted.values, xlab=expression("Volume
n estimado (m"^3*")"),
      ylab=expression("Residuos (m"^3*")"), asp=1, las=1, main="Meyer modifi
cada")
dev.off()

## png
## 2

tiff(filename = "G:/Mi unidad/UNAMAD 2023 en adelante/Asesoramiento de tesi
s/Lindsay y Yeni/res_compren.tiff",
      width=7.5, height=7.5, unit="in", res=300, compression = 'lzw')
par(mar = c(5.1, 4.5, 4.1, 2.1))
plot(compren$residuals ~ compren$fitted.values, xlab=expression("Volumen es
timado (m"^3*")"),
      ylab=expression("Residuos (m"^3*")"), asp=1, las=1, main="Comprensiva"
)
dev.off()

## png
## 2

tiff(filename = "G:/Mi unidad/UNAMAD 2023 en adelante/Asesoramiento de tesi
s/Lindsay y Yeni/res_naslund.tiff",
      width=7.5, height=7.5, unit="in", res=300, compression = 'lzw')
par(mar = c(5.1, 4.5, 4.1, 2.1))
plot(naslund$residuals ~ naslund$fitted.values, xlab=expression("Volumen es
timado (m"^3*")"),
      ylab=expression("Residuos (m"^3*")"), asp=1, las=1, main="Naslund")
dev.off()

## png
## 2

tiff(filename = "G:/Mi unidad/UNAMAD 2023 en adelante/Asesoramiento de tesi
s/Lindsay y Yeni/res_austral.stoat.tiff",
      width=7.5, height=7.5, unit="in", res=300, compression = 'lzw')
par(mar = c(5.1, 4.5, 4.1, 2.1))
plot(austral.stoat$residuals ~ austral.stoat$fitted.values, xlab=expression
("Volumen estimado (m"^3*")"),
      ylab=expression("Residuos (m"^3*")"), asp=1, las=1, main="australiana

```

```

de Stoaat")
dev.off()

## png
## 2

tiff(filename = "G:/Mi unidad/UNAMAD 2023 en adelante/Asesoramiento de tesisi/Lindsay y Yeni/res_var.comb.segun.tiff",
      width=7.5, height=7.5, unit="in", res=300, compression = 'lzw')
par(mar = c(5.1, 4.5, 4.1, 2.1))
plot(var.comb.segun$residuals ~ var.comb.segun$fitted.values, xlab=expression("Volumen estimado (m^3*)"),
      ylab=expression("Residuos (m^3*)"), asp=1, las=1, main="Variable combinada de segundo grado")
dev.off()

## png
## 2

res_schu <- shihua$v- fit.schum
tiff(filename = "G:/Mi unidad/UNAMAD 2023 en adelante/Asesoramiento de tesisi/Lindsay y Yeni/res_log.schum.segun.tiff",
      width=7.5, height=7.5, unit="in", res=300, compression = 'lzw')
par(mar = c(5.1, 4.5, 4.1, 2.1))
plot(res_schu ~ fit.schum, xlab=expression("Volumen estimado (m^3*)"),
      ylab=expression("Residuos (m^3*)"), asp=1, las=1, main="Logarítmica de Schumacher")
dev.off()

## png
## 2

res_var.comb.log <- shihua$v- fit.com.log
tiff(filename = "G:/Mi unidad/UNAMAD 2023 en adelante/Asesoramiento de tesisi/Lindsay y Yeni/res_var.comb.log.segun.tiff",
      width=7.5, height=7.5, unit="in", res=300, compression = 'lzw')
par(mar = c(5.1, 4.5, 4.1, 2.1))
plot(res_var.comb.log ~ fit.com.log, xlab=expression("Volumen estimado (m^3*)"),
      ylab=expression("Residuos (m^3*)"), asp=1, las=1, main="Variable combinada logarítmica")
dev.off()

## png
## 2

```