

ESTIMACIÓN DE LA BIOMASA FUSTAL DEL BOSQUE SIMULADO Y PLANTACIÓN FORESTAL DE LA UNALM (PERÚ)

Estimation of stem biomass of the "Simulated Forest and Forest Plantation" of UNALM (Peru)

Roxana Guillén Quispe ^{1,4}, Víctor Manuel Barrena Arroyo ^{2,4} y Juan Carlos Ocaña Canales ^{3,4}

¹Ing. Forestal, Mg. Sc., profesora asociada, rguillen@lamolina.edu.pe

²Ing. Forestal, profesor principal, vbarrena@lamolina.edu.pe

³Ing. Forestal, Mg. Sc., profesor asociado, jcocana@lamolina.edu.pe

⁴Universidad Nacional Agraria La Molina (UNALM), Av. La Molina s/n, La Molina, Lima, Perú

REGISTROS

Recibido el 27/05/2026

Aceptado el 18/06/2026

Publicado el 20/07/2026



PALABRAS CLAVE

Biomasa forestal,
biomasa de fustes,
ecuación de biomasa,
plantación forestal mixta.

KEYWORDS

Forest biomass,
stem biomass,
biomass equation,
mixed forest plantation.

RESUMEN

El objetivo del presente trabajo fue determinar una ecuación que estime la biomasa de los fustes del "Bosque Simulado y Plantación Forestal", de la Universidad Nacional Agraria La Molina (UNALM), es una plantación mixta. Se usaron datos de 45 individuos de las especies: *Grevillea robusta*, *Eucalyptus* sp., *Koeleria paniculata*, *Ficus benjamina*, *Casuarina cunninghamiana*, *Melia azedarach*, *Spathodea campanulata* y *Enterolobium contortisiliquum*. Para la elaboración de las ecuaciones, se utilizaron 39 individuos luego de eliminar los *outliers*. Se eligieron 26 modelos para estimar la biomasa del fuste (kg) en función del diámetro a la altura de pecho (cm) y de la altura de fuste (m). La metodología seguida para obtener los datos fue no destructiva. Se utilizó el método de mínimos cuadrados lineales para obtener las ecuaciones. Las ecuaciones con un R^2 mayor o igual a 51 % fueron aceptadas. El resto de ecuaciones pasaron la prueba Fisher y solo 10 ecuaciones lograron pasar la prueba t-Student. Los residuales de estas ecuaciones fueron analizados gráficamente para comprobar si cumplían los supuestos. La ecuación que mejor estima la biomasa del fuste de este bosque es $DAP^{1,45} H^{0,1}$. A esta ecuación se le aplicó la prueba de Breusch-Pagan para confirmar la homocedasticidad de sus residuos.

ABSTRACT

The objective of this paper was to determine an equation that estimates the biomass of the stems of the "Simulated Forest and Forest Plantation" of the National Agrarian University La Molina (UNALM), it is a mixed plantation. Data from 45 individuals of the following species were used: *Grevillea robusta*, *Eucalyptus* sp., *Koeleria paniculata*, *Ficus benjamina*, *Casuarina cunninghamiana*, *Melia azedarach*, *Spathodea campanulata* and *Enterolobium contortisiliquum*. Thirty-nine individuals were used to develop the equations after eliminating outliers. Twenty-six models were chosen to estimate stem biomass (kg) based on diameter at breast height (cm) and stem height (m). The data collection methodology was non-destructive. The linear least squares method was used to obtain the equations. Equations with an R^2 greater than or equal to 51 % were accepted. The remaining equations passed the Fisher test, and only 10 equations managed to pass the t-Student test. The residuals of these equations were analyzed graphically to check whether they met the regression assumptions. The independent variable of the equation that best estimates the stem biomass of this forest is $DAP^{1,45} H^{0,1}$. The Breusch-Pagan test was applied to this equation to confirm the homoscedasticity of its residuals.

1. Introducción

La biomasa forestal contiene la totalidad de la materia orgánica en los árboles y otras plantas que forman parte de un ecosistema forestal. Constituye un indicador importante en el análisis de procesos ecológicos, por lo que su cuantificación es clave para estudios de dinámica forestal y la gestión del bosque (FAO, 2020).

Nogués (2010) define la biomasa como sustancias orgánicas que tienen su origen en los compuestos de carbono formados por fotosíntesis. Asimismo, Fournier (2003) señala que corresponde a la cantidad de materia orgánica presente en un determinado sitio de la Tierra, en un momento dado y en una cierta área. Por su parte, la FAO (2019) menciona que el concepto de biomasa engloba a toda materia orgánica que se genera por un proceso biológico. Fournier (2003) agrega que incluye a todos los organismos vivos que se presentan en el sitio, tanto en la superficie de la Tierra como en el subterráneo. La biomasa se expresa por lo general en gramos de peso seco por metro cuadrado o en kilogramos por hectárea.

La estimación de la biomasa forestal aérea constituye un componente esencial en la evaluación de los servicios ecosistémicos que brindan los bosques, especialmente en el contexto del cambio climático global (IPCC, 2006). Según Fonseca-González (2017), existen cuatro métodos para determinar la biomasa. El primer método es la aplicación de ecuaciones o modelos de regresión de biomasa (ecuaciones alométricas) específicos por especie a partir de mediciones de diámetros y de alturas de árboles individuales. Estos datos son fáciles de obtener y de bajo costo. Acosta et al. (2002) indican que, en caso de que no se cuente con ecuaciones específicas para un área dada, podrían utilizarse ecuaciones de biomasa a nivel regional o global, como las de Brown et al. (1989), por ejemplo.

El segundo método calcula la biomasa del fuste multiplicando la densidad específica por el volumen del fuste. Este volumen se calcula usando un factor de forma o se estima de ecuaciones de volumen (Fonseca-González, 2017).

MacDicken (1997) menciona otro método para calcular la biomasa de una población forestal a partir de la biomasa del árbol promedio de dicha población.

Picard (2012) añade que se puede estimar la biomasa a escala de paisaje o bioma a partir de imágenes ópticas de media y alta resolución, de radar, lidar. Estas imágenes pueden ser captadas desde sensores montados en satélites, aviones y drones. Para ello, se multiplica la superficie de cada bioma por la cantidad de biomasa media por unidad de superficie para dicho bioma.

En las últimas décadas, la estimación de biomasa aérea se ha realizado principalmente mediante métodos indirectos basados en variables dendrométricas, tales como el diámetro a la altura del pecho (DAP), la altura total, la altura de fuste y la densidad básica de la madera (Chave et al., 2014). Entre estas variables, la densidad de la madera es considerada una de las propiedades físicas más importantes debido a su estrecha relación con otras características de la madera (León, 2010). La densidad básica representa la cantidad de material leñoso presente por unidad de volumen (Figueroa, 2007) y, según Chave et al. (2005), corresponde al cociente entre la masa seca en estufa y el volumen verde de la madera. Núñez (2007) destaca que esta variable es ampliamente utilizada en la estimación de biomasa junto con otros parámetros dendrométricos.

Para construir ecuaciones de biomasa, MacDicken (1997) recomienda utilizar como mínimo 30 árboles adecuadamente seleccionados. Adicionalmente, Palma (2022) señala que tanto el tamaño de la muestra como la cantidad de parámetros empleados condicionan la calidad del ajuste y la precisión de un modelo.

En este contexto, el presente estudio tiene como objetivo elaborar una ecuación para estimar la biomasa de los fustes de los árboles del "Bosque Simulado y Plantación Forestal". Este bosque cumple con una función académica y experimental. La aplicación de la ecuación de biomasa obtenida permitirá generar información útil para su manejo y la conservación de esta área.

2. Materiales y métodos

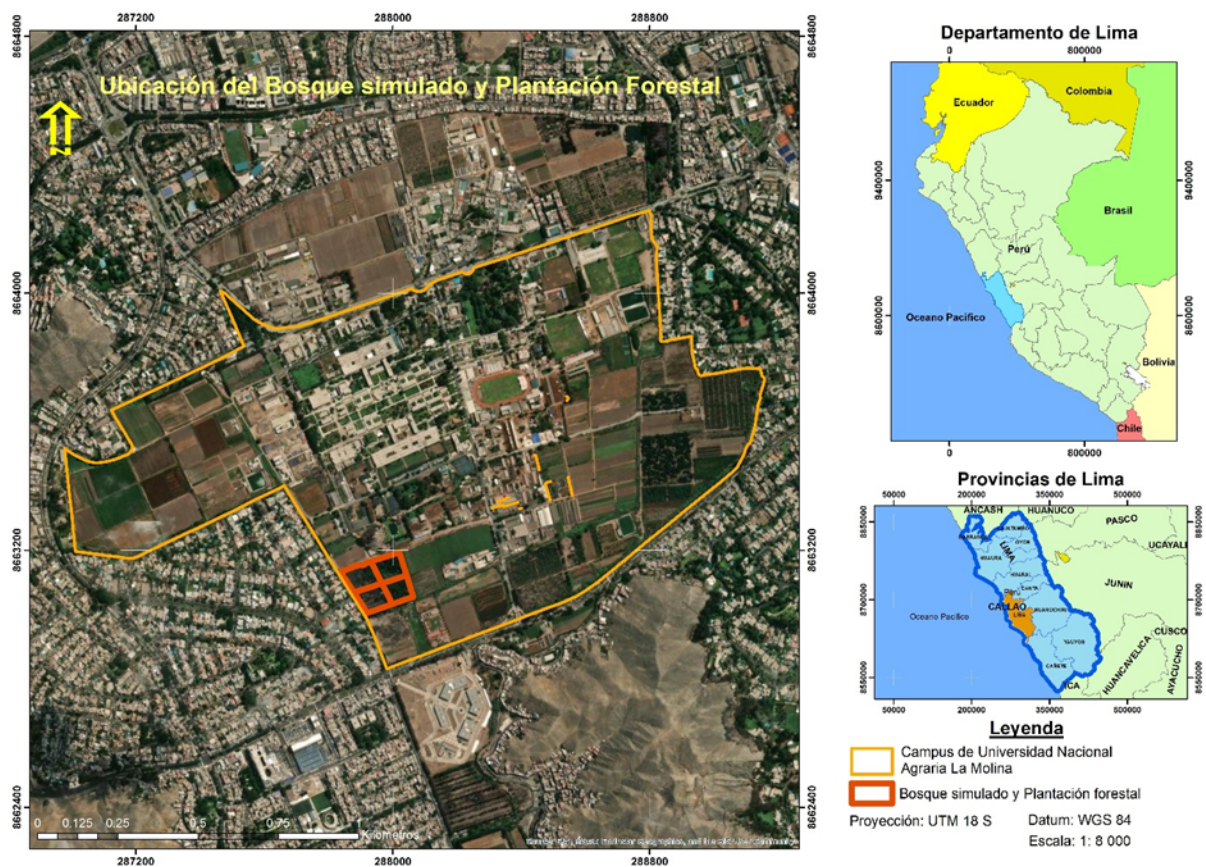
2.1. Área de estudio

El “Bosque Simulado y Plantación Forestal” fue instalado en 1998, está constituido por cuatro bloques y es una plantación mixta disetánea. Se encuentra dentro del campus universitario de la Universidad Nacional Agraria La Molina (UNALM), ubicado en el distrito de La Molina, en el departamento de Lima (Perú). Geográficamente se ubica a 12°05'06" de latitud sur y 76°75'00" de longitud oeste, y a una altitud de 238 m s.n.m. (Chirinos, 2005).

El área de estudio cubre una superficie de aproximadamente 2,85 ha y limita por el norte con el Programa de Investigación y Proyección Social en Plantas Ornamentales; por el este, con el campo de algodón de la UNALM; por el sur, con el campo de leguminosas de la UNALM; y por el oeste con la avenida Tipuanas (fuera del campus universitario) (figura 1).

Figura 1

Mapa de ubicación del “Bosque Simulado y Plantación Forestal”.



nota: Elaboración propia.

2.2. Datos

El presente estudio contó con los datos de diámetros a la altura del pecho (DAP) en cm, alturas de fuste (h) en m y volumen (m³) de 45 árboles de las especies: *Casuarina cunninghamiana* Miq., *Enterolobium contortisiliquum* (Vell.) Morong, *Eucalyptus* sp., *Ficus benjamina* L., *Grevillea robusta* A.Cunn. ex R.Br., *Koelreuteria paniculata* Laxm., *Melia dubia* Cav. y *Spathodea campanulata* P.Beauv.

Los árboles fueron evaluados como parte del monitoreo anual del “Bosque Simulado y Plantación Forestal”.

2.3. Cálculo de la biomasa del fuste

Para el cálculo de la biomasa del fuste de un árbol se utilizó la fórmula (MINAM, 2015):

$$B = DB \times V \quad (1)$$

donde:

- B = biomasa (t o kg)
- DB = densidad básica de la madera (g/cm^3 o t/m^3)
- V = volumen del fuste (m^3)

Las densidades básicas por especie fueron obtenidas a partir de una revisión bibliográfica de fuentes confiables (tabla 2). En el caso de que se encontrara más de una densidad, se calculó el promedio. El volumen de los fustes fue calculado como parte del monitoreo anual del “Bosque Simulado y Plantación Forestal”.

2.4. Detección de *outliers*

Los *outliers* fueron detectados al analizar los gráficos de dispersión de las variables: biomasa calculada vs. DAP; y biomasa calculada vs. h, para posteriormente eliminarlos (Guillén, 2014) y así garantizar la validez estadística de los modelos y evitar sesgos (Montgomery, 2012).

2.5. Selección de los modelos de biomasa

Autores como Chave et al. (2014) y Picard (2012) recomiendan que, en las ecuaciones de biomasa, las variables independientes sean función del DAP y la h. Así, se seleccionaron 26 modelos de ecuaciones a partir de Valverde et al. (2019), Rivera (2018) y Simbaña (2011).

2.6. De las ecuaciones de biomasa

Para obtener las ecuaciones de biomasa de cada uno de los 26 modelos, se usó el método de regresión lineal basado en el método de los mínimos cuadrados, con un nivel de significancia de 0,05 (Valverde, 2019). El *software* que se utilizó fue R (ver. 4.5.0) y la interfaz RStudio (ver. 2024.12.1+563) y los paquetes: readxl, ggplot2; entre otros.

Para el análisis estadístico de las ecuaciones encontradas, lo primero que se analizó fue el coeficiente de determinación (R^2) que es una medida de bondad de ajuste de la regresión (Chatterjee y Hadi, 2012). Los R^2 de cada ecuación fueron clasificados, de acuerdo con Montgomery et al. (2012), en: a) 0 a 25 % (relación muy débil); b) 26 % a 50 % (relación débil); c) 51 % a 75 % (relación moderada); y d) 76 % a 100 % (relación fuerte). Se decidió considerar solo las ecuaciones de biomasa que tuvieran un R^2 mayor o igual a 51 %. Las ecuaciones que tuvieron un valor menor fueron descartadas para el análisis.

A continuación, se realizó la prueba de significancia de Fisher (F) con los datos del ANVA de cada regresión. Las ecuaciones que rechazaron la hipótesis nula, es decir, que demostraron la existencia de una relación significativa entre las variables independientes y la biomasa, fueron consideradas como no rechazada (NR), las otras ecuaciones fueron rechazadas (R) (Valverde, 2019).

Luego, para demostrar que los coeficientes de cada una de las ecuaciones de biomasa son diferentes a cero, es decir, que la variable asociada al coeficiente es significativa, se realizaron pruebas de t de Student (Cardona et al., 2013). Las ecuaciones que demostraron que todas sus variables independientes eran significativas (S) fueron aceptadas; las otras ecuaciones, las no significativas (NS), fueron rechazadas.

En las pruebas F y t -Student, el criterio utilizado para aceptar o rechazar la hipótesis nula fue el p -value. Si el p -value es mayor a 0,05, se acepta la hipótesis nula, en caso contrario, se la rechaza.

Para analizar si se cumplen los supuestos sobre los modelos de regresión de todas las ecuaciones no rechazadas, es decir, comprobar que los residuales presentan una distribución

normal, si no hay datos que sesgan la regresión, si tienen varianza constante (homocedasticidad), se analizaron los gráficos Q-Q (cuantil-cuantil), *scale location* (de ubicación extendida), *residuals vs. leverage* y *residuals vs. fitted* (Chatterjee y Hadi, 2012) producidos por el *software R*.

2.7. Selección de la ecuación de biomasa

Las ecuaciones aceptadas fueron ordenadas, de menor a mayor, según los valores del cuadrado medio del error (CME). La ecuación con menor CME fue seleccionada, pues es la que estima con mayor precisión la biomasa de los fustes del "Bosque Simulado y Plantación Forestal".

Si bien se realizó un análisis gráfico de los residuales, para confirmar que los residuales de la ecuación seleccionada tenían una varianza constante (homocedasticidad) se usó la prueba Breusch-Pagan (Zeileis y Hothorn, 2002) con el fin de ratificar la decisión de no ponderar las ecuaciones de biomasa. De igual manera que en las pruebas F y *t*-Student, el *p-value* fue utilizado para aceptar o rechazar la hipótesis nula.

3. Resultados

Los rangos de DAP y h, por especie, de los 45 árboles considerados en la muestra para la elaboración de la ecuación de biomasa (tabla 1).

Tabla 1

Resumen de los dap y h por especie de los árboles de la muestra.

Número de árboles	Especie	DAP mínimo (cm)	DAP máximo (cm)	Altura de fuste mínima (m)	Altura de fuste máxima (m)
5	<i>Casuarina cunninghamiana</i>	15	40	5	9
3	<i>Enterolobium contortisiliquum</i>	20	25	6,5	9
14	<i>Eucalyptus</i> sp.	10	40	5	9
4	<i>Ficus benjamina</i>	15	18	6	9
4	<i>Grevillea robusta</i>	10	20	5	14
5	<i>Koelreuteria paniculata</i>	6,25	15	5	6
3	<i>Melia dubia</i>	8,75	25	5,8	9
7	<i>Spathodea campanulata</i>	5	10	5	6

El DAP varía entre 5 cm a 40 cm, los árboles de mayor DAP son de *Eucalyptus* sp. y de *Casuarina cunninghamiana*, mientras que la especie con árboles de menor DAP es *Spathodea campanulata*.

Por otro lado, la altura de fuste varía entre 5 m a 14 m; la especie de mayor altura de fuste es *Grevillea robusta*, mientras que hay cinco especies que tienen árboles con alturas de fuste mínimas (5 m), las otras tres sus alturas mínimas son: 5,8 m, 6 m y 6,5 m.

Las densidades de la madera por especie usadas en el cálculo de la biomasa, encontradas en la literatura, se muestran en la tabla 2. La especie que posee una mayor densidad básica es *Casuarina cunninghamiana* (0,80 g/cm³) y la especie de menor densidad es *Spathodea campanulata* (0,30 g/cm³).

Los rangos de biomasa del fuste por especie de 45 árboles (tabla 3) que comprende la muestra para este estudio. Se calculó la biomasa por árbol según lo indicado en la metodología. Se observa que las especies que tienen árboles con mayor biomasa del fuste son: *Casuarina cunninghamiana* y *Eucalyptus* sp., mientras que esta última especie presenta un árbol con la menor biomasa. Asimismo, se observa que la biomasa por especie es muy variable.

Se detectaron seis *outliers*, los que fueron eliminados. Se eliminaron un árbol de *Casuarina cunninghamiana*, dos de *Eucalyptus* sp., uno de *Ficus benjamina*, uno de *Grevillea robusta* y uno de *Spathodea campanulata*. En total quedaron 39 árboles que fueron considerados para elaborar las ecuaciones de biomasa (anexo 1).

Tabla 2

Densidad básica de las especies arbóreas del “bosque simulado-plantación forestal”.

Especie	Densidad básica (g/cm ³)	Fuente
<i>Grevillea robusta</i>	0,60	UEIA (2014)
<i>Eucalyptus</i> sp.	0,56	Monteoliva et al. (2015)
<i>Koelreuteria paniculata</i>	0,40	UEIA (2014)
<i>Ficus benamina</i>	0,47	UEIA (2014)
<i>Casuarina cunninghamiana</i>	0,80	El Semillero (2019)
<i>Melia dubia</i>	0,40	FAO (1997)
<i>Spathodea campanulata</i>	0,30	UEIA (2014)
<i>Enterolobium contortisiliquum</i>	0,50	Niembro (s/f)

Tabla 3

Resumen de la biomasa de fuste por especie de los árboles de la muestra.

Número de árboles	Especie	Biomasa de fuste menor (kg)	Biomasa de fuste mayor (kg)
5	<i>Casuarina cunninghamiana</i>	160,73	641,08
3	<i>Enterolobium contortisiliquum</i>	183,66	422,85
14	<i>Eucalyptus</i> sp.	34,41	736,17
4	<i>Ficus benamina</i>	65,14	498,02
4	<i>Grevillea robusta</i>	58,84	449,19
5	<i>Koelreuteria paniculata</i>	50,06	308,74
3	<i>Melia dubia</i>	58,23	236,97
7	<i>Spathodea campanulata</i>	58,25	257,45

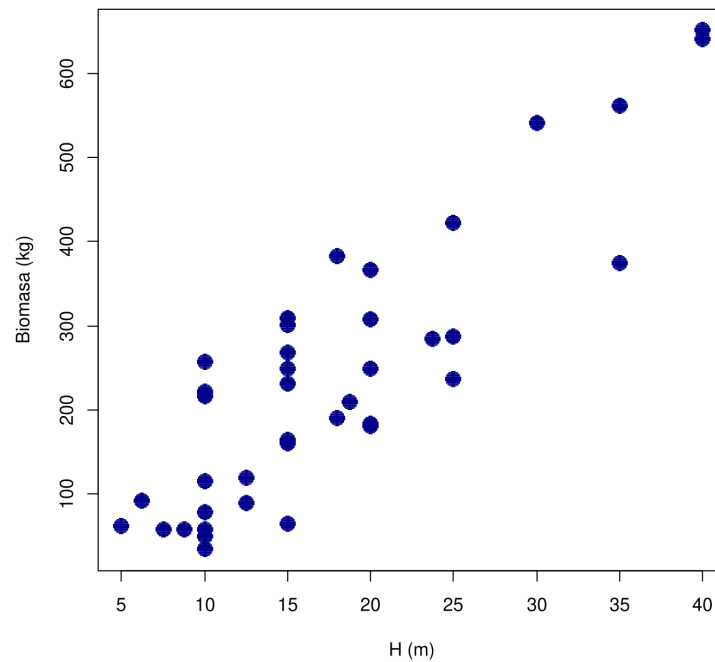
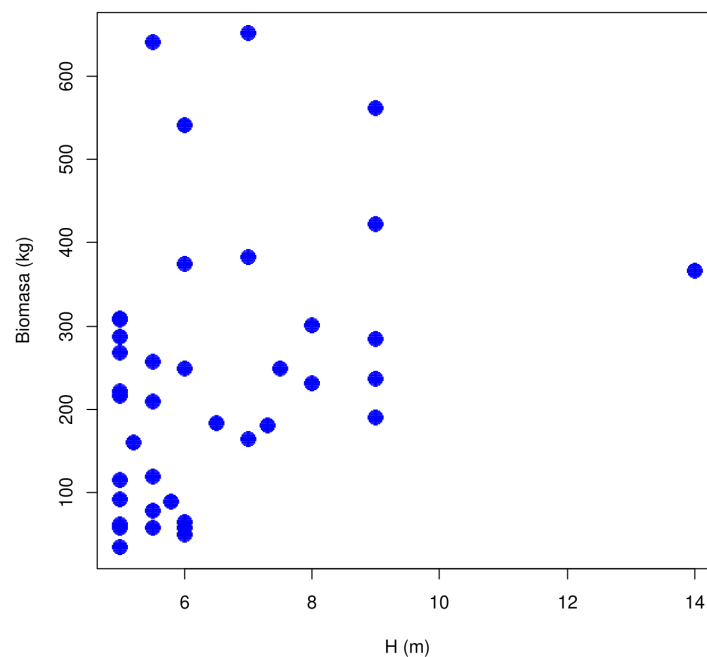
En la tabla 4 se observa que el rango de DAP y h, así como las especies con menor y mayor DAP y h, son los mismos que antes de eliminar los *outliers* (tabla 1). Se observa también que las especies con mayor biomasa fueron las mismas antes de la eliminación de *outliers* pero que, en este caso, el *Eucalyptus* sp. presenta menor biomasa. Esta especie mantiene el árbol con menor biomasa. Al igual que el *Eucalyptus* sp., las especies *Ficus benamina* y *Grevillea robusta*, el árbol de mayor biomasa es menor que antes de la eliminación de *outliers*.

Tabla 4

Resumen de los DAP, h y B por especie de 39 árboles luego de la eliminación de “outliers”.

N.º	Especie	DAP mín. (cm)	DAP máx. (cm)	Alt. mín. (m)	Alt. máx. (m)	Biomasa mín. (kg)	Biomasa máx. (kg)
4	<i>Casuarina cunninghamiana</i>	15,00	40	5,0	8,00	160,73	641,08
3	<i>Enterolobium contortisiliquum</i>	20,00	25	6,5	9,00	183,66	422,85
12	<i>Eucalyptus</i> sp.	10,00	40	5,0	9,00	34,41	651,05
3	<i>Ficus benamina</i>	15,00	18	6,0	8,00	65,14	382,51
3	<i>Grevillea robusta</i>	10,00	20	5,0	14,00	58,84	366,23
5	<i>Koelreuteria paniculata</i>	6,25	15	5,0	6,00	50,06	308,74
3	<i>Melia dubia</i>	8,75	25	5,8	9,00	58,23	236,97
6	<i>Spathodea campanulata</i>	5,00	10	5,0	5,50	58,25	257,45

La dispersión de la biomasa calculada vs. el DAP se muestra en la figura 2, mientras que el de biomasa calculada vs. la altura de fuste se muestra en la figura 3.

Figura 2*Biomasa calculada (kg) vs DAP (cm).***Figura 3***Biomasa calculada (kg) vs la altura de fuste (m).*

Los 26 modelos de ecuación de biomasa seleccionados se muestran en la tabla 5. El modelo 1 fue tomado de Simbaña (2011); los modelos 2, 6 y 11 fueron tomados de Rivera (2018) y los modelos 3 y 8, provienen de Ruiz (2007). Los modelos 4, 5, 7 y del 9 al 26, son adaptaciones de los modelos citados.

Figura 4

Gráficos para el análisis de los residuos de las ecuaciones 18, 23 y 15.

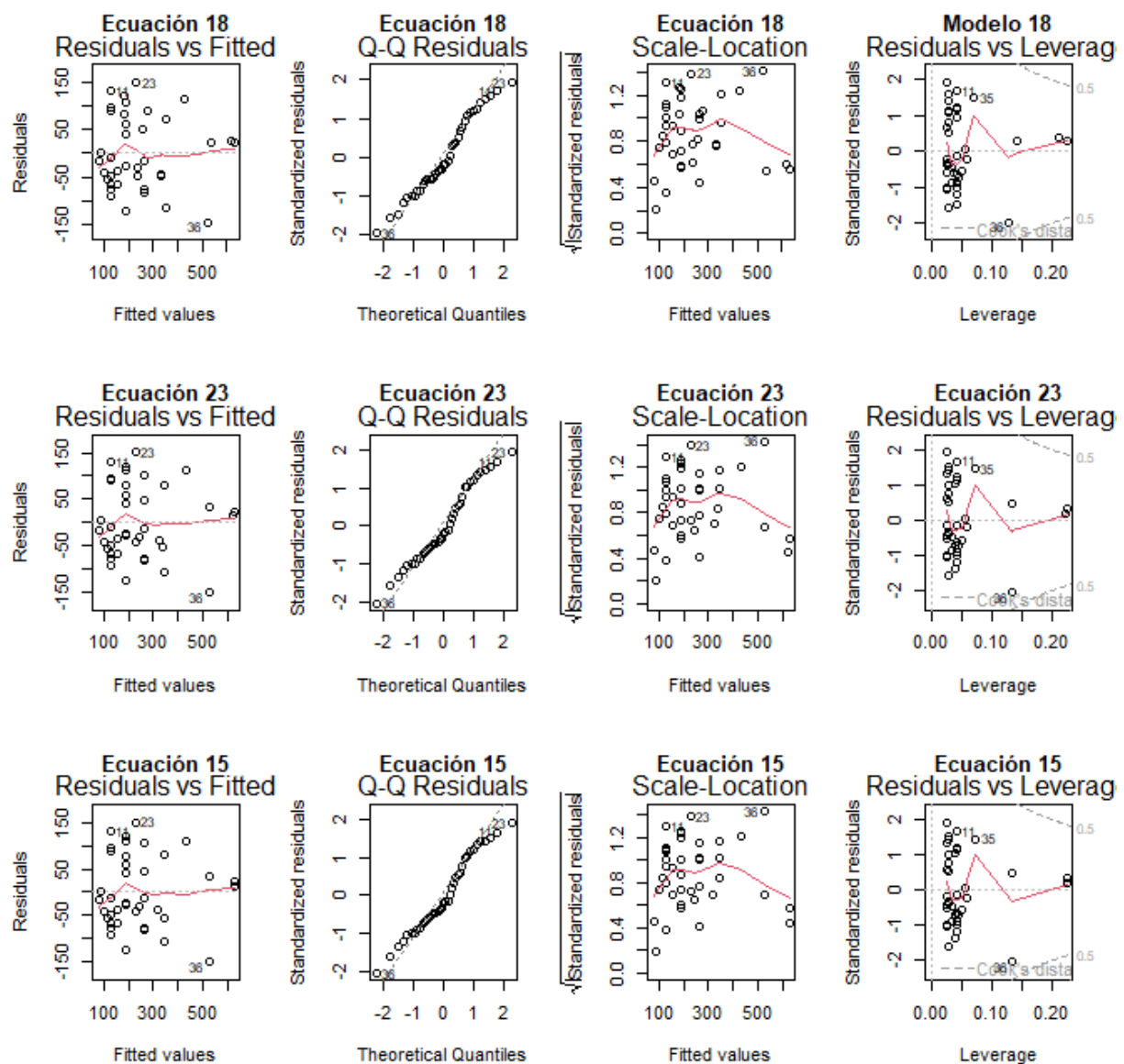


Tabla 5*Modelos para desarrollar ecuaciones de biomasa del fuste.*

Número	Modelo
1	$B = b_0 + b_1 dap$
2	$B = b_0 + b_1 h$
3	$B = b_0 + b_1 dap h$
4	$B = b_0 + b_1 dap + b_2 h$
5	$B = b_0 + b_1 dap + b_2 dap h$
6	$B = b_0 + b_1 dap + b_2 dap^2$
7	$B = b_0 + b_1 dap^2 + b_2 dap h$
8	$B = b_0 + b_1 dap^2 + b_2 dap^2 h$
9	$B = b_0 + b_1 dap^{1,1}$
10	$B = b_0 + b_1 dap^{1,9}$
11	$B = b_0 + b_1 dap^{1,5}$
12	$B = b_0 + b_1 dap^{1,6}$
13	$B = b_0 + b_1 dap^{1,4}$
14	$B = b_0 + b_1 dap^{1,55}$
15	$B = b_0 + b_1 dap^{1,45}$
16	$B = b_0 + b_1 dap^{(1,45)^2}$
17	$B = b_0 + b_1 h^{0,1}$
18	$B = b_0 + b_1 dap^{1,45} h^{0,1}$
19	$B = b_0 + b_1 dap^{1,45} + b_2 h^{0,1}$
20	$B = b_0 + b_1 dap^{(1,45)^2} h^{0,1}$
21	$B = b_0 + b_1 dap^{(1,45)^2} + b_2 h^{0,1}$
22	$B = b_0 + b_1 h^{0,01}$
23	$B = b_0 + b_1 dap^{1,45} h^{0,01}$
24	$B = b_0 + b_1 dap^{1,45} + b_2 h^{0,01}$
25	$B = b_0 + b_1 dap^{(1,45)^2} h^{0,01}$
26	$B = b_0 + b_1 dap^{(1,45)^2} + b_2 h^{0,01}$

donde:

- b_0 = término independiente (intercepto)
- b_1, b_2 = coeficientes
- dap = diámetro a la altura de pecho
- h = altura de fuste
- B = biomasa.

Los modelos de la tabla 6, se obtuvieron por regresión 26 ecuaciones de biomasa. De ellas, 23, presentaron valor de R^2 mayores o iguales a 51 %. Las ecuaciones 2 ($R^2 = 11,28\%$), 17 ($R^2 = 12,59\%$) y 22 ($R^2 = 12,59\%$) fueron descartadas por no haber alcanzado el valor mínimo de R^2 (tabla 7).

A las 23 ecuaciones de biomasa que no fueron rechazadas, se les aplicaron las pruebas F y de t -Student. En la tabla 6 se muestra si estas ecuaciones fueron rechazadas o no por estas pruebas. Se observa que todas las ecuaciones demostraron, con la prueba F, la existencia de una relación significativa entre las variables independientes (DAP, h) y la variable dependiente (biomasa).

La tabla 6 también muestra que las ecuaciones que han demostrado que todos sus coeficientes son diferentes a 0 (NR), son las ecuaciones 10, 11, 12, 14, 15, 16, 18, 20, 23 y 25 (prueba t -Student). Las otras ecuaciones que han sido rechazadas (R) no han demostrado que alguno de sus coeficientes no sea diferente a 0.

Las ecuaciones que fueron aceptadas fueron ordenadas de menor a mayor por los valores del CME del ANVA para análisis posteriores (tabla 7). A las tres ecuaciones que presentan menor CME (ecuaciones 18, 13 y 25) se les realizó el análisis gráfico de los residuales. En la figura 4 solo se muestran los gráficos Q-Q (cuantil-cuantil), *scale location* (de ubicación extendida), *residuals* vs.

Tabla 6*Resultado de las pruebas estadísticas de las ecuaciones de biomasa.*

N.º	Ecuaciones	R ²	Fisher (<p-valor)	t-Student (<p-valor)			Res.
				b ₀	b ₁	b ₂	
1	$B = -38,954 + 15,820dap$	0,7637	3,78e-13	0,179	3,78e-13	-	R
3	$B = 39,7035 + 1,6723dap$	0,6274	1,891e-09	0,193	1,89e-09	-	R
4	$B = -55,587 + 15,591dap + 3,193h$	0,7649	4,811e-12	0,262	6,33e-12	0,676	R
5	$B = -36,2011 + 14,2997dap - 0,2010dap$	0,7658	4,508e-12	0,222	4,91e-05	0,582	R
6	$B = 4,4495 + 10,9085dap + 0,1111dap^2$	0,7678	3,855e-12	0,9431	0,0958	0,4341	R
7	$B = 75,7516 + 0,2652dap^2 + 0,5101dap$	0,7673	3,987e-12	0,0048	4,32e-05	0,0998	R
8	$B = 105,05681 + 0,22197dap^2 + 0,01798dap^2h$	0,7588	7,658e-12	1,38e-06	0,0443	0,2333	R
9	$B = -13,127 + 10,637dap^{1,1}$	0,7658	3,205e-13	0,62	3,21e-13	-	R
10	$B = 98,05667 + 0,50163dap^{1,9}$	0,7531	8,59e-13	6,19e-06	8,59e-13	-	NR
11	$B = 56,8371 + 2,2696dap^{1,5}$	0,7650	3,411e-13	0,01	3,41e-13	-	NR
12	$B = 69,0324 + 1,5529dap^{1,6}$	0,7629	4,031e-13	0,00153	4,03e-13	-	NR
13	$B = 42,9588 + 3,3241dap^{1,4}$	0,7665	3,046e-13	0,057	3,05e-13	-	R
14	$B = 63,1258 + 1,8769dap^{1,55}$	0,7641	3,684e-13	0,00395	3,68e-13	-	NR
15	$B = 50,1290 + 2,7459dap^{1,45}$	0,7658	3,2e-13	0,0245	3,2e-13	-	NR
16	$B = 112,97901 + 0,23506dap^{(1,45)^2}$	0,7442	1,663e-12	2,68e-07	1,66e-12	-	NR
18	$B = 50,7589 + 2,2633dap^{1,45}h^{0,1}$	0,7686	2,557e-13	0,0217	2,56e-13	-	NR
19	$B = -346,6641 + 2,6804dap^{1,45} + 333,9178h^{0,1}$	0,7691	3,471e-12	0,536	5,86e-12	0,479	R
20	$B = 112,58734 + 0,19476dap^{(1,45)^2}h^{0,1}$	0,7480	1,256e-12	2,49e-07	1,26e-12	-	NR
21	$B = -693,04409 + 0,22572dap^{(1,45)^2} + 674,84288h^{0,1}$	0,7582	7,955e-12	0,222	1,35e-11	0,157	R
23	$B = 50,1707 + 2,6937dap^{1,45}h^{0,01}$	0,7662	3,107e-13	0,0242	3,11e-13	-	NR
24	$B = -3902,7680 + 2,6815dap^{1,45} + 3885,3475h^{0,01}$	0,7690	3,521e-12	0,497	6,05e-12	0,491	R
25	$B = 112,93289 + 0,23070dap^{(1,45)^2}h^{0,01}$	0,7446	1,612e-12	2,66e-07	1,61e-12	-	NR
26	$B = 8,253e + 03 + 2,257e - 01dap^{(1,45)^2} - 8,286e + 03h^{0,01}$	0,7579	8,191e-12	0,168	1,41e-11	0,162	R

leverage y *residuals* vs. *fitted* de dichas ecuaciones. Se aprecia que las tres ecuaciones cumplen con los supuestos de la regresión.

Por lo tanto, la ecuación seleccionada para estimar la biomasa del fuste del “Bosque Simulado y Plantación Forestal” es la ecuación 18 ($B = 50,7589 + 2,2633dap^{1,45}h^{0,1}$) que tiene el menor CME.

Se confirmó que los residuales de la ecuación seleccionada tienen una varianza constante, ya que el *p-value* obtenido de la prueba de Breusch-Pagan fue 0,7656 que es mayor al nivel de significancia 0,05 (Zeileis y Hothorn, 2002).

En la figura 5 se presenta la distribución de la biomasa del fuste calculada y la de la biomasa estimada por la ecuación seleccionada.

4. Discusión

El objetivo del presente artículo fue determinar una ecuación que estime la biomasa de los fustes del “Bosque Simulado y Plantación Forestal”, de la Universidad Nacional Agraria La Molina (UNALM). Para ello, se han seguido los pasos que los textos sobre análisis de regresión lineal

Tabla 7*Ecuaciones aceptadas y sus CME.*

Ecuación	Variables	CME
18	$dap^{1,45}h^{0,1}$	6211,431
23	$dap^{1,45}h^{0,01}$	6276,674
15	$dap^{1,45}$	6286,599
11	$dap^{1,5}$	6308,110
14	$dap^{1,55}$	6334,290
12	$dap^{1,6}$	6364,899
10	$dap^{1,9}$	6628,432
20	$dap^{(1,45)^2}h^{0,1}$	6764,786
25	$dap^{(1,45)^2}h^{0,01}$	6855,834
16	$dap^{(1,45)^2}$	6867,263

indican, como Chatterjee y Hadi (2012).

La especie con mayor número de árboles, antes y después de la eliminación de los *outliers*, es el *Eucalyptus* sp., que representa casi la tercera parte del total de la muestra. También son las mismas especies que mantienen los valores extremos de DAP, de h y de biomasa. Es decir, que la eliminación de los *outliers* no ha modificado la relación directa y lineal entre la biomasa de fuste y el DAP, que es coherente con la teoría ecológica y forestal (Chave et al., 2005; Henry et al., 2011) la cual se confirma con el alto coeficiente de correlación entre ellas ($r = 0,87$).

Caso contrario de la relación biomasa de fuste y altura de fuste, que tiene una distribución dispersa que no sigue una tendencia definida (figura 3), lo que es explicado por el coeficiente de correlación entre ellas, el cual es 0,33. Lo que coincide con Chave et al. (2014), que indica que la altura es una variable complementaria en modelos de estimación de biomasa. Esta característica es más evidente especialmente en plantaciones disetáneas o bosques heterogéneos (Sileshi, 2014; Henry et al., 2011), como es el caso de este estudio.

La débil relación entre la biomasa de fuste y la altura de fuste se refleja en el hecho que las tres ecuaciones que fueron rechazadas por tener un R^2 menor a 51 %, solo tienen como variable independiente a la altura de fuste. Además, dentro de las ecuaciones que no han demostrado que sus coeficientes son diferentes a cero, hay algunas como la ecuación 19, en la que uno de sus términos solo tiene como variable a h elevado a cualquier potencia.

Los resultados deben presentarse de manera objetiva y sin interpretaciones personales en esta sección. Se trata de mostrar los datos y observaciones tal como fueron recopilados.

Otro grupo de ecuaciones, a pesar de que la(s) variable(s) independiente(s) es el DAP (con la que hay una alta correlación con la biomasa), han sido rechazadas por no haber demostrado que alguno de sus coeficientes sea diferente a cero, como por ejemplo las ecuaciones: 1 (DAP), 7 (DAP²), 3 (DAPh) u 8 (DAP²h); hay que mencionar que estas variables son comunes en las ecuaciones de volumen. Es decir, la relación volumen-DAP es diferente a la relación biomasa-DAP, pero en la ecuación debe ser considerado el DAP elevado a potencias diferentes como se aprecia en la tabla 7. También se aprecia que el DAP debe ser elevado a una potencia igual o mayor a 1,45; si alguna ecuación si el DAP interviene elevado a potencias menores, entonces estas ecuaciones serían rechazadas, como en la ecuación 13 (tabla 6).

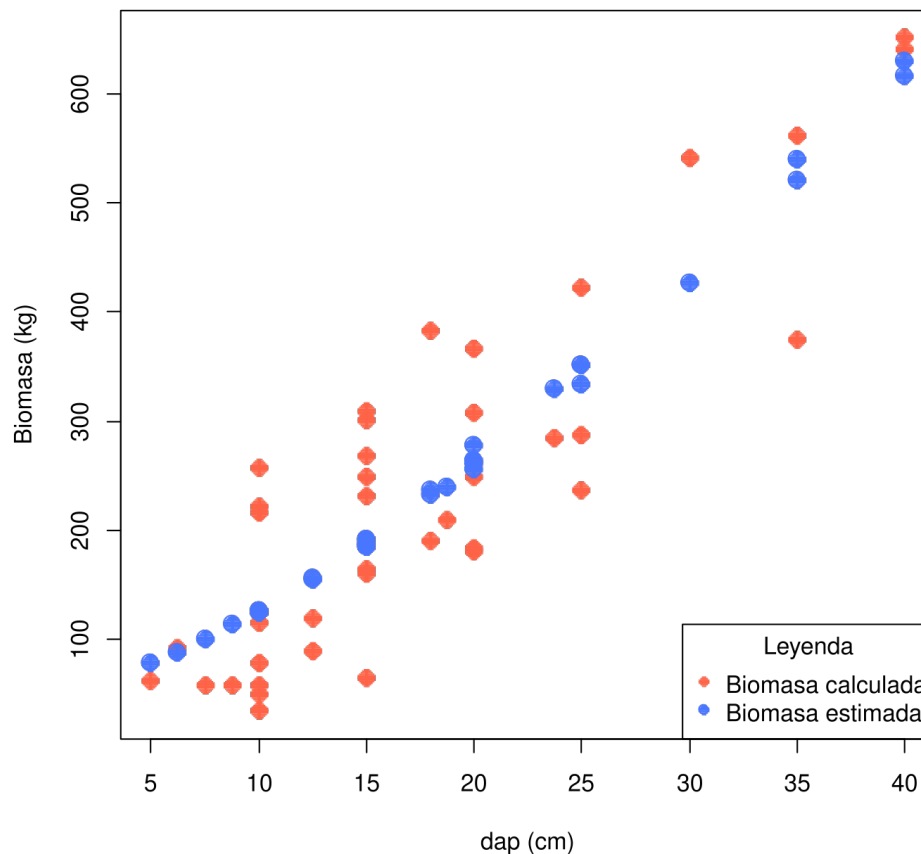
En el caso de la altura de fuste, participa en algunas ecuaciones aceptadas, siempre relacionada con el DAP, pero elevada a exponentes 0,1 y 0,01, como en las ecuaciones 18, 23, 20 y 25 (tabla 7). Se puede afirmar, por tanto, que la altura de fuste es una variable complementaria (Chave et al., 2014).

Del análisis gráfico de los residuales, se puede decir que los residuos de las tres ecuaciones analizadas (18, 23, 15) presentan una distribución normal, ya que están aceptablemente alineados a la línea recta (gráfico Q-Q). No existen datos que sesgan o influyen en la regresión, ya que ninguno está fuera de los límites determinados por la distancia de Cook en el gráfico *residuals* vs. *leverage*, aunque el árbol 36 está en el límite. Del análisis de los gráficos *residual* vs. *fitted* y *scale-location*, no está claro si existe homogeneidad de varianzas (homocedasticidad) en los residuales de estas ecuaciones.

Con el resultado de la prueba de Breusch-Pagan a la ecuación seleccionada (ecuación 18),

Figura 5

Biomasa de fuste, calculada y estimada (ecuación 18).



se puede decir que esta ecuación cumple con los supuestos de la regresión; por lo tanto, se puede aplicar para la estimación de la biomasa del fuste de los árboles del “Bosque Simulado y Plantación Forestal”.

5. Conclusiones

La ecuación $B = 50,7589 + 2,2633dap^{1,45}h^{0,1}$ es la que mejor estima la biomasa de los fustes de los árboles del “Bosque Simulado y Plantación Forestal” y cumple con los supuestos de la regresión.

Contribución de los autores

RG: conceptualización y escritura del documento, recojo y ordenamiento de la información, análisis de datos. VB: conceptualización y escritura del documento. JO: escritura y correcciones del documento.

Conflicto de intereses

Los autores no incurren en conflictos de intereses.

Financiamiento

El presente trabajo no tuvo financiamiento.

Referencias

- Acosta-Mireles, M., Vargas-Hernández, J., Velázquez-Martínez, A., & Etchevers Barra, J. D. (2002). Estimación de la biomasa aérea mediante el uso de relaciones alométricas en seis especies arbóreas en Oaxaca, México. *Agrociencia*, 36(6), 725-736. <https://www.agrocienciapolpos.org/index.php/agrociencia/article/view/225>
- Cardona Madariaga, D. F., González Rodríguez, J. L., Rivera Lozano, M., & Cárdenas Vallejo, E. (2013). *Inferencia estadística: Módulo de regresión lineal simple* (Documentos de Investigación No. 147). Escuela de Administración, Universidad del Rosario. <https://www.researchgate.net/publication/298431518>
- Chatterjee, S., & Hadi, A. S. (2012). *Regression analysis by example* (5.ª ed.). John Wiley & Sons. <https://sadbhavanapublications.org/research-enrichment-material/2-Statistical-Books/Regression-Analysis-by-Example.pdf>
- Chave, J. (2005). *Medición de densidad de madera en árboles tropicales*. Proyecto PANAMAZONIA. https://rainfor.org/wpcontent/uploads/sites/129/2022/07/wood_density_spanish1.pdf
- Chave, J., Andalo, C., Brown, S., Cairns, M. A., Chambers, J. Q., Eamus, D., Fölster, H., Fromard, F., Higuchi, N., Kira, T., Lescure, J.-P., Nelson, B. W., Ogawa, H., Puig, H., Riéra, B., & Yamakura, T. (2005). Tree allometry and improved estimation of carbon stocks and balance in tropical forests. *Oecologia*, 145(1), 87-99. <https://doi.org/10.1007/s00442-005-0100-x>
- Chave, J., Réjou-Méchain, M., Búrquez, A., Chidumayo, E., Colgan, M. S., Delitti, W. B. C., Duque, A., Eid, T., Fearnside, P. M., Goodman, R. C., Henry, M., Martínez-Yrizar, A., Mugasha, W. A., Muller-Landau, H. C., Mencuccini, M., Nelson, B. W., Ngomanda, A., Nogueira, E. M., Ortiz-Malavassi, E., ... Vieilledent, G. (2014). Improved allometric models to estimate the aboveground biomass of tropical trees. *Global Change Biology*, 20(10), 3177-3190. <https://doi.org/10.1111/gcb.12629>
- Chirinos, A. (2005). *Evaluación de diferentes sistemas de fertilización orgánica mineral en el cultivo de algodón Tanguis var* [Tesis de ingeniería, Universidad Nacional Agraria La Molina].
- Food and Agriculture Organization of the United Nations [FAO]. (1997). *Estimating biomass and biomass change of tropical forests: A primer* (FAO Forestry Paper No. 134). Food and Agriculture Organization of the United Nations. <https://www.fao.org/4/W4095E/W4095E00.htm>
- Food and Agriculture Organization of the United Nations [FAO]. (2019). *Informe sobre la factibilidad del aprovechamiento de la biomasa forestal de campo* (Colección Informes Técnicos N.º 7). Food and Agriculture Organization of the United Nations. <https://openknowledge.fao.org/handle/20.500.14283/ca7225es>
- Food and Agriculture Organization of the United Nations [FAO]. (2020). *Evaluación de los recursos forestales mundiales 2020: Informe principal*. Food and Agriculture Organization of the United Nations. <https://doi.org/10.4060/ca9825es>
- Figueroa, A. (2007). *Variación de densidad básica en la madera de Pinus taeda L.* [Tesis de pregrado, Universidad Austral de Chile]. Cybertesis UACH. <http://cybertesis.uach.cl/tesis/uach/2007/fiff475v/doc/fiff475v.pdf>
- Fonseca-González, W. (2017). Revisión de métodos para el monitoreo de biomasa y carbono vegetal en ecosistemas forestales tropicales. *Revista de Ciencias Ambientales*, 51(2), 91-109. <https://www.revistas.una.ac.cr/index.php/ambientales/article/view/9481>
- Fournier, L. A. (2003). *Recursos naturales* (2.ª ed.). Editorial Universidad Estatal a Distancia (EUNED).
- Guillén, R. (2014). *Estimación del volumen de la caoba (Swietenia macrophylla King) usando ecuaciones de ahusamiento para el departamento de Madre de Dios* [Tesis de ingeniería forestal, Universidad Nacional Agraria La Molina].

- Henry, M., Picard, N., & Trotta, C. (2011). Estimating tree biomass of sub-Saharan African forests: A review of available allometric equations. *Silva Fennica*, 45(3B), 477-569. <https://doi.org/10.14214/sf.38>
- Intergovernmental Panel on Climate Change [IPCC]. (2006). *Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories*. <https://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2006gl/index.html>
- León, W. J. (2010). Anatomía y densidad o peso específico de la madera. *Revista Forestal Venezolana*, 54(1), 67-76. <https://www.researchgate.net/publication/260002299>
- MacDicken, K. G. (1997). *A guide to monitoring carbon storage in forestry and agroforestry projects*. Winrock International Institute for Agricultural Development. <https://www.researchgate.net/publication/237434580>
- Ministerio del Ambiente [MINAM]. (2015). *Guía de inventario de la flora y vegetación*. Dirección General de Evaluación, Valoración y Financiamiento del Patrimonio Natural. <https://www.minam.gob.pe/patrimonio-natural/wp-content/uploads/sites/6/2013/10/GU>
- Monteoliva, S., Barotto, A., & Fernández, M. E. (2015). Anatomía y densidad de la madera en Eucalyptus: Variación interespecífica e implicancia en la resistencia al estrés abiótico. *Revista de la Facultad de Agronomía*, 114(2), 209-217.
- Montgomery, D. C., Peck, E. A., & Vining, G. G. (2012). *Introduction to linear regression analysis* (5.^a ed.). John Wiley & Sons.
- Nogués, S. F., García-Galindo, D., & Rezeau, A. (Coords.). (2010). *Energía de la biomasa*. Pressas Universitarias de Zaragoza. <https://dialnet.unirioja.es/servlet/libro?codigo=972038>
- Núñez, C. E. (2007). Relaciones de conversión entre densidad básica y densidad seca de madera. *Revista de Ciencia y Tecnología*, 9(1), 44-50. <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=382679021006>
- Palma, R. P. (2022). Análisis crítico del coeficiente de determinación (R^2), como indicador de la calidad de modelos lineales y no lineales. *Revista Matemática: Teoría y Aplicaciones*, 20(2), 1-15. <https://www.revistas.espol.edu.ec/index.php/matematica/article/view/1037>
- Picard, N., Saint-André, L., & 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*. Food and Agriculture Organization of the United Nations & Centre de coopération internationale en recherche agronomique pour le développement. <https://www.fao.org/4/i3058s/i3058s.pdf>
- Rivera Paucar, M. N. (2018). *Determinación de ecuaciones para estimar biomasa en la parte leñosa aérea de Polylepis flavipila "quinual" en el bosque Japoní-Huarochirí, Lima* [Tesis de pregrado, Universidad Nacional Agraria La Molina].
- Sileshi, G. W. (2014). A critical review of forest biomass estimation models, common mistakes and corrective measures. *Forest Ecology and Management*, 329, 237-254. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2014.06.026>
- Simbaña, N. (2011). *Estimación de la captura de carbono en plantaciones de Eucalyptus globulus Labill.* [Tesis de maestría, Universidad Nacional Agraria La Molina].
- UEIA. (2014). *Ficus benjamina*. Catálogo virtual de flora del Valle de Aburrá. <https://catalogoflora-valleaburra.eia.edu.co/species/70>
- UEIA. (2014). *Grevillea robusta*. Catálogo virtual de flora del Valle de Aburrá. <https://catalogoflora-valleaburra.eia.edu.co/species/89>
- UEIA. (2014). *Koelreutheria paniculata*. Catálogo virtual de flora del Valle de Aburrá. <https://catalogofloravalleaburra.eia.edu.co/species/37>

- UEIA. (2014). *Spathodea campanulata*. Catálogo virtual de flora del Valle de Aburrá. <https://catalogofloravalleaburra.eia.edu.co/species/11>
- Valverde, J. C., Barrena, V. M., & Guillén, R. (2019). Estimación de la biomasa aérea de *Eucalyptus globulus Labill.* plantado en cercos vivos, distrito Huertas, Junín (Perú). *Revista Forestal del Perú*, 34(1), 52-65. <https://doi.org/10.21704/rfp.v34i1.1285>
- Zeileis, A., & Hothorn, T. (2002). Diagnostic checking in regression relationships. *R News*, 2(3), 7-10. <https://journal.r-project.org/articles/RN-2002-018/RN-2002-018.pdf>

Anexo

Datos de los 39 árboles que se usaron para obtener las ecuaciones de biomasa

N.º	Especie	dap (cm)	h (m)	Biomasa (kg)
1	<i>Spathodea campanulata</i>	5,00	5,0	62,18
2	<i>Koelreuteria paniculata</i>	6,25	5,0	92,10
3	<i>Spathodea campanulata</i>	7,50	5,5	58,25
4	<i>Melia dubia</i>	8,75	6,0	58,23
5	<i>Eucalyptus</i> sp.	10,00	5,0	34,41
6	<i>Grevillea robusta</i>	10,00	5,0	58,84
7	<i>Spathodea campanulata</i>	10,00	5,0	116,21
8	<i>Koelreuteria paniculata</i>	10,00	5,0	216,77
9	<i>Spathodea campanulata</i>	10,00	5,0	221,61
10	<i>Spathodea campanulata</i>	10,00	5,5	78,30
11	<i>Spathodea campanulata</i>	10,00	5,5	257,45
12	<i>Koelreuteria paniculata</i>	10,00	6,0	50,06
13	<i>Eucalyptus</i> sp.	12,50	5,5	119,57
14	<i>Melia dubia</i>	12,50	5,8	89,05
15	<i>Grevillea robusta</i>	15,00	5,0	268,43
16	<i>Koelreuteria paniculata</i>	15,00	5,0	308,74
17	<i>Casuarina cunninghamiana</i>	15,00	5,2	160,73
18	<i>Ficus benjamina</i>	15,00	6,0	65,14
19	<i>Koelreuteria paniculata</i>	15,00	6,0	249,13
20	<i>Eucalyptus</i> sp.	15,00	7,0	164,00
21	<i>Ficus benjamina</i>	15,00	8,0	231,50
22	<i>Casuarina cunninghamiana</i>	15,00	8,0	301,25
23	<i>Ficus benjamina</i>	18,00	7,0	382,51
24	<i>Eucalyptus</i> sp.	18,00	9,0	190,71
25	<i>Eucalyptus</i> sp.	18,75	5,5	210,01
26	<i>Casuarina cunninghamiana</i>	20,00	5,0	307,84
27	<i>Enterolobium contortisiliquum</i>	20,00	6,5	183,66
28	<i>Eucalyptus</i> sp.	20,00	7,3	180,76
29	<i>Enterolobium contortisiliquum</i>	20,00	7,5	248,56
30	<i>Grevillea robusta</i>	20,00	14,0	366,23
31	<i>Eucalyptus</i> sp.	23,75	9,0	284,44
32	<i>Eucalyptus</i> sp.	25,00	5,0	287,42
33	<i>Melia dubia</i>	25,00	9,0	236,97
34	<i>Enterolobium contortisiliquum</i>	25,00	9,0	422,85
35	<i>Eucalyptus</i> sp.	30,00	6,0	541,55
36	<i>Eucalyptus</i> sp.	35,00	6,0	374,65
37	<i>Eucalyptus</i> sp.	35,00	9,0	561,19
38	<i>Casuarina cunninghamiana</i>	40,00	5,5	641,09
39	<i>Eucalyptus</i> sp.	40,00	7,0	651,05