

Manejo de sistemas productivos

Artículo de investigación científica y tecnológica

Modelos de regresión simple para estimar el área foliar en Melina *Gmelina arborea* Roxb. ex Sim. en el sistema silvopastoril SINPAR

Simple Regression Models to Estimate the Leaf Area in Melina *Gmelina arborea* Roxb. ex Sim. Under the SINPAR Silvopastoral System

 Carlos Augusto Vásquez Rojas ¹  Javier Sarmiento Estupiñán ¹
 Jorge Humberto Contreras Castro ^{1*}  Emiro Rafael Canchila Asencio ¹

¹ Instituto Universitario de la Paz, Barrancabermeja, Colombia.

*Autor de correspondencia: Jorge Humberto Contreras Castro. Instituto Universitario de la Paz, Barrancabermeja, Colombia.
jorge.contreras@unipaz.edu.co

Recibido: 14 de julio de 2021
Aprobado: 28 de febrero de 2023
Publicado: 17 de julio de 2023

Editor temático: Jhon Jairo Zuluaga, (Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria [AGROSAVIA]), Ibagué, Colombia.

Para citar este artículo: Vásquez Rojas, C. A., Sarmiento Estupiñán, J., Contreras Castro, J. H., & Canchila Asencio, E. R. (2023). Modelos de regresión simple para estimar el área foliar en Melina *Gmelina arborea* Roxb. ex Sim. en el sistema silvopastoril Sinpar. *Ciencia y Tecnología Agropecuaria*, 24(2), e2629. https://doi.org/10.21930/rcta.vol24_num2_art:2629

Resumen: La melina *Gmelina arborea* Roxb. ex Sim. es considerada una especie potencial para ser utilizada en programas de restauración y sistemas silvopastoriles por su caracterización bromatológica, producción de forraje verde y propiedades maderables, sin embargo, se requiere de establecer variables relacionadas con la producción de biomasa foliar, como el área foliar, por ser un elemento dinámico en los procesos fisiológicos vegetales. Por lo anterior, el presente trabajo tuvo como objetivo definir un modelo de regresión simple para estimar el área foliar en esta especie, donde se realizó un estudio observacional transversal correlacional basado en un muestreo aleatorio simple, con un tamaño de muestra de 18 árboles, corte de 93 ramas y colecta de 3368 hojas y en el laboratorio se midió el largo y el ancho máximo foliar para establecer el área foliar. Sobre el material se aplicó estadística descriptiva desde medidas y gráficas representativas, como también estadística inferencial soportada en la estimación y la selección del modelo de regresión simple linealizado (lineal, cuadrático, cúbico) y no linealizado (logarítmico, potencial, exponencial). Para la selección del modelo propuesto, se establecieron como criterios de bondad de ajuste: coeficiente de determinación (R^2), error cuadrático medio (ECM), p-valor de coeficientes $[(p)\beta x]$, análisis de residuos (normalidad, homocedasticidad, dispersión de residuos vs. valores ajustados) y Akaike (AIC) y se concluye que la estimación del área foliar en melina está relacionada con las variables largo y ancho foliar desde los modelos de regresión exponencial $AF = 28,0105 * e^{(0,1192 * LF)}$ y $AF = 35,2523 * e^{(0,1421 * AnF)}$. Además, estos modelos tienen un alto grado de confiabilidad para su uso en predicciones del área foliar en esta especie.

Palabras clave: Agroforestería, alometría, dendrometría, fotosíntesis, análisis de la regresión.

Abstract: Melina *Gmelina arborea* Roxb. ex Sim. is considered a potential species to be used in restoration programs and silvopastoral systems for its bromatological characterization, production of green forage and timber properties. However, it is required to establish variables related to the production of foliar biomass, such as the leaf area since it is a dynamic element in plant physiological processes. Therefore, this study aimed to define a simple regression model that estimated the leaf area in this species. A cross-sectional observational correlational study was conducted based on simple random sampling, sample size of 18 trees, cutting of 93 branches and collection of 3368 leaves. In the laboratory, the maximum leaf length and width were measured to establish the leaf area. Descriptive statistics were applied from representative measurements and graphs, as well as inferential statistics supported in the estimation and selection of the simple linearized regression model (linear, quadratic, cubic) and nonlinearized (logarithmic, potential, exponential). For the selection of the proposed model, goodness-of-fit criteria were established: coefficient of determination R^2 , mean square error ECM, p-value of coefficients $[(p)\beta x]$, normality and homoscedasticity of errors, dispersion of residuals vs adjusted and Akaike AIC. It is concluded that the estimation of the leaf area in melina is related to the variable leaf length and width from the exponential regression models $AF=28.0105 * e^{(0.1192 * LF)}$ and $AF=35.2523 * e^{(0.1421 * AnF)}$. In addition, these models have a high degree of reliability for use in predictions of the leaf area in this species.

Keywords: Agroforestry, allometry, dendrometry, photosynthesis, regression analysis.



Introducción

Aparicio y Abril (2016) establecieron que la melina *Gmelina arborea* Roxb. ex Sim. (Lamiaceae) tiene la capacidad de producir 61,30 t/ha/año de forraje verde y 16,57 t/ha/año de materia seca, donde las hojas presentan un contenido de proteína cruda (PC) del 17,9 %, digestibilidad *in vitro* de la materia seca (Divms) del 43,8 %, fibra en detergente neutro (FDN) del 35,5 % y fibra en detergente ácido (FDA) del 31,3 %, lo que llevó a la conclusión de que la incorporación de *G. arborea* en bancos forrajeros evidenció una mayor producción de forraje verde al compararse con otras plantas que tienen el mismo enfoque. Asimismo, Bueno et al. (2015) determinaron el rasgo nutricional para el forraje de melina *Gmelina arborea* en cortes de 39, 60, 72 y 87 días, correspondiendo los niveles de PC a 7 % y 16 %, materia seca (MS) entre 24 % y 35 %, FDN entre 43 % y 58 %, FDA entre 36 % y 42 % y degradabilidad de la materia seca (DEG) entre 66 % y 77 %.

La melina es una especie arbórea forrajera de origen asiático y de gran potencial forestal por su virtud de rápido crecimiento, lo que le permite ser utilizada como cerca viva, cortina rompevientos, linderos maderables y de forma ornamental (Castañeda-Álvarez et al., 2017), aunque también, por su uso maderable, es utilizada como materia prima en la ebanistería, la carpintería, la producción de instrumentos musicales y embalajes, entre otros (Vanoye-Eligio et al., 2020). Como recurso no maderable, sus usos están vinculados a la actividad melífera, la medicina hindú, el cultivo de gusanos de seda y el uso de hojas y frutos en la alimentación de ganado (Directorio Forestal Maderero, 2018).

La melina, que parece una planta más exigente en requerimientos de suelo, ha mostrado un gran potencial de desarrollo y cobra cada vez más importancia al ser considerada entre las tres primeras especies recomendadas para la implementación de reforestación por las corporaciones de investigación: Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria (Corpoica), Centro Internacional de Agricultura Tropical (CIAT) y Centro para la Investigación en Sistemas Sostenibles de Producción Agropecuaria (Cipav), incluyendo los sistemas silvopastoriles, en el entendido de que estos contribuyen en un menor grado en la compactación del suelo y, por ende, mejoran las condiciones de fertilidad del suelo (Useche & Azuero, 2013), siendo conveniente adelantar estudios a través de modelos matemáticos que tengan la capacidad de estimar el área foliar (AF) de esta especie a través de métodos no destructivos.

Para la determinación del AF se deben tener varios aspectos que permiten el logro del objetivo y el nivel de precisión deseado, tales como: el diseño del muestreo, el tamaño de la muestra, la morfología de la hoja, la relación de la planimetría y las ecuaciones de regresión soportadas en los supuestos (normalidad y homocedasticidad en residuos, no colinealidad, no autocorrelación), validando el modelo seleccionado que explica y pronostica la respuesta del AF (Pentón et al., 2006).

Es necesario tener en cuenta que el índice de área foliar (IAF), al ser la parte aérea que capta la radiación solar, condiciona los procesos vitales como la fotosíntesis, la respiración y la productividad, por lo que proporciona información acerca de la cantidad de superficie fotosintética, la cantidad de oxígeno molecular liberado y la producción de forraje por la

construcción de los tejidos vegetales como subproductos de la fotosíntesis en el ecosistema o área de estudio (Valcárcel et al., 2008; Ugarte, 2012; Nafarrate Hecht, 2017).

Al estimar el AF de árboles del bosque seco tropical mediante un modelo matemático, Alvarez et al. (2012) encontraron la relación entre el AF y las dimensiones largo (L) y ancho (A), como variables predictoras, y se analizaron mediante regresión lineal con las variables transformadas logarítmicamente para seleccionar el modelo de mejor ajuste estadístico. En las 13 especies de árboles, se encontró alta correlación ($r = 0,983-0,999$), lo que indica que existe una asociación del 98,3 % al 99,9 % entre el \ln AF y el $\ln L \cdot A$, como también un alto coeficiente de determinación (R^2 ajustado = 0,966-0,998), lo que señala que el $\ln L \cdot A$ explica en un 96,6 %-99,8 % la variabilidad del \ln AF. Asimismo, los datos de las 13 especies fueron agrupados en siete categorías (todas, hojas simples, hojas compuestas, $AF < 50 \text{ cm}^2$, $AF > 50 \text{ cm}^2$, $AF < 100 \text{ cm}^2$ y $AF > 100 \text{ cm}^2$), estableciéndose una alta correlación ($r = 0,994-0,998$) y también un alto coeficiente de determinación (R^2 ajustado = 0,990-0,997); sin embargo, aunque en todos los modelos de regresión los valores de las pendientes (α) fueron altamente significativos ($p < 0,001$; $p < 0,01$; $p < 0,05$), en algunas especies (*A. farnesiana*, *H. brasiletto*, *M. bijugatus*) y categorías de tamaño del AF ($AF > 100 \text{ cm}^2$ y $AF > 50 \text{ cm}^2$), los interceptos (c) no aportaron significativamente a los modelos ($p > 0,05$), por lo que se concluye que como modelo lineal adecuado para realizar una estimación del AF de cualquiera de las especies de bosque seco tropical se debe establecer: $\ln(AF) = -1,80 + 0,967 \ln(L \cdot A)$ ($R^2 = 99,5 \%$, $p < 0,001$).

De acuerdo con lo anterior, el presente trabajo tuvo como finalidad establecer que existe una relación estadística entre las variables L y A, a través de un modelo de regresión que permite estimar el AF en *G. arborea* del Sistema Integral de Nutrición, Pastoreo Agroecológico y Reproducción (Sinpar) en Barrancabermeja, Santander.

Materiales y métodos

El trabajo se realizó en el proyecto Sinpar, localizado en el Centro de Investigaciones Santa Lucía, propiedad del Instituto Universitario de la Paz, ubicado en la vereda El Zarzal del municipio de Barrancabermeja, Santander, que se encuentra en las coordenadas geográficas $07^\circ 3' 55'' \text{ N}$, $73^\circ 52' 50'' \text{ O}$ y a una altitud de 81 m s.n.m. (Municipios de Colombia, 2022). Los parámetros meteorológicos medidos fueron: precipitación anual de 2675 mm, temperatura entre 27° C y 36° C , humedad relativa entre 76 % y 83 %, evaporación de 4-5 mm/día y brillo solar de 5-8 h/día (Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales, s. f.). Este proyecto hizo parte del macroproyecto “Diseño de sistemas productivos sostenibles como estrategia de conservación de paisajes rurales degradados, Barrancabermeja, Santander”, financiado por el Departamento Nacional de Planeación (DNP).

Este estudio fue de tipo observacional, transversal y correlacional en un sistema silvopastoril instaurado, tomándose la información por árbol en un solo momento y corroborándose el comportamiento de modelos matemáticos del AF desde criterios de bondad de ajuste. La *G. arborea* está dispuesta perimetralmente en el sistema agroforestal de 5 ha, dividido en 10 radiales

(0,5 ha cada uno) (figura 1), siendo seleccionado este sistema para el estudio por la altura de follaje para consumo animal ($\leq 1,72$ m) y la supervivencia (89 %).



Figura 1. Disposición de los 10 radiales en el Sinpar

Fuente: Vásquez-Rojas et al., 2021

La población (N) de *G. arborea* corresponde a 77 árboles, distribuidos en subpoblaciones (N_{irx}) en los 10 radiales. La toma de información se sustentó en el muestreo aleatorio simple, donde cada árbol tuvo la misma probabilidad de ser seleccionado (López, 2004).

El tamaño de la muestra aleatoria se determinó al tener en cuenta la variabilidad de los datos del último muestreo para las variables: altura total (AT), diámetro del tallo a base (DAB) y diámetro del tallo a pecho (DAP), acorde con lo señalado por Segura y Andrade (2008), y se eligió la variable de menor variabilidad a partir del coeficiente de variación (CV), lo que corresponde a la AT de la especie (tabla 1). Posteriormente, se definió una muestra piloto de $n = 30$ para inventarios forestales, consignándose la información correspondiente a las medidas de tendencia central (media) y de dispersión (desviación estándar y CV) (tabla 2).

Tabla 1. Medidas de tendencia central y de dispersión para las variables dendrométricas AT, DAB y DAP provenientes de los datos del último muestreo de *G. arborea*

Datos estadísticos	Altura total (cm)	DAB (cm)	DAP (cm)
n	52	52	52
Media	369,19	10,90	6,28
Desviación estándar	117,10	4,39	3,37
Coefficiente de variación	31,7 %	40,3 %	53,7 %

Fuente: Elaboración propia

Tabla 2. Medidas de tendencia central y de dispersión de la muestra piloto para la variable altura total de *G. arborea*

Datos estadísticos	Altura total (cm)
N	30
Media	427,0
Desviación estándar	102,7
Coefficiente de variación	24,1 %

Fuente: Elaboración propia

El CV % junto con el error máximo admisible de muestreo (ϵ %), correspondiente al 10 % en inventarios forestales (Da Cunha & Guimaraes, 2008), permitieron establecer el tamaño de la muestra (n_i) a partir de la ecuación formulada por Yepes et al. (2011), cuando el inventario forestal se va a desarrollar sobre un mismo tipo de cobertura con base en un muestreo aleatorio simple (MAS), relacionándola en este caso con el cálculo del número de árboles para poblaciones finitas de la especie forrajera en estudio (ecuación 1) (tabla 3).

$$n_i = \frac{CV^2 \times t^2}{e^2 + \frac{CV^2 \times t^2}{N}} \quad (\text{ecuación 1}) \quad (\text{Yepes et al., 2011})$$

Donde: n = tamaño de la muestra en número de unidades por especie forrajera

t = valor de $t_{\alpha/2}$, gl especie

CV % = coeficiente de variación de la variable AT en la muestra piloto por especie forrajera

e = error máximo admisible (10 %)

Tabla 3. Información de datos estadísticos para el cálculo del tamaño de muestra de *G. arborea*

Datos estadísticos	Altura total (cm)
N	77
$t_{0,025, 76}$	2,045
\bar{x}	427,0
CV (%)	24,1 %
$\epsilon\%$	10
n_i	18
% de población	23,4

Fuente: Elaboración propia

Posteriormente, se determinó el tamaño de la muestra por radial n_{irx} ($n_{ir1}, n_{ir2} \dots n_{ir10}$) desde su proporcionalidad a partir de la ecuación 2, consignándose dicha información en la tabla 4.

$$n_{irx} = n_i \times P_{irx} \text{ (ecuación 2)}$$

Donde: n_{irx} = tamaño de la muestra en número de unidades por especie forrajera en cada radial
 n_i = tamaño de la muestra en número de unidades por especie forrajera
 P_{irx} = proporción por radial, es decir, tamaño del radial / tamaño de la población

Las actividades en campo consistieron en la obtención de hojas, llevándose a cabo un muestreo destructivo por árbol de melina, consistiendo esto en el corte de las ramas y la recolección de hojas/ramas por debajo de la altura de consumo del animal ($\leq 1,72$ m), podando así 93 ramas y recolectando 3368 hojas en total, es decir, 36,2 hojas/rama/árbol en promedio.

Las actividades de laboratorio estribaron en la medición de las variables foliares de largo máximo (sin incluir el peciolo) (cm) y ancho máximo (cm) para establecer el AF (cm²) de acuerdo con lo señalado por Cabezas-Gutiérrez et al. (2009), Cardona et al. (2009), Hernández (2020), Pentón et al. (2006) y Ruiz-Espinoza et al. (2007).

El análisis estadístico se realizó desde la información de largo, ancho y AF por rama, fundamentado en estadística descriptiva e inferencial, donde la estadística descriptiva se abordó desde medidas descriptivas de tendencia central (media, mediana), posición (mínimo, máximo), dispersión (varianza, desviación estándar, CV, error estándar (EE)), normalidad (prueba de Shapiro-Wilk), gráficas descriptivas (diagrama de caja y probabilidad normal) y asociación (correlación r).

Tabla 4. Tamaño de la muestra por radial n_{irx} y total de *G. arborea*

N (población)	77									
N_{irx} (radial)	N _{ir1}	N _{ir2}	N _{ir3}	N _{ir4}	N _{ir5}	N _{ir6}	N _{ir7}	N _{ir8}	N _{ir9}	N _{ir10}
	11	7	8	10	12	10	4	6	4	5
P_{irx} (proporción)	0,1428	0,0909	0,1038	0,1298	0,1558	0,1298	0,0519	0,0779	0,0519	0,0649
n_{irx} (muestra radial)	n _{ir1}	n _{ir2}	n _{ir3}	n _{ir4}	n _{ir5}	n _{ir6}	n _{ir7}	n _{ir8}	n _{ir9}	n _{ir10}
	3	2	2	2	3	2	1	1	1	1
N_i (muestra)	18									

Fuente: Elaboración propia

La estadística inferencial se soportó en la estimación y la selección del modelo de regresión simple linealizado (lineal $Y = \beta_0 + \beta_1X$, cuadrático $Y = \beta_0 + \beta_1X + \beta_2X^2$, cúbico $Y = \beta_0 + \beta_1X + \beta_2X^2 + \beta_3X^3$) y no linealizado (logarítmico $Y = \beta_0 + \beta_1\ln X$, potencial $Y = \beta_0X^{\beta_1}$, exponencial $Y = \beta_0e^{\beta_1X}$), donde Y es la variable que define el área foliar, acorde con lo señalado por Pentón et al. (2006) y Vallejos et al. (2019).

Para la selección del modelo propuesto, se establecieron como criterios de bondad de ajuste: coeficiente de determinación (R^2), error cuadrático medio (ECM), p-valor de coeficientes [(p) β x], análisis de residuos (normalidad prueba de Shapiro-Wilk, homocedasticidad prueba de Breusch-Pagan, dispersión de residuos vs. valores ajustados y criterio de información de Akaike (AIC)), en concordancia con lo planteado por Cardona et al. (2009), Martínez-López y Acosta-Ramos (2014) y Vallejos et al. (2019). Los datos fueron procesados con los *softwares* STATA MP 14.0 y RStudio.

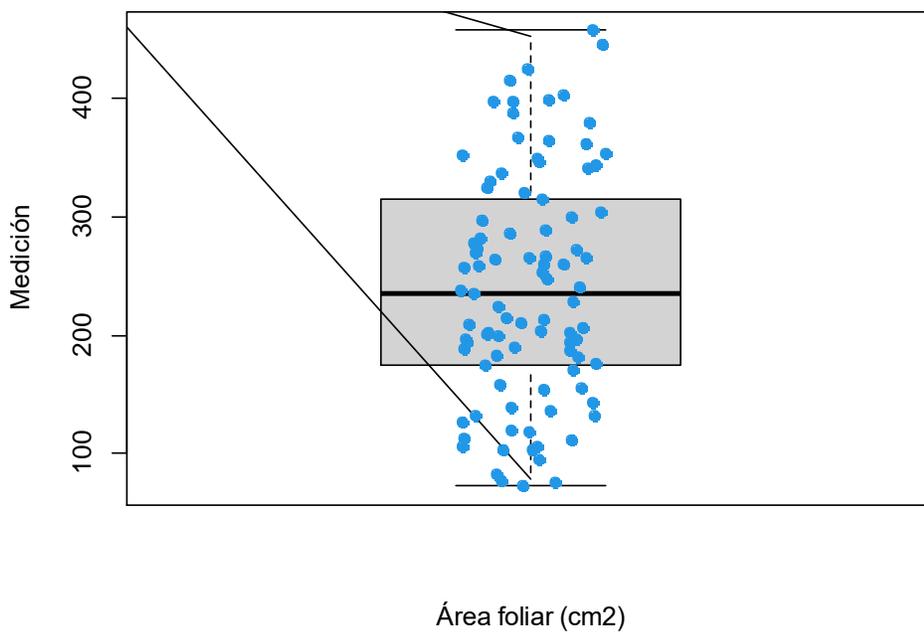
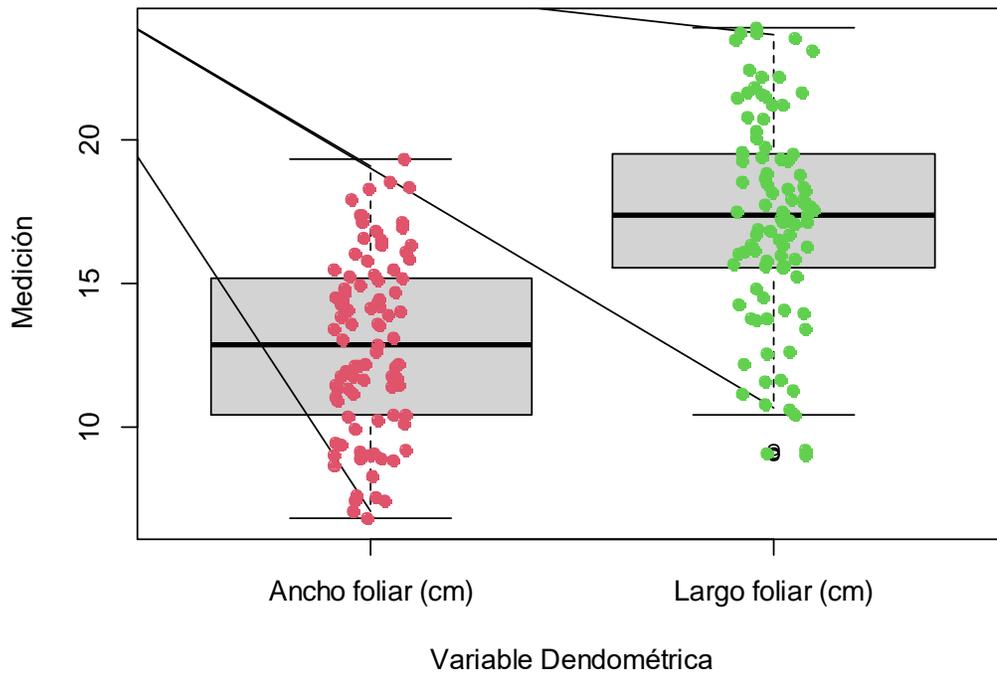
Resultados y discusión

La estadística descriptiva estableció que la distribución de los datos de largo, ancho y AF presentaron una distribución normal soportada en la prueba de Shapiro-Wilk (tabla 5 y figuras 2) y el gráfico de probabilidad normal (figuras 3).

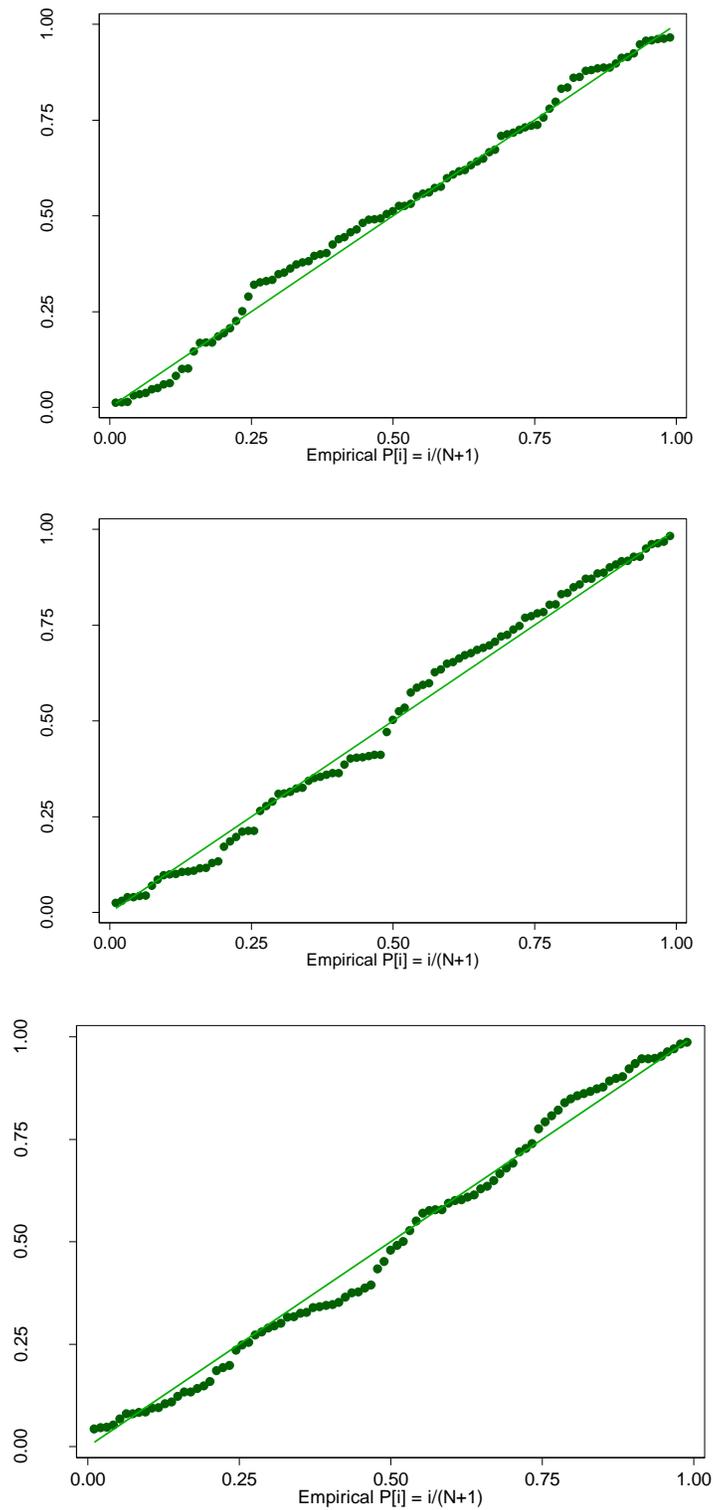
Tabla 5. Datos estadísticos descriptivos del largo, ancho y AF de *G. arborea*

Variable	n	Media	DE	Var(n-1)	EE	CV	Mín.	Máx.	Mediana	Normalidad
Largo	93	17,26	3,66	13,37	0,38	21,19	8,99	23,91	17,36	0,1151
Ancho	93	12,86	3,09	9,53	0,32	24,02	6,77	19,33	12,88	0,1600
AF	93	240,49	97,22	9452,62	10,08	40,43	72,61	456,63	235,23	0,0593

Fuente: Elaboración propia



Figuras 2. Diagramas de caja para las variables largo (cm), ancho (cm) y AF (cm²) de *G. arborea*
Fuente: Elaboración propia



Figuras 3. Gráficos de probabilidad normal para las variables largo, ancho y AF de *G. arborea*
 Fuente: Elaboración propia

Las variables de largo y ancho foliar presentaron una correlación con la variable AF correspondiente a 0,954 y 0,979 (figura 4), respectivamente, lo que indica que el grado de asociación de cada variable con el AF es equivalente al 95,4 % y el 97,9 %, respectivamente (Szretter, 2013).

Las ecuaciones de regresión para el área foliar estimada (AFE), entre las variables área foliar real (AFR) vs. largo foliar (LF), soportadas en los criterios de bondad de ajuste, corresponden a los modelos lineal, cúbico y exponencial (ecuaciones 3, 6 y 8), descartándose los modelos logarítmico, cuadrático y potencial (ecuaciones 4, 5 y 7) (tabla 6). Las ecuaciones de regresión para la AFE entre las variables AFR vs. ancho foliar (AnF), basadas en los criterios de bondad de ajuste, competen a los modelos lineal, potencial y exponencial (ecuaciones 9, 13 y 14), excluyéndose los modelos logarítmico, cuadrático y cúbico (ecuaciones 10, 11 y 12) (tabla 7).

Así, los modelos exponenciales presentan una mejor estimación del AFE, tanto en LF ($AFE = 28,0105e^{0,1192LF}$) como en AnF ($AFE = 35,2523e^{0,1421AnF}$), acorde con los criterios de bondad de ajuste, tales como el R^2 , al explicar la proporción de la variación total en la variable dependiente Y (AF) por las variaciones en la variable (única) explicativa X (largo o ancho foliar) (Gujarati & Porter, 2010), es decir, la variabilidad del AF estimada AFE es explicada en un 92,9 % y 94,1 % por las variaciones en el LF y el AnF, respectivamente (figuras 5).

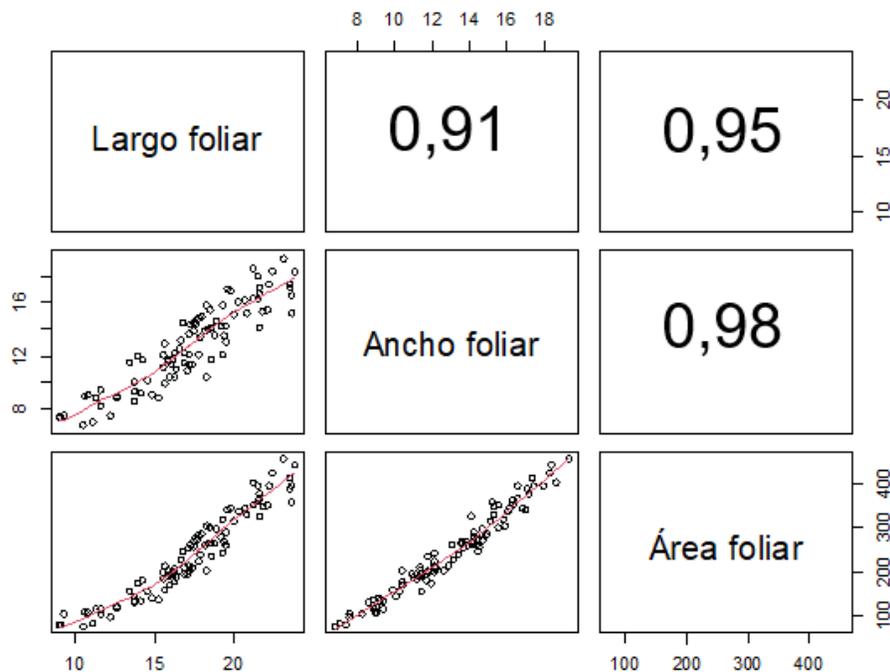


Figura 4. Correlación entre las variables largo, ancho y área foliar de *G. arborea*
Fuente: Elaboración propia

De manera paralela, es necesario comparar estos modelos alternativos para la misma variable endógena, para lo cual se utiliza el criterio de información de Akaike (AIC), ya que elige el modelo que tenga menor valor de criterio y, de esta forma, prima la capacidad predictiva del modelo (Jeréz, 2017), por lo que el AIC corrobora la escogencia de los modelos exponenciales como mejores predictores del área foliar respecto al largo y el ancho foliar, al estos presentar los valores más bajos de AIC (-126 y -144) respecto a los modelos lineal (893) y cúbico (868) en la relación AF vs. LF, como también en los modelos lineal (822) y potencial (-194) en la relación AF vs. AnF.

Además, el ECM en los dos modelos exponenciales es muy bajo, lo que hace más precisa la estimación en términos de la dispersión de la distribución de la variable dependiente (AF) alrededor de su verdadero valor (Gujarati & Porter, 2010).

Igualmente, el p-valor ($p \leq 0,05$) permite establecer que los coeficientes de regresión son consistentes y eficientes estimadores lineales en ambos modelos.

También, la prueba de Shapiro-Wilk establece que los residuos presentan una distribución normal en estos modelos ($p = 0,0761$ y $p = 0,8353$). En el contexto anterior, dependiendo del tamaño de los datos ($n = 93$ ramas) se pueden detectar incluso desviaciones leves de la normalidad, siendo el valor de p no muy útil como indicador de la acción a seguir, por lo que es recomendable el acompañamiento con un gráfico de distribución normal (Faraway, 2009), el cual evidencia dicho comportamiento (figuras 6).

De la misma forma, la prueba de Breusch-Pagan señala homocedasticidad en los residuos ($p > 0,05$), es decir, la varianza del error o de perturbación es la misma sin importar el valor de X (largo o ancho foliar), o en otras palabras, las poblaciones Y (AF) tienen la misma varianza para los diversos valores de X (largo o ancho foliar), lo que se traduce en que la línea de regresión (la línea de la relación promedio entre X y Y) la variación es la misma para todos los valores de X, ya que no aumenta ni disminuye conforme varía X (Gujarati & Porter, 2010). De manera gráfica se presenta un patrón de residuos al azar y, por ende, una ausencia de tendencia (sesgo) en los residuos de los dos modelos exponenciales que presentan una correlación igual a cero ($r = 0,0000$), lo cual concuerda con lo señalado por Fox y Weisberg:

Los residuos ordinarios no están correlacionados con los valores ajustados o, de hecho, con cualquier combinación lineal de los regresores, incluidos los propios regresores, y así los patrones en las gráficas de los residuos ordinarios versus las combinaciones lineales de los regresores pueden ocurrir solo si uno o más supuestos del modelo son inapropiados. (2019)

Ello se evidencia en los gráficos de dispersión de residuos vs. los valores ajustados (figuras 7).

Tabla 6. Ecuaciones de regresión correspondientes al área foliar estimada AFE vs. LF de *G. arborea*

Modelo	Ecuación	R ²	ECM	(p) β ₀	(p) β ₁	(p) β ₂	(p) β ₃	N _r	H _r	AIC	V(+/-)
Lineal	3. $AFE = -197,3881 + 25,3765LF$	0,911	850,0	0,000	0,000	NA	NA	0,544	0,344	893	+
Logarítmico	4. $AFE = -861,2857 + 390,2223 \ln LF$	0,854	1390,0	0,000	0,000	NA	NA	0,065	0,00*	938	-
Cuadrático	5. $AFE = 12,5105 - 0,9284LF + 0,7846LF^2$	0,928	690,9	0,87*	0,000	0,78*	NA	0,644	0,560	874	-
Cúbico	6. $AFE = 520,5901 - 101,0613LF + 7,0492LF^2 - 0,1253LF^3$	0,934	637,0	0,004	0,001	0,004	0,005	0,398	0,399	868	+
Potencial	7. $AFE = 1,0412LF^{1,8931}$	0,928	0,0147	0,000	0,77*	NA	NA	0,028*	0,942	-126	-
Exponencial	8. $AFE = 28,0105e^{0,1192LF}$	0,929	0,0146	0,000	0,000	NA	NA	0,076	0,125	-126	+

Notas aclaratorias: *: valor crítico, AFE: área foliar estimada, LF: largo foliar, AnF: ancho foliar, R²: coeficiente de determinación, ECM: error cuadrático medio, (p) β_x: p-valor en coeficientes de regresión, N_r: normalidad de los residuos (prueba de Shapiro-Wilk), H_r: homocedasticidad de los residuos (prueba de Breusch-Pagan), AIC: criterio de información de Akaike y V(+/-): validez de la ecuación.

Fuente: Elaboración propia

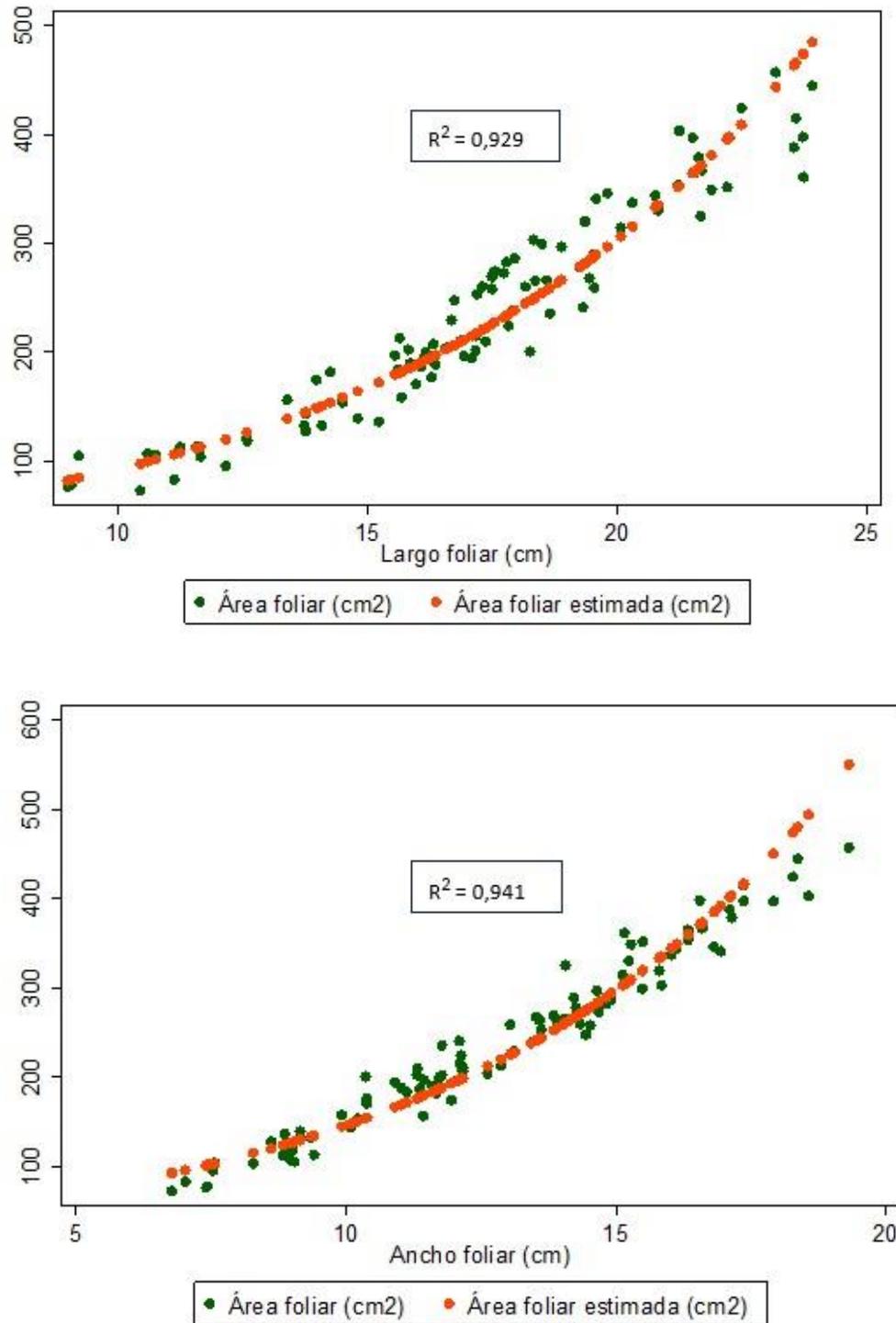
Tabla 7. Ecuaciones de regresión correspondientes al área foliar estimada AFE vs. ancho foliar AnF de *G. arborea*

Modelo	Ecuación	R ²	ECM	(p) β ₀	(p) β ₁	(p) β ₂	(p) β ₃	N _r	H _r	AIC	V(+/-)
Lineal	9. $AFE = 155,8137 + 30,8275AnF$	0,958	396,7	0,000	0,000	NA	NA	0,769	0,167	822	+
Logarítmico	10. $AFE = -686,3416 + 367,3318 \ln AnF$	0,922	740,4	0,000	0,000	NA	NA	0,02*	0,00*	880	-
Cuadrático	11. $AFE = 50,2814 + 13,3512AnF + 0,6819AnF^2$	0,963	352,2	0,009	0,002	0,109*	NA	0,151	0,00*	812	-
Cúbico	12. $AFE = 22,663 + 6,321AnF + 1,250AnF^2 - 0,014AnF^3$	0,963	355,9	0,82*	0,57*	0,800*	0,842*	0,171	0,00*	814	-
Potencial	13. $AFE = 2,0612AnF^{1,8796}$	0,965	0,007	0,000	0,000	NA	NA	0,889	0,528	-194	+
Exponencial	14. $AFE = 35,2523e^{0,1421AnF}$	0,941	0,012	0,000	0,000	NA	NA	0,835	0,126	-144	+

Notas aclaratorias: *: valor crítico, AFE: área foliar estimada, LF: largo foliar, AnF: ancho foliar, R²: coeficiente de determinación, ECM: error cuadrático medio, (p) β_x: p-valor en coeficientes de regresión, N_r: normalidad de los residuos (prueba de Shapiro-Wilk), H_r: homocedasticidad de los residuos (prueba de Breusch-Pagan), AIC: criterio de información de Akaike y V(+/-): validez de la ecuación.

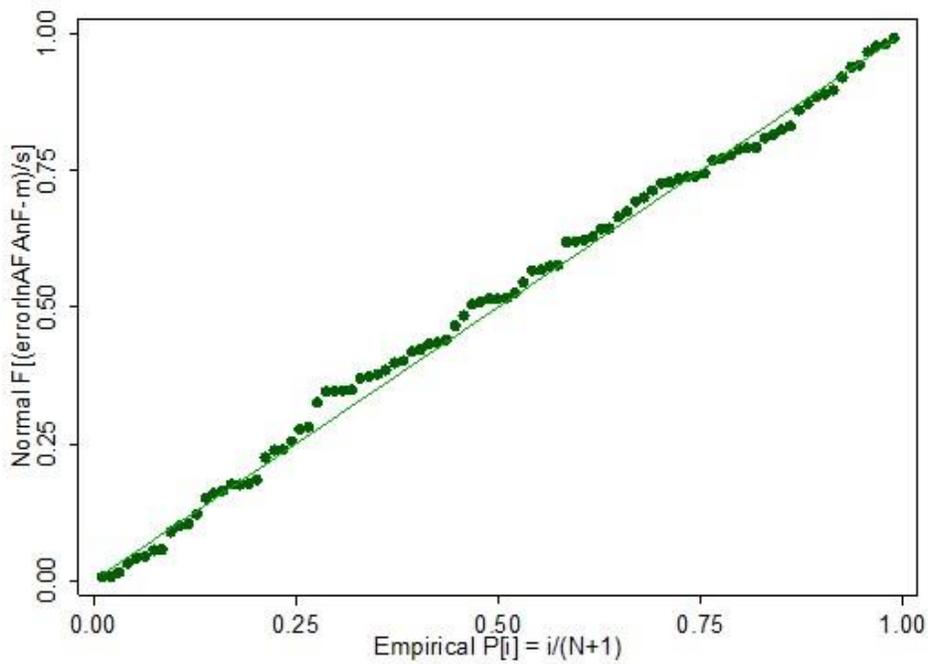
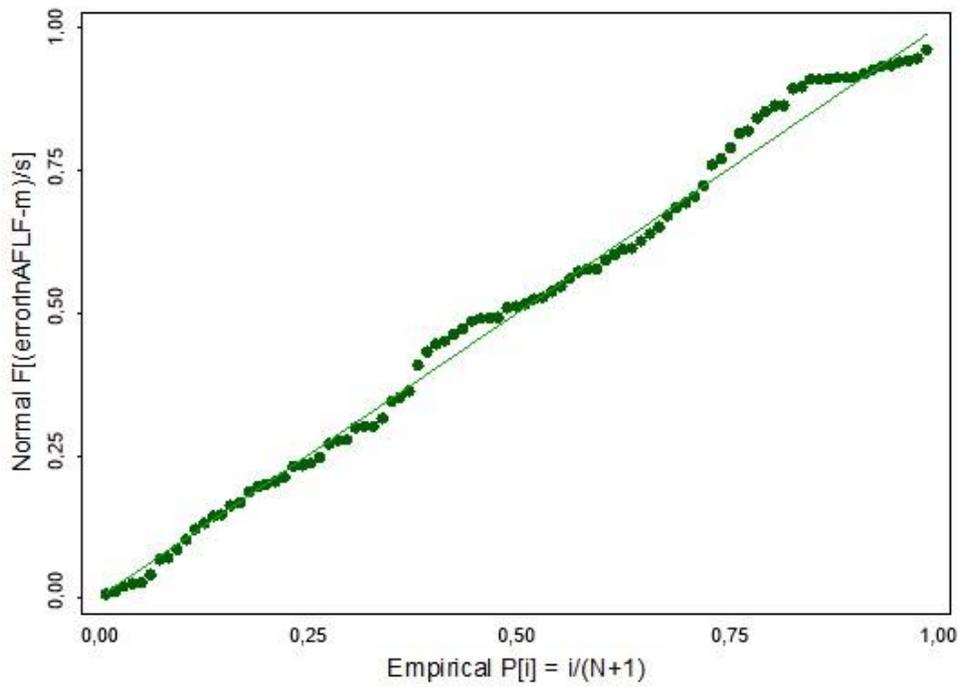
Fuente: Elaboración propia



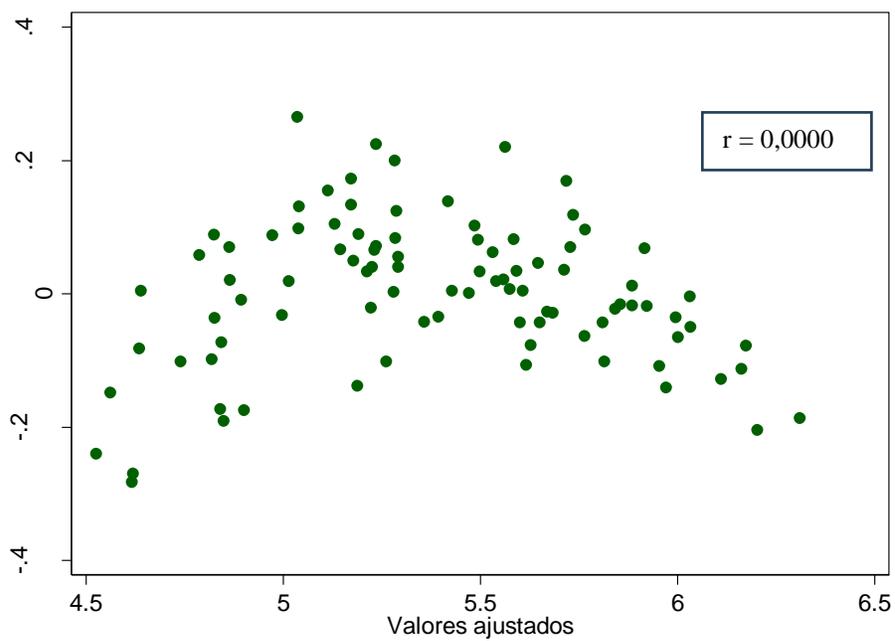
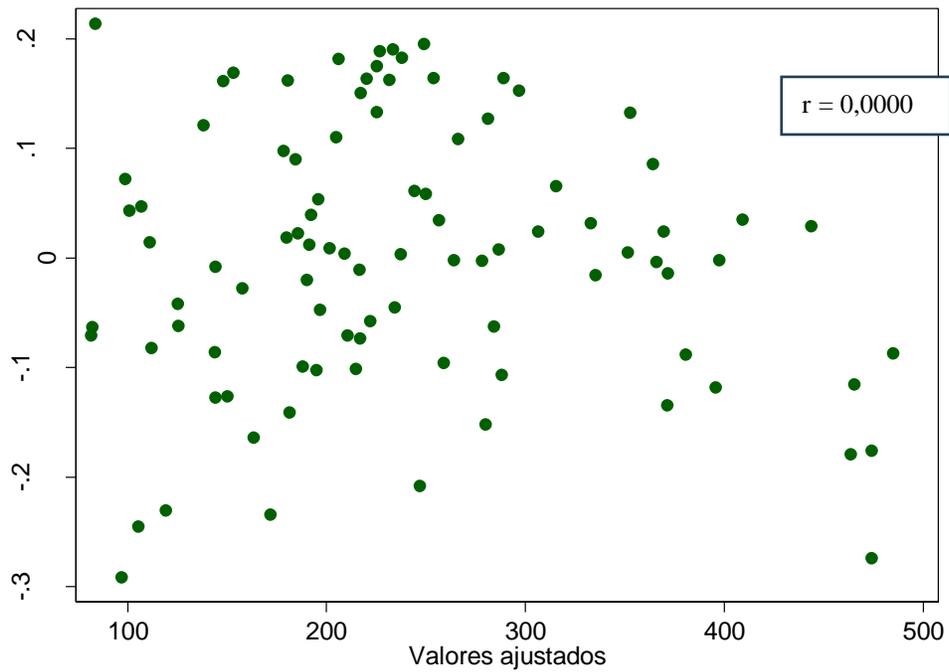


Figuras 5. Gráficos de regresión exponencial de AFE vs. LF y AFE vs. AnF de *G. arborea*
Fuente: Elaboración propia





Figuras 6. Gráficos de probabilidad normal de residuos de los modelos exponenciales AFE vs. LF y AFE vs. AnF de *G. arborea*
 Fuente: Elaboración propia



Figuras 7. Dispersión de residuos vs. valores ajustados de las regresiones exponenciales de área foliar vs. largo y área foliares vs. ancho foliar de *G. arborea*

Fuente: Elaboración propia

Asimismo, se determinaron las ecuaciones alométricas que relacionan el AFE basado en el modelo exponencial $AFE = 28,0105e^{0,1192LF}$ y el AFR, como también el AFE soportado en el modelo exponencial $AFE = 35,2523e^{0,1421AnF}$ y el AFR con el cumplimiento de los criterios de bondad de ajuste: R^2 , ECM, p-valor de coeficientes [(p) β x], análisis de residuos (normalidad prueba de Shapiro-Wilk, homocedasticidad prueba de Breusch-Pagan) y AIC (tabla 8 y figuras 8).

Tabla 8. Modelo exponencial correspondiente a AFE vs. AFR en relación con el LF y AnF de *G. arborea*

Modelo	Ecuación	R ²	ECM	(p) β_0	(p) β_1	N _e	H _e	AIC	Validez de la ecuación
Exponencial	$AFE = 78,2762e^{0,0042AFR}$	0,9110	0,0171	< 0,001	< 0,001	0,7872	0,1325	-112	+
Exponencial	$AFE = 75,6996e^{0,0044AFR}$	0,9585	0,0080	< 0,001	< 0,001	0,7602	0,5770	-182	+

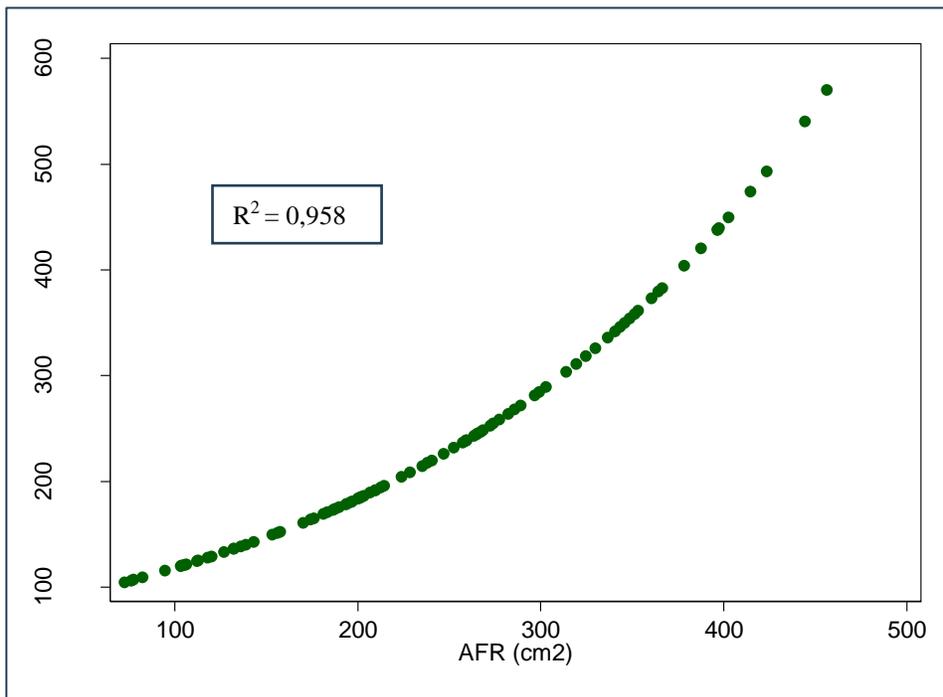
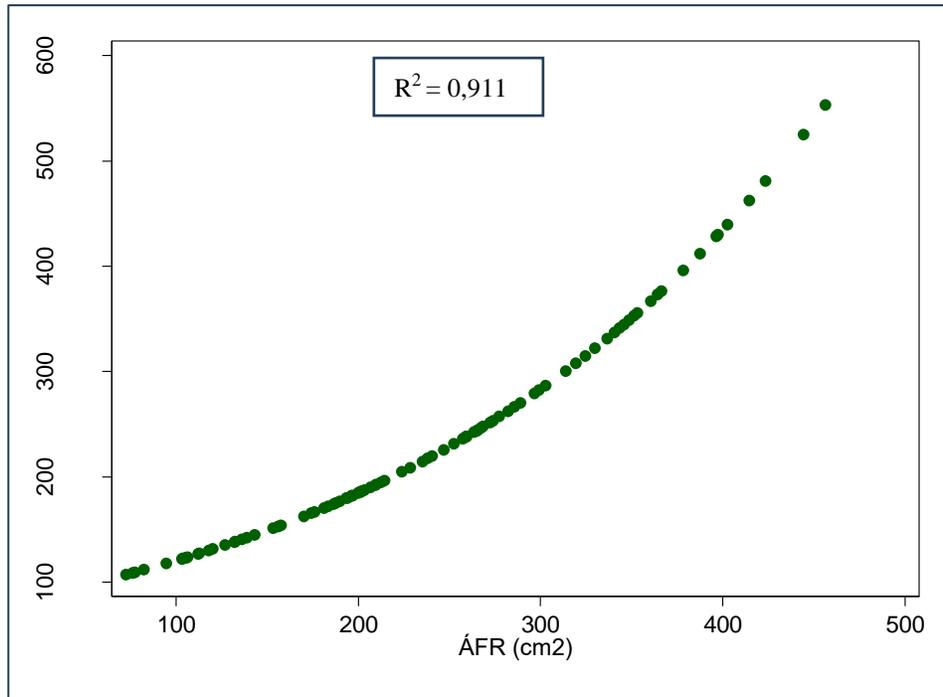
Fuente: Elaboración propia

Lo anterior señala que el AFR explica la variabilidad del AFE basado en el LF en un 91,1 %, lo cual indica que el modelo exponencial $AFE = 78,2762e^{0,0042AFR}$ tiene un alto grado de confiabilidad. Asimismo, el AFR explica la variabilidad del AFE basado en el AnF en un 95,8 %, lo que muestra que el modelo exponencial $AFE = 75,6996e^{0,0044AFR}$ tiene un alto grado de confiabilidad.

Respecto a la selección de los mejores modelos de estimación del objeto de estudio por diversos autores, la determinación de áreas foliares desde ecuaciones de regresión simples se han formulado a partir del modelo lineal simple, estimando el AFE desde el LF ($AFE = \beta_0 + \beta_1LF$) en especies vegetales como la albahaca ($R^2 = 0,73$) (Ruiz-Espinoza et al., 2007), el níspero ($R^2=0,90$) (Portillo et al., 2004) y la papaya ($R^2 = 0,93$) (Cardona et al., 2009) (tabla 9), concordando las dos últimas especies con el modelo de regresión simple que estimó el AFE con el LF con un $R^2 = 0,91$ en melina de este trabajo (tabla 7).

Asimismo, al seguir el modelo lineal simple se ha estimado el AF a partir del producto $LF \times AnF$ ($AFE = \beta_0 + \beta_1LF \times AnF$) en las especies de aliso ($R^2 = 0,97$) (Cabezas-Gutiérrez et al., 2009), duraznero ($R^2 = 0,99$) (Quevedo et al., 2012), mangle ($R^2 = 0,97$) (Cabezas-Gutiérrez et al., 2009), mamey ($R^2 = 0,89$) (Calderón et al., 2011), morera ($R^2 = 0,99$) (Pentón et al., 2006), roble ($R^2 = 0,95$) (Cabezas-Gutiérrez et al., 2009) y vid ($R^2 = 0,99$) (Pérez-Luna et al., 2015) (tabla 9).

Además, Cabezas-Gutiérrez et al. (2009) relacionaron el AFE y el AFR a partir del modelo lineal simple ($AFE = \beta_0 + \beta_1AFR$) en las especies de aliso ($R^2 = 0,98$), mangle ($R^2 = 0,99$) y roble ($R^2 = 0,98$) (tabla 9), difiriendo de los dos modelos exponenciales $AFE = \beta_0e^{\beta_1AFR}$ que relacionaron tales variables en melina de este trabajo: modelo 1. $AFE = 78,2762e^{0,0042AFR}$ (tabla 8), donde el AFE proviene del producto exponencial del AFR vs. LF, $AFE = 28,0105e^{0,1192LF}$ (tabla 7) y modelo 2. $AFE = 75,6996e^{0,0044AFR}$ (tabla 8), donde el AFE proviene del producto exponencial del AFR vs. AnF, $AFE = 35,2523e^{0,1421AnF}$ (tabla 7).



Figuras 8. Gráficos de regresión exponencial de AFE basada en el LF vs .AFR y AFE basado en el AnF vs. AFR de *G. arborea*
 Fuente: Elaboración propia

En cuanto a los modelos cuadráticos para la estimación del AF formulados por Cabezas-Gutiérrez y Peña-Baracaldo (2012) para arándano y Casierra-Posada et al. (2017) para ciruelo y duraznero (tabla 9), no fue posible hacer la comparación con los modelos cuadráticos de las estimaciones de área foliar para melina de este trabajo, porque estos últimos no cumplieron con algunos criterios de bondad de ajuste, lo que invalidaba la ecuación planteada.

Por otra parte, en la mayoría de trabajos se toma como criterio de bondad de ajuste el R^2 y en otros se le suma el error cuadrático medio cuando hay más criterios de bondad de ajuste que son necesarios utilizar, como el p-valor de los coeficientes de regresión y el análisis de los residuos desde la normalidad, homocedasticidad, independencia y gráficos de residuos, para así tener más elementos de juicio que permitan darle validez al modelo de regresión seleccionado, como lo plantearon Quevedo et al. (2012) en la estimación de AF en duraznero y Cardona et al. (2009) en la estimación de AF en papaya (tabla 9).

Tabla 9. Modelos alométricos simples para la determinación del AF en diversas especies vegetales

Especies	Autores	Modelos	Ecuaciones	R ²	ECM	Nr	Hr	Ir
Albahaca (<i>Ocimum basilicum</i> L.)	Ruiz-Espinoza et al. (2007)	Lineal	$AFE = -8,49 + 3,86LF$	0,73	X			
Aliso (<i>Alnus acuminata</i> H.B.K)	Cabezas-Gutiérrez et al. (2009)	Lineal	$AFE = 8,312 + 0,72(LF \times AnF)$	0,97	X			
Aliso (<i>Alnus acuminata</i> H.B.K)	Cabezas-Gutiérrez et al. (2009)	Lineal	$AFE = -0,171 + 1,001AFR$	0,987				
Arándano (<i>Vaccinium corymbosum</i> L.)	Cabezas-Gutiérrez y Peña-Baracaldo (2011)	Cuadrático	$AFE = 2,2104 + 0,3321(LF \times AnF) + 0,0075(LF \times AnF)^2$	0,94	X			
Ciruelo (<i>Prunus salicina</i> L.)	Casierra-Posada et al. (2017)	Cuadrático	$AFE = 4,7727 + 0,4884(LF \times AnF) + 0,0012(LF \times AnF)^2$	0,83				
Duraznero (<i>Prunus persica</i> L.)	Quevedo et al. 2012	Lineal	$AFE = 1,572 + 0,6516(LF \times AnF)$	0,99		X	X	X
Duraznero (<i>Prunus persica</i> L.)	Casierra-Posada et al. (2017)	Cuadrático	$AFE = 2,0139 + 0,6112(LF \times AnF) + 0,0003(LF \times AnF)^2$	0,96				
Mamey (<i>Pouteria sapota</i> Jacq.) E. Moore & Stearn	Calderón et al. (2011)	Lineal	$AFE = 7,7861 + 0,6246(LF \times AnF)$	0,897			X	
Mangle (<i>Escallonia pendula</i> Pers.)	Cabezas-Gutiérrez et al. (2009)	Lineal	$AFE = 1,330 + 0,804(LF \times AnF)$	0,971	X			
Mangle (<i>Escallonia pendula</i> Pers.)	Cabezas-Gutiérrez et al. (2009)	Lineal	$AFE = -0,730 + 1,011AFR$	0,99				
Morera (<i>Morus alba</i> L.)	Pentón et al. (2006)	Lineal	$AFE = 0,003 + 0,0073(LF \times AnF)$	0,996				
Níspero (<i>Manilkara achras</i> (Miller) Fosberg)	Portillo et al. (2004)	Lineal	$AFS = -19,5392 + 3,5753L$	0,9				
Papaya (<i>Carica papaya</i> L.)	Cardona et al. (2009)	Lineal	$AF = -303,0742 + 31,2028LNCLI$	0,933		X	X	X
Roble (<i>Quercus humboldtii</i> Bonpl.)	Cabezas-Gutiérrez et al. (2009)	Lineal	$AFE = -3,226 + 1,054(LF \times AnF)$	0,955	X			
Roble (<i>Quercus humboldtii</i> Bonpl.)	Cabezas-Gutiérrez et al. (2009)	Lineal	$AFE = 1,356 + 0,989AFR$	0,989				
Vid (<i>Vitis vinifera</i> L.)	Pérez-Luna et al (2015)	Lineal	$AFE = -5,470 + 0,9015(LF \times AnF)$	0,992				

Notas aclaratorias: ECM: error cuadrático medio, Nr: normalidad de residuos, Hr: homocedasticidad de residuos e Ir: independencia de residuos.

Fuente: Elaboración propia



Conclusiones

La necesidad de establecer, desde la estimación estadística, el AF en función de las variables dendrométricas de largo y ancho foliar en melina (*Gmelina arborea* Roxb. ex Sim.) en el sistema silvopastoril Sinpar en Barrancabermeja, Santander, procura impactar a nivel investigativo, social y ambiental, puesto que se persigue aportar conocimiento relacionado con el crecimiento de las plantas, por ser el AF un parámetro importante en la evaluación de variables como la tasa específica de hojas, la tasa de asimilación neta y la tasa de transpiración, entre otros. Por lo anterior, se recomienda la continuidad en este tipo de estudios en las especies arbóreas que conforman los sistemas silvopastoriles por su doble función: la restauración ecológica de paisajes degradados y la alimentación del ganado, al establecerse el volumen y la oferta de forraje.

El AFE en melina *G. arborea*, desde la variable LF, corresponde a la ecuación de regresión exponencial $AFE = 28,0105e^{0,1192LF}$, como también desde la variable AnF compete a la ecuación de regresión exponencial $AFE = 35,2523e^{0,1421AnF}$, cumpliéndose en ambas regresiones los criterios de bondad de ajuste como R^2 , ECM, p valor de coeficientes, análisis de residuos (normalidad, homocedasticidad, dispersión de residuos vs. valores ajustados) y AIC. Los modelos exponenciales $AFE = 28,0105e^{0,1192LF}$ y $35,2523e^{0,1421AnF}$ tienen un elevado grado de confiabilidad para su uso en predicciones del área foliar a partir del LF y el AnF en la especie melina *G. arborea*.

La relación del AFE basada en el LF vs. el AFR se soporta en la ecuación de regresión exponencial $AFE = 78,2762e^{0,0042AFR}$ e igualmente la relación del AFE basada en el AnF vs. el AFR se sustenta en la ecuación de regresión exponencial $AFE = 75,6996e^{0,0044AFR}$, cumpliéndose los criterios de bondad de ajuste como R^2 , ECM, p valor de coeficientes, análisis de residuos (normalidad, homocedasticidad) y AIC en ambas regresiones.

Los modelos exponenciales $AFE = 78,2762e^{0,0042AFR}$ y $AFE = 75,6996e^{0,0044AFR}$ tienen un alto grado de confiabilidad para su uso en predicciones del AFE basado en el LF vs. el AFR y predicciones del AFE basadas en el AnF vs. el AFR en la especie melina *G. arborea*.

Agradecimientos

Los autores dan agradecimientos al Departamento Nacional de Planeación por los recursos que les permitieron la realización de este estudio a través del proyecto macro: “Diseño de sistemas productivos sostenibles como estrategia de conservación de paisajes rurales degradados, Barrancabermeja, Santander”; a los asesores del proyecto, PhD. María Cristina Gallego Roper, PhD. Jairo Mora Delgado y PhD. José Ignacio Barrera Cataño, por sus aportes en las reuniones y las visitas al Instituto Universitario de la Paz, específicamente a la Rectoría, Vicerrectoría de Planeación y Dirección de Investigación y Proyección Social por sus acompañamientos administrativos y económicos e, igualmente, a los operarios de campo que colaboraron con la obtención del material vegetal para su análisis.



Contribución de los autores

Carlos Augusto Vásquez Rojas: supervisión del proyecto, selección de información, análisis de datos, elaboración, revisión y corrección del manuscrito; Emiro Rafael Canchila Asencio: administrador del proyecto, implementación del sistema silvopastoril SINPAR, selección de información, toma de información en campo y laboratorio, análisis de datos y elaboración, revisión y corrección del manuscrito; Jorge Humberto Contreras Castro: selección de información, toma de información en campo y laboratorio, construcción y análisis de bases de datos, elaboración, revisión y corrección del manuscrito; Javier Sarmiento Estupiñán: adquisición de recursos, logística, selección de información, análisis de datos, elaboración, revisión y corrección del manuscrito.

Implicaciones éticas

Los autores declaran que no existen implicaciones éticas en el desarrollo de esta investigación.

Conflicto de interés

El manuscrito fue preparado y revisado con la participación de todos los autores, quienes declaramos que no existe ningún conflicto de intereses que ponga en riesgo la validez de los resultados presentados.

Financiación

Este estudio fue financiado por el Departamento Nacional de Planeación y el Instituto Universitario de la Paz.

Descargos de responsabilidad

El manuscrito fue preparado y revisado con la participación de todos los autores, quienes declaran que no existe ningún conflicto de intereses que ponga en riesgo la validez de los resultados presentados.

Referencias

Álvarez, Y., Álvarez, E., Cano, J., & Suescún, D. (2012). Modelo matemático para estimar área foliar en árboles del bosque tropical seco en el Caribe colombiano. *Intrópica*, 7(1), 69-79. <https://revistas.unimagdalena.edu.co/index.php/intropica/article/view/165>

- Aparicio, L. J., & Abril, D. A. (2016). *Calidad nutricional y producción de forraje de melina Gmelina arborea en bancos forrajeros en el piedemonte llanero*. Bogotá: Universidad de la Salle. <https://ciencia.lasalle.edu.co/cgi/viewcontent.cgi?article=1051&context=zootecnia>
- Bueno, G. A., Pardo, O., Pérez, O., Cerinza, O. J., & Pabón, D. M. (2015). *Bancos forrajeros en sistemas agrosilvopastoriles para la alimentación animal en el piedemonte del Meta*. Colombia: Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria - AGROSAVIA. <https://repository.agrosavia.co/handle/20.500.12324/12661>
- Cabezas-Gutiérrez, M., & Peña-Baracaldo, F. (2012). Estimación del área foliar del arándano (*Vaccinium corymbosum*) por medio de un método no destructivo. *Revista U.D.C.A Actualidad y Divulgación Científica*, 15(2), 373-379. <http://www.scielo.org.co/pdf/rudca/v15n2/v15n2a15.pdf>
- Cabezas-Gutiérrez, M., Peña, F., Duarte, H. W., Colorado, J. F., & Lora, R. (2009). Un modelo para la estimación del área foliar en tres especies forestales de forma no destructiva. *Revista UDCA Actualidad y Divulgación Científica*, 12(1), 121-130. <http://www.scielo.org.co/pdf/rudca/v12n1/v12n1a13.pdf>
- Calderón, A., Calderón, M., Fundora, L., & Jeréz, E. (2011). Estimación de área foliar en posturas de mamey (*Pouteria sapota* (Jacq.) en fase de vivero, a partir de las medidas lineales de las hojas. *Cultivos Tropicales*, 32(2), 91-99. http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_issuetoc&pid=0258-593620110002&lng=es&nrm=iso
- Cardona, C., Araméndiz, H., & Barrera, C. (2009). Estimación del área foliar de papaya (*Carica papaya* L.) basada en muestreo no destructivo. *Revista U.D.C.A. Actualidad y Divulgación Científica*, 12(1), 131-139. <https://doi.org/10.31910/rudca.v12.n1.2009.649>
- Casierra-Posada, F., Zapata-Casierra, V., & Cutler, J. (2017). Comparación de métodos directos e indirectos para la estimación del área foliar en duraznero (*Prunus persica*) y ciruelo (*Prunus salicina*). *Revista Colombiana de Ciencias Hortícolas*, 11(1), 30-38. <http://www.scielo.org.co/pdf/rcch/v11n1/2011-2173-rcch-11-01-00030.pdf>
- Castañeda-Álvarez, N. P., Álvarez, F., Arango, J., Chanchy, L., García, G. F., Sánchez, V., Solarte, A., Sotelo, M., & Zapata, C. (2017). *Especies vegetales útiles para sistemas silvopastoriles del Caquetá, Colombia*. Cali: Centro Internacional de Agricultura Tropical (CIAT). http://ciat-library.ciat.cgiar.org/Articulos_Ciat/biblioteca/Especies_vegetales_utiles_para_sistemas_silvopastoriles_del_caqueta.pdf
- Da Cunha, T. A., & Guimaraes, C. A. (2008). Selección del factor de área basal del relascopio de Bitterlich para el muestreo de un rodal de *Pinus taeda* L. en el sur de Brasil. *Kurú: Revista Forestal*, 5(15), 1-11. <http://revistas.tec.ac.cr/index.php/kuru/article/view/412>
- Directorio Forestal Maderero. (2018). *Melina*. DFM. <https://www.forestalmaderero.com/articulos/item/melina.html>
- Faraway, J. J. (2009). *Linear Models with R*. Nueva York: Chapman & Hall/CRC. <http://www.utstat.toronto.edu/~brunner/books/LinearModelsWithR.pdf>

- Fox, J., & Weisberg, S. (2019). *An R Companion to Applied Regression*. Los Angeles: SAGE Publications, Inc. <https://www.pdfdrive.com/an-r-companion-to-applied-regression-d185882824.html>
- Gujarati, D., & Porter, D. (2010). *Econometría*. México: McGraw-Hill. <https://fvela.files.wordpress.com/2012/10/econometria-damodar-n-gujarati-5ta-ed.pdf>
- Hernández, I. A. (2020). Estimación del área foliar con parámetros biométricos de las hojas de cuatro genotipos de Stevia (*Stevia rebaudiana* (Bertoni) Bertoni) en el Sinú Medio [tesis de pregrado, Universidad de Córdoba, Montería]. Repositorio Unicórdoba. <https://repositorio.unicordoba.edu.co/bitstream/handle/ucordoba/2771/Hern%C3%A1ndezFern%C3%A1ndezIsraelAntonio.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales. (s. f.). *Cartas climatológicas, medias mensuales, Aeropuerto Yariguies (Barrancabermeja)*. Ideam. <http://bart.ideam.gov.co/cliciu/barran/temperatura.htm>
- Jeréz, M. (2017). *Regresión con variable dependiente continua*. Madrid: Universidad Complutense de Madrid. https://www.ucm.es/data/cont/docs/518-2016-09-07-Tema%201_Repaso%20Modelo%20Regresi%C3%B3n%20Lineal.pdf
- López, P. L. (2004). Población, muestra y muestreo. *Punto Cero*, 9(8), 69-74. http://www.scielo.org.bo/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1815-02762004000100012
- Martínez-López, J., & Acosta-Ramos, A. (2014). Estimación del diámetro, altura y volumen a partir del diámetro del tocón para *Quercus laurina*, en Ixtlán, Oaxaca, México. *Madera y Bosques*, 20(1), 59-70. http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1405-04712014000100006
- Municipios de Colombia. (2022). *Barrancabermeja*. <https://www.municipio.com.co/municipio-barrancabermeja.html>
- Nafarrate Hecht, A. C. (2017). Estimación *directa e indirecta del índice de área foliar (LAF) y su modelación con lidar en un bosque tropical seco de Yucatán* [Tesis de maestría, Centro de Investigación Científica de Yucatán, A. C., México]. Repositorio institucional. https://cicy.repositorioinstitucional.mx/jspui/bitstream/1003/438/1/PCB_RN_M_Tesis_2017_Nafarrate_Ana.pdf
- Pentón, G., Torres, W., & Martín, G. (2006). Nota técnica: Estimación del área foliar a partir de observaciones morfológicas convencionales en *Morus alba* var. Acorazonada. *Pastos y Forrajes*, 29(3), 247.
- Pérez-Luna, A. I., Martínez-Díaz, G., Miranda-Blanco, J. L., & Vieira de Figueiredo, F. A. (2015). *Determinación de área foliar por métodos no destructivos en diferentes cultivares de uva de mesa*. http://researchgate.net/publication/303251774_Determinacion_de_area_foliar_por_metodos_no_destructivos_en_diferentes_cultivares_de_uva_de_mesa

- Portillo, A., Marín, A., Razz, R., & Sandoval, L. (2004). Estimación del área foliar de tres cultivares de Níspero, (*Manilkara acbras* [Millar] Fosberg), bajo condiciones de bosque seco tropical. *Revista de la Facultad de Agronomía de la Universidad del Zulia*, 12(1), 83-90. <https://produccioncientificaluz.org/index.php/agronomia/article/view/26523/27149>
- Quevedo, E., Arévalo, M., & Cancino, G. (2012). Determination of a Mathematical Model to Estimate the Area and Dry Weight of the Leaf Limbo of *Prunus persica* cv. Jarillo. *Revista Facultad Nacional de Agronomía Medellín*, 65(2), 6611-6619. <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=179925831011>
- Ruiz-Espinoza, F. H., Murillo-Amador, B., García-Hernández, J. L., Troyo-Diéguez, E., Palacios-Espinoza, A., Beltrán-Morales, A., Fenech-Larios, L., Zamora-Salgado, S., Marrero-Labrador, P., Nieto-Garibay, O., & Cruz de la Paz, O. (2007). Mediciones lineales en la hoja para la estimación no destructiva del área foliar en albahaca (*Ocimum basilicum* L.). *Revista Chapingo Serie Horticultura*, 13(1), 29-34. <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=60913104>
- Segura, M., & Andrade, H. (2008). ¿Cómo construir modelos alométricos de volumen, biomasa o carbono de especies leñosas perennes? *Agroforestería en las Américas*, 46, 89-96. <http://repositorio.bibliotecaorton.catie.ac.cr/handle/11554/6935>
- Szretter, M. E. (2013). *Apunte de regresión lineal*. Buenos Aires: Universidad de Buenos Aires. http://mate.dm.uba.ar/~meszre/apunte_regresion_lineal_szretter.pdf
- Ugarte, C. (2012). Ecofisiología de plantas forrajera. *Voces y Ecos*, 27, 37-42. https://cac.unr.edu.ar/wp-content/uploads/2020/03/script-tmp-inta_vye_nro27_ecofisiologia_de_plantas_forrajeras.pdf
- Useche, F., & Azuero, S. (2013). *Yopo (Anadenanthera peregrina), Acacia (Acacia mangium Wild) y Melina (Melina arborea) tres especies arbóreas propicias para los sistemas silvopastoriles en el piedemonte llanero* [Monografía, Universidad Nacional Abierta y a Distancia, Colombia]. Repositorio institucional UNAD. <https://repository.unad.edu.co/bitstream/handle/10596/1416/Monografia.pdf?sequence=1>
- Valcárcel, J. P., González, H., Cristancho, J. M., & Valcárcel, F. (2008). Determinación de la cantidad de oxígeno fotosintético evolucionado por las plantas verdes utilizando técnicas espectroscópicas. *Paideia Surcolombiana*, 13, 30-34. <https://journalusco.edu.co/index.php/paideia/article/view/1063/2068>
- Vallejos, O., Ponce, M., Heinrich, P., & Doll, U. (2019). Área y biomasa foliar total de *Nothofagus glauca* (Phil.) Krasser en zona Andina, Región del Maule, Chile. *Colombia Forestal*, 22(2), 5-14. <http://www.scielo.org.co/pdf/cofo/v22n2/0120-0739-cofo-22-02-00005.pdf>
- Vanoye-Eligio, M., López-García, L. L., García-Vela, J. A., & Alavez-Góngora, J. A. (2020). Aprovechamiento del fruto de la melina (*Gmelina arborea* ROXB) como colorante natural y antimicrobiano. *Agronomía Costarricense*, 44(1), 102-112. https://www.scielo.sa.cr/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0377-94242020000100105

- Vásquez-Rojas, C. A., Contreras-Castro, J. H., Canchila-Asencio, E. R., & Sarmiento-Estupiñán, J. (2021). *Informe de Investigación, Modelos de regresión simple para estimar el área foliar en Melina Gmelina arbórea en el Sistema Silvopastoril SINPAR*. Barrancabermeja: Instituto Universitario de la Paz.
- Yepes, A. P., Navarrete, D. A., Duque, Á. J., Philips, J. F., Cabrera, K. R., Álvarez, E., García, M. C., & Ordoñez, M. F. (2011). *Protocolo para la estimación nacional y subnacional de biomasa - carbono en Colombia*. Bogotá: Instituto de Hidrología, Meteorología, y Estudios Ambientales.
- http://www.ideam.gov.co/documents/13257/13548/Protocolo+para+la+estimaci%C3%B3n+nacional+y+subnacional_1.pdf/11c9d26b-5a03-4d13-957e-0bcc1af8f108