



Carbon sequestration potential in *Retrophyllum rospigliosii* (Pilg.) C. N. Page plantations for restoration purposes in the Colombian Andean region

Potencial de captura de carbono en plantaciones de *Retrophyllum rospigliosii* (Pilg.) C. N. Page con fines de restauración en la región Andina colombiana

Camilo E. Ruiz-Erao¹; Royer I. Riascos-Acosta¹; Edilber S. Guerrero-Martínez¹; Adriana M. Marín-Vélez²; Carlos A. Sierra³; Jorge A. Ramírez-Correa^{1*}

¹Universidad del Cauca, Facultad de Ciencias Agrarias. Calle 5 núm. 4-70, Popayán, Cauca. Colombia.

²Smurfit-Westrock Colombia, Departamento de Investigación Forestal. Calle 15 núm. 18-109, Puerto Isaacs, Yumbo, Valle del Cauca. Colombia.

³Max Planck Institute for Biogeochemistry. Hans-Knöll-Str. 10, 07745, Jena. Germany.

*Corresponding author: j.ramirez@unicauca.edu.co

Abstract

Introduction: Podocarpaceae is the only family of native conifers in the tropical Andes. In Colombia, *Retrophyllum rospigliosii* (Pilg.) C. N. Page is significant due to its wide geographic distribution; however, no biomass and carbon equations exist for this species.

Objective: To estimate the carbon capture potential of mature *R. rospigliosii* plantations established for restoration purposes.

Materials and methods: Thirty trees were selected based on diameter distribution of trees to evaluate stem volume and aboveground biomass, and 12 trees were analyzed to assess belowground biomass and carbon content in tree components (stem, branches, leaves, and roots). The variables – volume, biomass, and carbon – were correlated with diameter at breast height and total height using Husch and Spurr models.

Results and discussion: The adjusted models achieved R^2 values greater than 94 %. The stem provided the highest percentage of biomass, followed by coarse roots, branches, fine roots, and leaves. Carbon content in *R. rospigliosii* components ranged between 41.08 % and 49.97 %. Over a 20-year period, high-density monoculture plantations (1666 trees·ha⁻¹) of *R. rospigliosii* were estimated to produce 316.26 ± 187.26 Mg·ha⁻¹ of biomass and sequester 156.08 ± 92.80 Mg·Mg·ha⁻¹ of carbon.

Conclusion: Biomass and carbon sequestration of *R. rospigliosii* in plantations were relatively low compared to individuals in natural forests. The models indicate the low productivity of this species in terms of carbon sequestration.

Keywords: aboveground biomass; belowground biomass; allometric equations; Husch model; Podocarpaceae.

Resumen

Introducción: Las podocarpaceas son la única familia de coníferas nativas en los Andes tropicales. En Colombia, *Retrophyllum rospigliosii* (Pilg.) C. N. Page es importante por su amplia distribución geográfica; sin embargo, no existen ecuaciones de biomasa y carbono para la especie.

Objetivo: Estimar el potencial de captura de carbono de plantaciones maduras de *R. rospigliosii* establecidas con fines de restauración.

Materiales y métodos: Se seleccionaron 30 árboles a partir de su distribución diamétrica para evaluar el volumen del fuste y biomasa aérea, y 12 para evaluar la biomasa subterránea y el contenido de carbono de los componentes del árbol (fuste, ramas, hojas y raíces). Las variables volumen, biomasa y carbono se relacionaron en función del diámetro a la altura del pecho y la altura total usando los modelos de Husch y Spurr.

Resultados y discusión: Los modelos ajustados alcanzaron valores de R^2 mayores de 94 %. El fuste aportó el mayor porcentaje de biomasa, seguido de las raíces gruesas, ramas, raíces finas y hojas. El contenido de carbono en los componentes de *R. rospigliosii* varió entre 41.08 % y 49.97 %. En 20 años, se estima que las plantaciones mono-específicas y de alta densidad (1666 árboles·ha⁻¹) de *R. rospigliosii* registraron 316.26 ± 187.26 Mg·ha⁻¹ de biomasa y 156.08 ± 92.80 Mg·ha⁻¹ de captura de carbono.

Conclusión: La biomasa y captura de carbono de *R. rospigliosii* en plantaciones fueron relativamente bajas en comparación con los individuos en bosques naturales. Los modelos indican una baja productividad de la especie en términos de captura de carbono.

Palabras clave: biomasa aérea; biomasa subterránea; ecuaciones alométricas; modelo de Husch; podocarpaceas.

Please cite this article as follows (APA 7): Ruiz-Erao, C. E., Riascos-Acosta, R. I., Guerrero-Martínez, E. S., Marín-Vélez, A. M., Sierra, C. A., & Ramírez-Correa, J. A. (2024). Carbon sequestration potential in *Retrophyllum rospigliosii* (Pilg.) C. N. Page plantations for restoration purposes in the Colombian Andean region. *Revista Chapingo Serie Ciencias Forestales y del Ambiente*, 31, e24009. <https://doi.org/10.5154/r.rchscfa.2024.04.009>



Introduction

Most global climate action agreements have given significant attention to forests due to their potential for carbon sequestration and climate change mitigation (Federici et al., 2015; Griscom et al., 2017). One of the most important compartments in carbon fixation in forests is tree biomass, which is quantified through field measurements and the use of remote sensing or geographic information systems. However, beyond the technique used, it is essential to have high-quality biomass equations with a high degree of fit to obtain accurate estimates (Picard et al., 2012).

Typical biomass equations aim to estimate biomass at the tree or stand level based on its allometric relationship with easily measurable variables such as diameter at breast height or total tree height (Kershaw et al., 2017). Currently, there are generalized biomass equations (Chojnacky et al., 2014) or those specific to a particular biome (Alvarez et al., 2012; Chave et al., 2014). However, it has been shown that intraspecific variation affects the accuracy of estimates (Affleck, 2019; Araujo et al., 2023), due to the species-specific allometric relationship between biomass and tree dimensions (Teobaldelli et al., 2009). Therefore, it is recommended to use species-specific biomass equations that allow for high-precision estimates (Temesgen et al., 2015).

There are biomass equations for most commercial forest species, such as pines and eucalypts (Correia et al., 2018; Han & Park, 2020; Hernández-Ramos et al., 2017). Most of these equations are based on generic models commonly used for perennial woody species, such as those by Schumacher, Spurr, Husch, and Meyer, which are selected according to goodness-of-fit statistics (Loetsch et al., 1973). However, biomass equations for native species in tropical forests are scarce (Chave et al., 2014; Liu et al., 2023), especially for localized and uncommon species. This is the case of *Retrophyllum rospigliosii* (Pilg.) C. N. Page, a podocarp native to the tropical Andes, distributed at elevations ranging from 1500 to 3300 m, for which no biomass equations have been reported. The importance of understanding the amount of accumulated biomass lies in identifying its carbon sequestration potential, thereby quantifying one of the environmental services provided by these native forests. This information is critical for their conservation, restoration, and meeting the goals established in national climate change agreements.

Podocarps in Colombia have experienced a decline of nearly 30 % in recent decades due to deforestation and selective harvesting for timber production (Ortega & Muñoz, 2020). As a result, the species is classified as vulnerable on the International Union for Conservation

Introducción

La mayoría de los convenios globales de acción climática han dado gran atención a los bosques por su potencial de captura de carbono y mitigación del cambio climático (Federici et al., 2015; Griscom et al., 2017). Uno de los compartimentos de mayor importancia en la fijación de carbono de los bosques es la biomasa de los árboles, la cual se cuantifica a través de mediciones en campo y con el uso de sensores remotos o de sistemas de información geográfica. No obstante, más allá de la técnica utilizada, se debe contar con ecuaciones de biomasa de calidad y con un nivel alto de ajuste para obtener estimaciones precisas (Picard et al., 2012).

Las ecuaciones de biomasa típicas tienen como objetivo estimar la biomasa a nivel de árbol o rodal, a partir de su relación alométrica con variables de medición fácil como el diámetro a la altura del pecho o la altura total de los árboles (Kershaw et al., 2017). Actualmente, existen ecuaciones de biomasa generalizadas (Chojnacky et al., 2014) o de un bioma en particular (Alvarez et al., 2012; Chave et al., 2014). No obstante, a partir de estas, se ha comprobado que la variación intraespecie afecta la precisión de las estimaciones (Affleck, 2019; Araujo et al., 2023), debido a la especificidad en la relación alométrica entre la biomasa y las dimensiones de los árboles de cada especie (Teobaldelli et al., 2009). Por tanto, es recomendable disponer de ecuaciones de biomasa únicas por especie que permitan estimaciones con un grado alto de precisión (Temesgen et al., 2015).

Existen ecuaciones de biomasa para la mayoría de las especies forestales comerciales como pinos y eucaliptos (Correia et al., 2018; Han & Park, 2020; Hernández-Ramos et al., 2017). La mayoría se basan en modelos genéricos utilizados frecuentemente en especies leñosas perennes; por ejemplo, Schumacher, Spurr, Husch y Meyer, los cuales se seleccionan según estadísticas de bondad de ajuste (Loetsch et al., 1973). Sin embargo, las ecuaciones de biomasa para especies nativas de los bosques tropicales son escasas (Chave et al., 2014; Liu et al., 2023), en especial para especies localizadas y poco comunes. Es el caso de *Retrophyllum rospigliosii* (Pilg.) C. N. Page, una podocarpácea nativa de los Andes tropicales que se distribuye entre los 1500 hasta 3300 m, para la cual no existen ecuaciones de biomasa reportadas. La importancia de conocer la cantidad de biomasa acumulada radica en identificar su potencial de captura de carbono y con ello cuantificar uno de los servicios ambientales que proveen estos bosques nativos de cara a su conservación, restauración y cumplimiento de las metas establecidas en los acuerdos nacionales sobre cambio climático.

Las podocarpáceas en Colombia han presentado un declive de casi 30 % en las últimas décadas debido a procesos de deforestación y cosecha selectiva para la producción de

of Nature's (IUCN) Red List of Threatened Species (Gardner & Thomas, 2013). The threatened status of *R. rospigliosii* underscores the need to establish restoration and reforestation programs to ensure its survival. To date, approximately 25 ha of *R. rospigliosii* have been established in Colombia, particularly in the southern regions, with plantings dating back to the late 1990s. In Andean forests, *R. rospigliosii* is a species of high ecological value due to its ability to colonize nutrient-poor soils, facilitating the establishment of various Andean species under its canopy. It also provides shelter for wildlife (Marín, 1998). Furthermore, this species produces timber that is ideal for construction and artisanal woodworking, making it a valuable resource for local communities (Marín, 1998).

In this context, the present study aimed to estimate the carbon sequestration potential of mature *R. rospigliosii* plantations established for restoration purposes in the Colombian Andes. To achieve this goal, biomass production was evaluated, and allometric equations were developed to determine its ecological productivity and contribution to carbon sequestration.

Materials and Methods

Study area

The study was conducted in an experimental *R. rospigliosii* plantation established in 1999 by the Federación Nacional de Cafeteros de Colombia and Smurfit-Westrock Colombia. The plantation is located in the western region of the Cauca department (El Tambo municipality), Colombia, between coordinates 2° 28' 0"-2° 29' 40" N and 76° 48' 30"-76° 50' 0" W (Figure 1), at an elevation of about 1775 m. According to data from the local weather station, the average annual temperature is 19.4 °C, and average annual precipitation 2298 mm, with a bimodal distribution pattern and lower rainfall between June and September (Ramírez et al., 2021). The area is classified as premontane wet forest (bh-PM) according to Holdridge's life zone classification system (1982).

The study was established using seeds collected from a natural forest in the southwestern region of the Antioquia department (Támesis municipality, Colombia) on Finca La Playa. The seedlings were produced in a nursery and transplanted into the field when they reached a height of 30 cm.

The experimental plantation covers 8 ha and was initially established at a density of 1666 trees·ha⁻¹. This density has gradually decreased due to mortality and selective removal of individuals, leaving an approximate current density of 300 trees·ha⁻¹.

madera (Ortega & Muñoz, 2020). Por lo anterior, la especie se encuentra catalogada como vulnerable según la Lista Roja de Especies Amenazadas de la Unión Internacional para la Conservación de la Naturaleza y Recursos Naturales (IUCN, por sus siglas en inglés; Gardner & Thomas, 2013). La condición de amenaza en la que se encuentra *R. rospigliosii* genera la necesidad de establecer programas de restauración y reforestación con el fin de asegurar su permanencia; hasta el momento se han establecido en Colombia, especialmente al sur del país, cerca de 25 ha de *R. rospigliosii*, las cuales fueron plantadas a finales de los años 90. En los bosques andinos, *R. rospigliosii* es una especie de alto valor ecológico, debido a su capacidad de colonizar terrenos con baja disponibilidad de nutrientes y permitir así el establecimiento de diversas especies andinas bajo el dosel, además de que genera refugio para la fauna silvestre (Marín, 1998). Asimismo, esta especie produce madera ideal para la construcción y la carpintería artesanal, por lo que las comunidades la utilizan con fines productivos (Marín, 1998).

En tal contexto, el presente estudio tuvo como objetivo estimar el potencial de captura de carbono de plantaciones maduras de *R. rospigliosii* establecidas con fines de restauración en la región Andina colombiana. En cumplimiento de este objetivo se evaluó la producción de biomasa y se generaron ecuaciones alométricas para determinar su productividad ecológica y su contribución en términos de captura de carbono.

Materiales y métodos

Área de estudio

El estudio se hizo en una plantación experimental de *R. rospigliosii* establecida en 1999 por la Federación Nacional de Cafeteros de Colombia y Smurfit-Westrock Colombia. La plantación está ubicada en el occidente del departamento del Cauca (municipio de El Tambo), Colombia, entre las coordenadas 2° 28' 0"-2° 29' 40" N y 76° 48' 30"-76° 50' 0" O (Figura 1), a una elevación aproximada de 1775 m. Según los datos de la estación meteorológica del lugar, la temperatura promedio anual es 19.4 °C y la precipitación media anual es 2298 mm con régimen de distribución bimodal y menor precipitación entre los meses de junio y septiembre (Ramírez et al., 2021). La zona corresponde a bosque húmedo premontano (bh-PM), según la clasificación de zonas de vida de Holdridge (1982).

El estudio se estableció con semillas recolectadas de un bosque natural al suroeste del departamento de Antioquia (municipio de Támesis, Colombia) en la finca La Playa. Las plántulas se produjeron en vivero y se sembraron en campo cuando alcanzaron 30 cm de altura. La plantación experimental tiene 8 ha y se estableció a una densidad de

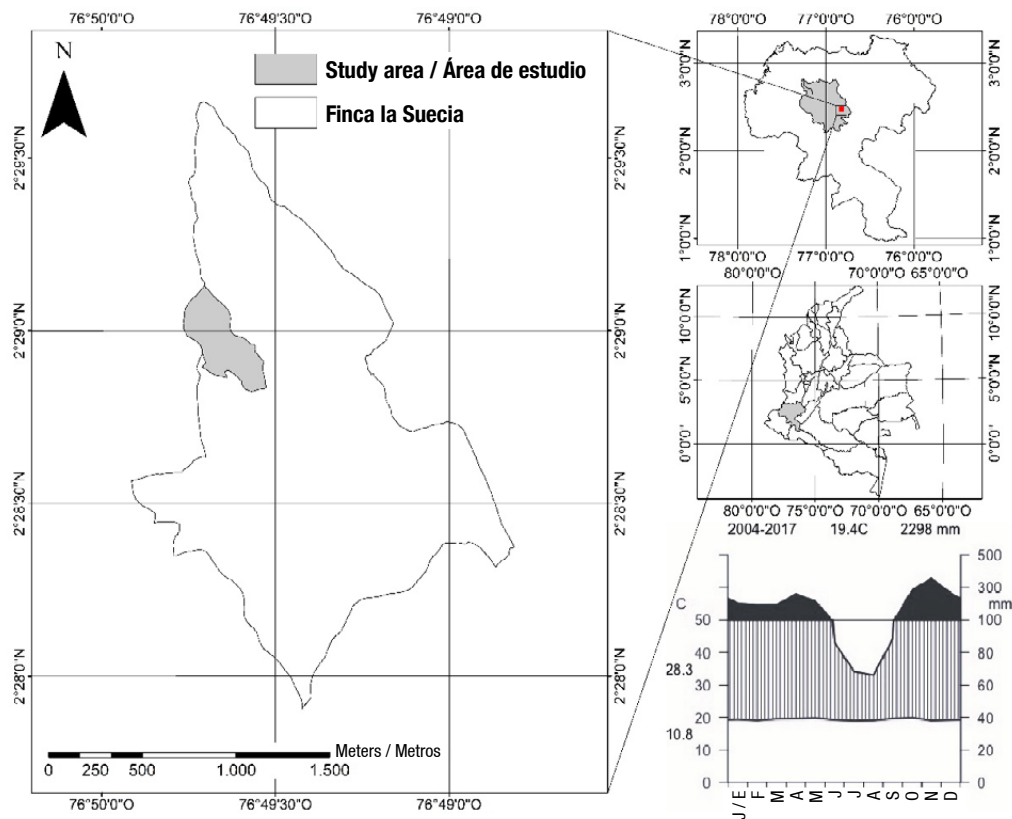


Figure 1. Location of the experimental *Retrophyllum rospigliosii* plantation in the Cauca department, Colombia.

Figura 1. Localización de la plantación experimental de *Retrophyllum rospigliosii* en el departamento del Cauca, Colombia.

Field methods

Initially, a plantation inventory was conducted to evaluate its condition and generate diameter class distributions. The diameter at breast height (DBH) of each tree was measured using a diameter tape, and total height was measured with a Vertex IV hypsometer. Diameter distributions were established, classifying the trees into six classes based on diameter size, ranging from the smallest (0.03 m) to the largest (0.42 m). From each diameter class, five individuals were selected for aboveground biomass quantification (30 in total) and two individuals for belowground biomass quantification (12 in total). This sampling method ensured the inclusion of individuals from all size categories present in the stand.

Aboveground biomass quantification

The trees selected for aboveground biomass quantification were cut down in 2019. Branches and leaves were separated from the main stem. In the field, the fresh biomass of the stem, branches, and leaves were weighed, and samples from each component were collected for moisture content and density

1666 árboles·ha⁻¹, la cual se ha reducido gradualmente por mortalidad y extracción de individuos a una densidad aproximada de 300 árboles·ha⁻¹.

Métodos en campo

Inicialmente se hizo un inventario de la plantación para determinar su estado y generar distribuciones por clases diamétricas. En cada árbol se midió el diámetro a la altura del pecho (DAP) con cinta diamétrica y la altura total con hipsómetro Vertex IV. Se establecieron distribuciones diamétricas en las que se clasificaron los árboles en seis clases según el tamaño de su diámetro, desde los más pequeños (0.03 m) hasta los más grandes (0.42 m). De cada clase diamétrica se seleccionaron cinco individuos para la cuantificación de la biomasa aérea (30 en total) y dos individuos para la cuantificación la biomasa subterránea (12 en total); de esta forma, se garantizó el muestreo de individuos de todos los tamaños que conforman el rodal.

Cuantificación de la biomasa aérea

Los árboles seleccionados para la cuantificación de la biomasa aérea se derribaron en el año 2019. Del fuste

measurements. The main stem of each tree was divided into ten equal-length sections, and the diameter at both ends of each section was measured to calculate the volume (Picard et al., 2012).

Belowground biomass quantification

A 2 x 3 m area was marked around each tree, according to the planting density of the plantation. Fine roots were then sampled every 30 cm from the center of the stump to the edge of the sampling area (1.5 m) using cylinders with a diameter of 10 cm and a depth of 30 cm. Finally, the root system of each tree was removed to evaluate coarse roots. The roots were cleaned to remove impurities and weighed in the field. Samples of both fine and coarse roots were taken to determine moisture content in the laboratory.

Volume, biomass, and carbon content estimation

In the laboratory, the density of each *R. rospigliosii* tissue was measured. The volume of each sample was determined using the water displacement method. Then, the samples of the stem, branches, leaves, and roots were placed in a drying oven to obtain their dry weight and assess moisture content. The samples were dried at 70 °C until constant weight and were weighed immediately to prevent any increase in weight due to air moisture. Moisture content of each component (Ch_i) was determined based on the dry weight of the sample of component i (ms_i) and the fresh weight of the sample of component i (mf_i) using the equation: $Ch_i = (ms_i/mf_i)$.

The volume of the stem sections was calculated using Smallian's equation:

$$V = \frac{\pi}{8} L (d_{in}^2 + d_{sn}^2)$$

where,

L = length (m) of the stem section

d_{in} = lower diameter (m) of stem section n

d_{sn} = upper diameter (m) of stem section n .

The biomass of each component (B_i) was calculated using the following equation:

$$B_i = Pf_i * Ch_i$$

where,

Pf_i = fresh weight (kg) of component i

Ch_i = moisture content (kg) of component i .

When the component was divided into parts, the dry weight was obtained by adding the dry weight of all the parts of component i .

se separaron las ramas y las hojas. En campo se pesó la biomasa fresca del fuste, ramas y hojas y se tomaron muestras de cada componente para la cuantificación de humedad y densidad. El fuste principal de cada árbol se dividió en decimos de igual longitud; de cada décimo se tomaron medidas del diámetro en cada extremo de la sección para el cálculo del volumen (Picard et al., 2012).

Cuantificación de la biomasa subterránea

Se hizo una delimitación de 2 x 3 m alrededor de cada árbol según la densidad de siembra de la plantación. Posteriormente, las raíces finas se muestrearon cada 30 cm desde el centro del tocón hasta el borde del área de muestreo (1.5 m) con ayuda de cilindros de 10 cm de diámetro y 30 cm de profundidad. Finalmente, el sistema radicular de cada árbol se desenterró para la evaluación de las raíces gruesas. Las raíces se limpiaron para eliminar impurezas y se pesaron en campo. Se tomaron muestras de raíces finas y gruesas con el fin de determinar su contenido de humedad en el laboratorio.

Determinación del volumen, biomasa y carbono

En el laboratorio se determinó la densidad de cada tejido de *R. rospigliosii*. Para ello, se midió el volumen de cada muestra a través del método de desplazamiento de agua. Posteriormente, las muestras de fuste, ramas, hojas y raíces se llevaron al horno de secado para obtener el peso seco y así determinar contenido de humedad. Las muestras se secaron a 70 °C hasta alcanzar peso constante y se pesaron inmediatamente para evitar el incremento de peso debido a la humedad del aire. El contenido de humedad de cada componente (Ch_i) se determinó a partir del peso seco de la muestra del componente i (ms_i) y el peso fresco de la muestra del componente i (mf_i) mediante la ecuación $Ch_i = (ms_i/mf_i)$.

El volumen de las trozas se obtuvo mediante la ecuación de Smallian:

$$V = \frac{\pi}{8} L (d_{in}^2 + d_{sn}^2)$$

donde,

L = longitud (m) de la troza

d_{in} = diámetro inferior (m) de la troza n

d_{sn} = diámetro superior (m) de la troza n .

La biomasa de cada componente (B_i) se calculó con la siguiente ecuación:

$$B_i = Pf_i * Ch_i$$

donde,

Pf_i = peso fresco (kg) del componente i

Ch_i = contenido de humedad (kg) del componente i .

The aboveground biomass expansion factors (*BEF*) were estimated based on the dry biomass (*B*) of the stem, branches, and leaves. The factors were calculated using the equation $BEF = [(B_{stem} + B_{leaf} + B_{branch}) / B_{stem}]$.

Finally, to determine the elemental carbon content of the plant tissues of *R. rospigliosii*, 84 samples were taken from the 12 trees in which both aboveground and belowground biomass were quantified. The elemental carbon analyses were conducted at the Max Planck Institute for Biogeochemistry in Jena, Germany. Carbon content was measured using a carbon-nitrogen analyzer (Vario Max Cube, Elementar GmbH, Germany), and the results were expressed as percentage.

Data processing

Aboveground and belowground biomass were treated separately and then combined to estimate total biomass. Two total biomass models were fitted; the first used the belowground biomass values from the 12 sampled trees, while the second used the estimated belowground biomass values from the 30 sampled trees based on the model obtained for this component. Data normality was assessed using the Shapiro-Wilk test, and then the variation in volume, biomass, and carbon was related to the DBH and height by fitting linear and nonlinear models from Berkhout, Kopecky, Husch, and Spurr, both in their linear and nonlinear forms as proposed by Loetsch et al. (1973) (Table 1). The selected regression models were those with the highest likelihood, meaning those with the lowest AIC (Akaike Information Criterion) and the smallest residual standard error. Additionally, the coefficient of determination (R^2) and significance at 95 % confidence were used for model selection. Finally, the normality of residuals was evaluated with the Shapiro-Wilk test, and homoscedasticity was assessed using the Breusch-Pagan test. All analyses were conducted using R software version 4.3.2 (R Core Team, 2023).

Cuando el componente estaba dividido por partes, el peso seco se obtuvo sumando el peso seco de todas las partes del componente *i*.

Los factores de expansión en biomasa aérea (*FEB*) se estimaron a partir de la biomasa seca (*B*) del fuste, ramas y hojas. Los factores se calcularon con la ecuación $FEB = [(B_{fuste} + B_{hoja} + B_{rama}) / B_{fuste}]$.

Finalmente, para determinar el contenido de carbono elemental de los tejidos vegetales de *R. rospigliosii* se tomaron 84 muestras provenientes de los 12 árboles en los cuales se cuantificó biomasa aérea y subterránea. Los análisis de carbono elemental se hicieron en el Instituto Max Planck de biogeoquímica en Jena, Alemania. El carbono se cuantificó en un analizador de carbono-nitrógeno (Vario Max Cube, Elementar GmbH, Alemania) y el resultado se presentó en porcentaje.

Procesamiento de datos

La biomasa aérea y subterránea se trató independiente y, posteriormente, conjuntamente para estimar la biomasa total. Se ajustaron dos modelos de biomasa total; en el primero se usaron los valores de biomasa subterránea de los 12 árboles muestreados, y en el segundo, los valores estimados de la biomasa subterránea de los 30 árboles muestreados con el modelo obtenido para este componente. La normalidad de los datos se evaluó mediante una prueba de Shapiro-Wilk y posteriormente la variación del volumen, la biomasa y el carbono se relacionaron respecto al DAP y la altura, mediante el ajuste a los modelos lineales y no lineales de Berkhout, Kopecky, Husch, y Spurr en su forma lineal y no-lineal según las ecuaciones propuestas por Loetsch et al. (1973) (Cuadro 1). Los modelos de regresión seleccionados fueron los que tuvieron mayor verosimilitud; es decir, los que presentaron menor AIC (criterio de información de Akaike) y error estándar residual más bajo. Adicionalmente se usó, con fines de selección, el

Table 1. Regression models to establish allometric equations for *Retrophyllum rospigliosii* (according to Loetsch et al., 1973).

Cuadro 1. Modelos de regresión para establecer las ecuaciones alométricas de *Retrophyllum rospigliosii* (según Loetsch et al., 1973).

Name/Nombre	Model/Modelo	
	Linear	Lineal
Berkhout	$y = a + b \text{ DBH}$	$y = a + b \text{ DAP}$
Kopecky	$Y = a + b (\text{DBH}^2)$	$Y = a + b (\text{DAP}^2)$
Spurr	$y = a + b (\text{DBH}^2 \text{H})$	$y = a + b (\text{DAP}^2 \text{H})$
	Non-linear	No lineal
Husch (potential)	$y = a \text{DBH}^b$	$y = a \text{DAP}^b$
Spurr	$y = a (\text{DBH}^2 \text{H})^b$	$y = a (\text{DAP}^2 \text{H})^b$

In the models *y* can represent volume (*V*, m³), biomass (*B*, Mg), or carbon (*C*, Mg). DBH corresponds to diameter at breast height (1.3 m) and *H* to total height (m). The letters *a* and *b* correspond to the model parameters.

En los modelos *y* puede ser volumen (*V*, m³), biomasa (*B*, Mg) o carbono (*C*, Mg). DAP corresponde al diámetro a la altura del pecho (1.3 m) y *H* a la altura total (m). Las letras *a* y *b* corresponden a parámetros del modelo.

Results

Diameter class distribution

According to the initial sampling, trees had an average DBH of 0.22 ± 0.04 m and a height of 10.97 ± 1.25 m (Table 2). The individuals were divided into six diameter classes ranging from 3 to 42 cm, with a width of 6.67 cm, showing a typical unimodal distribution characteristic of forest plantations.

Aboveground and belowground biomass

As shown in Table 2, the average volume of *R. rospigliosii* trees was 0.27 m^3 with a form factor of 0.52. The basic wood density was $0.36 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$. On average, 0.14 Mg of aboveground biomass and 0.05 Mg of belowground biomass were obtained per tree. The greatest variability in biomass was recorded in the stem and coarse roots, while the lowest variability was observed in the biomass of leaves.

Allometric models

The selected models showed adjustments exceeding 94 %, higher likelihood, and lower standard error compared to the other evaluated models (Table 3; Figure 2). Additionally, the residuals of the selected models were normal, generally randomly distributed, and never exceeded 0.06 Mg (Appendices 1 and 2). The Husch model provided the best fit for estimating tree volume, biomass (aboveground and belowground), and carbon sequestration. For total biomass, the best-fitting model was Spurr's nonlinear form, using belowground

coeficiente de determinación (R^2) y significancia del 95 %. Finalmente, la normalidad de residuos se evaluó con la prueba de Shapiro-Wilk y la homocedasticidad con la prueba de Breusch Pagan. En todos los análisis se empleó el programa R en su versión 4.3.2 (R Core Team, 2023).

Resultados

Distribución de clases diamétricas

De acuerdo con el muestreo inicial, los individuos presentaron un promedio de 0.22 ± 0.04 m de DAP y 10.97 ± 1.25 m de altura (Cuadro 2). Los individuos se dividieron en seis clases diamétricas entre los 3 y 42 cm de diámetro con amplitud de 6.67 cm, donde se evidenció una distribución unimodal típica de plantaciones forestales.

Biomasa aérea y subterránea

Acorde con el Cuadro 2, el volumen promedio de los árboles de *R. rospigliosii* fue 0.27 m^3 con un factor de forma de 0.52. La densidad básica de la madera fue $0.36 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$. En promedio, se obtuvieron 0.14 Mg de biomasa aérea y 0.05 Mg de biomasa subterránea por árbol. La mayor variabilidad de la biomasa se registró en el fuste y en las raíces gruesas, mientras que la menor variabilidad se exhibió en la biomasa de las hojas.

Modelos alométricos

Los modelos seleccionados presentaron ajustes superiores de 94 %, mayor verosimilitud y menor error estándar respecto al resto de modelos evaluados

Table 2. Variables analyzed for the biomass quantification of *Retrophyllum rospigliosii*.

Cuadro 2. Variables analizadas para la cuantificación de biomasa de *Retrophyllum rospigliosii*.

Variables	Number of trees / Número de árboles	Minimum / Mínimo	Maximum / Máximo	Average per tree / Promedio por árbol
DBH (m)/DAP (m)	30	0.03	0.42	0.22 ± 0.04
Height (m)/Altura (m)	30	3.90	15.80	10.97 ± 1.25
Stem volume (m^3)/Volumen del fuste (m^3)	30	0.00	0.81	0.27 ± 0.09
Form factor/Factor de forma	30	0.38	0.78	0.52 ± 0.03
Density ($\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$)/Densidad ($\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$)	30	0.32	0.40	0.36 ± 0.01
Stem biomass (Mg)/Biomasa fuste (Mg)	30	0.00	0.27	0.09 ± 0.03
Leaf biomass (Mg)/Biomasa hoja (Mg)	30	0.00	0.03	0.01 ± 0.00
Branches biomass (Mg)/Biomasa ramas (Mg)	30	0.00	0.18	0.04 ± 0.02
Coarse root biomass (Mg)/Biomasa raíz gruesa (Mg)	12	0.00	0.11	0.04 ± 0.02
Fine root biomass (Mg)/Biomasa raíz fina (Mg)	12	0.00	0.02	0.01 ± 0.00
Aboveground biomass (Mg)/Biomasa aérea (Mg)	30	0.00	0.48	0.14 ± 0.05
Belowground biomass (Mg)/Biomasa subterránea (Mg)	12	0.00	0.12	0.05 ± 0.02
Total biomass (Mg)/Biomasa total (Mg)	12	0.00	0.60	0.20 ± 0.11

DBH: Diameter at breast height (1.3 m). \pm standard error of the mean.

DAP: diámetro a la altura del pecho (1.3 m). \pm error estándar de la media.

Table 3. Summary of selected allometric models for estimating volume, biomass, and carbon of *Retrophyllum rospigliosii*.**Cuadro 3. Resumen de los modelos alométricos seleccionados para la estimación del volumen, biomasa y carbono de *Retrophyllum rospigliosii*.**

Model/Modelo			Estimated/ Estimado	Standard error/ Error estándar	T value/ Valor t	T probability/ Prob. t	N	AIC	Adjusted R ² / R ² ajustado (%)	Residual standard error/ Error estándar residual	
Volume (m ³)/ Volumen (m ³)	Husch	$V = aDBH^b$	a	5.10	0.35	14.38	< 0.001	29	-125.24	98.86	0.03
			b	2.07	0.06	32.83	< 0.001				
Aboveground biomass (Mg)/ Biomasa aérea (Mg)	Husch	$B = aDBH^b$	a	2.84	0.30	9.34	< 0.001	30	-144.40	97.19	0.02
			b	2.07	0.10	22.00	< 0.001				
Belowground biomass (Mg)/ Biomasa subterránea (Mg)	Husch	$B = aDBH^b$	a	0.36	0.07	5.49	< 0.001	11	-67.97	97.36	0.01
			b	1.32	0.15	8.62	< 0.001				
Total biomass a (Mg)/ Biomasa total a (Mg)	Spurr	$B = a(DBH^2H)^b$	a	0.24	0.00	53.14	< 0.001	29	-143.49	99.60	0.02
			b	0.81	0.03	29.46	< 0.001				
Total biomass b (Mg)/ Biomasa total b (Mg)	Spurr	$B = a(DBH^2H)^b$	a	0.25	0.01	21.62	< 0.001	12	-42.72	98.50	0.03
			b	0.82	0.06	13.87	< 0.001				
Aboveground carbon (Mg)/ Carbono aéreo (Mg)	Husch	$C_a = aDBH^b$	a	1.80	0.24	7.54	< 0.001	12	-75.67	98.46	0.01
			b	2.34	0.13	18.57	< 0.001				
Belowground carbon (Mg)/ Carbono subterráneo (Mg)	Husch	$C_s = aDBH^b$	a	0.17	0.03	6.26	< 0.001	12	-94.71	94.40	0.00
			b	1.31	0.13	9.81	< 0.001				
Total carbon (Mg)/ Carbono total (Mg)	Husch	$C_T = aDBH^b$	a	1.72	0.20	8.51	< 0.001	12	-70.96	98.48	0.01
			b	2.06	0.11	18.95	< 0.001				

DBH: diameter at breast height (1.3 m), H: height (m), n: number of trees, AIC: Akaike Information Criterion.

DAP: diámetro a la altura del pecho (1.3 m), H: altura (m), n: número de árboles, AIC: criterio de información de Akaike.

biomass estimates from all sampled trees. Finally, for fitting the models to estimate volume, belowground biomass, and total biomass (a), data from one individual was eliminated (N = 11 and N = 29) since was very far from the regression curve, probably because it was the tree selected with the smallest diameter and height.

The model that best fitted the biomass of the stem, branches, leaves, coarse roots, and fine roots was the Husch model (Table 4; Figure 3). It was observed that the aboveground components achieved a better fit (>80 %) compared to the belowground components (ranging between 56 % and 77 %).

Biomass expansion factor

The average BEF was 1.50, with a minimum value of 1.16 and a maximum of 1.90 (Table 5). In general, the average values increased as the diameter class increased.

(Cuadro 3; Figura 2). Adicionalmente, los residuos de los modelos seleccionados son normales, se distribuyeron generalmente en forma aleatoria y nunca superaron más de 0.06 Mg (Apéndices 1 y 2). En general, el modelo de Husch fue el que mejor se ajustó para la estimación del volumen, biomasa (aérea y subterránea) y captura de carbono de los árboles. En el caso de la biomasa total, el modelo que mejor se ajustó fue el de Spurr en su forma no lineal y usando las estimaciones de biomasa subterránea de todos los árboles muestreados. Finalmente, para el ajuste de los modelos de la estimación del volumen, biomasa subterránea y biomasa total (a) se eliminó el dato de un individuo (N = 11 y N = 29) muy alejado de la curva de regresión, probablemente por ser el árbol seleccionado con el menor diámetro y altura.

El modelo que mejor se ajustó a la biomasa del fuste, ramas, hojas, raíces gruesas y raíces finas fue el de Husch (Cuadro 4; Figura 3). Se evidenció que los

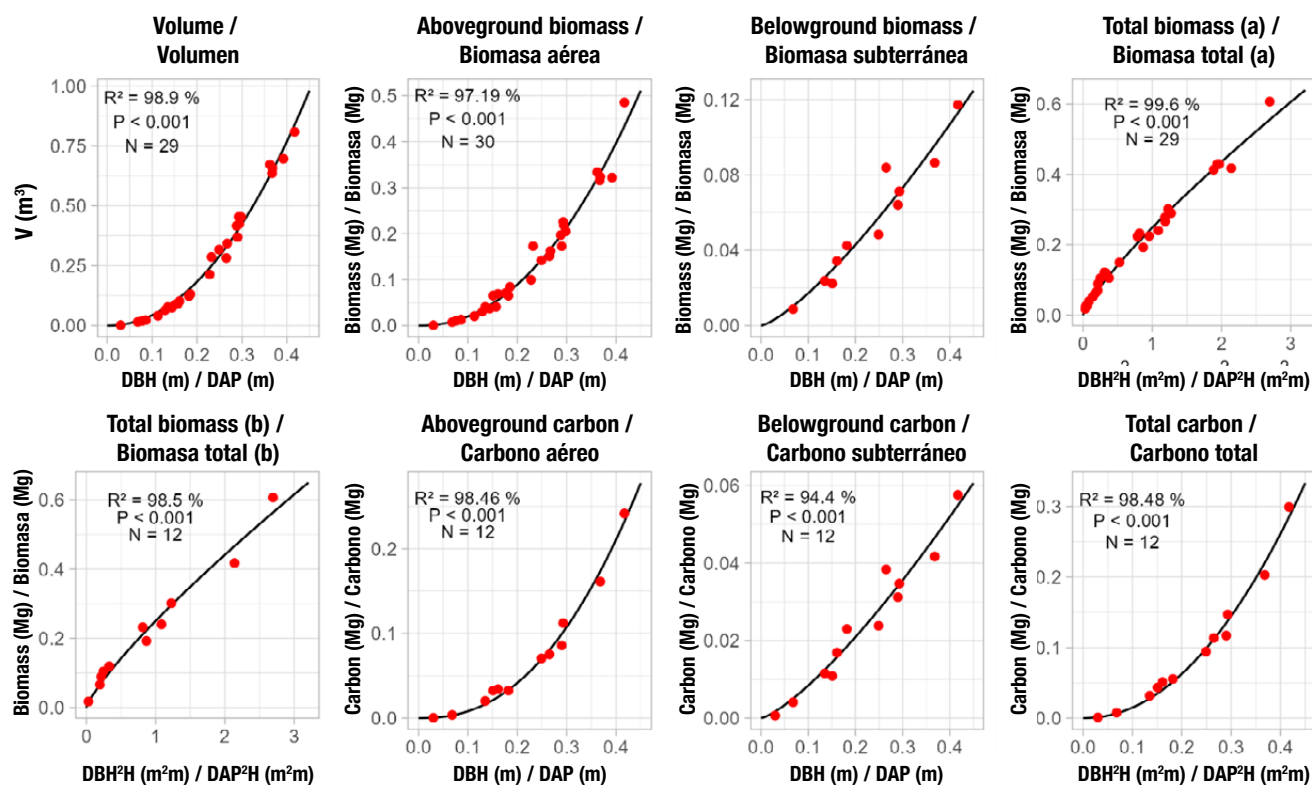


Figure 2. Models fitted for the estimation of volume, biomass, and carbon of *Retrophyllum rospigliosii*. DBH: Diameter at breast height, H: Height.

Figura 2. Modelos ajustados para la estimación del volumen, biomasa y carbono de *Retrophyllum rospigliosii*. DAP: diámetro a la altura del pecho, H: altura.

Table 4. Summary of statistics according to the Husch model for estimating the biomass (B) of each component (Mg) of *Retrophyllum rospigliosii*.

Cuadro 4. Resumen de los estadísticos según el modelo de Husch para estimar la biomasa (B) de cada componente (Mg) de *Retrophyllum rospigliosii*.

Model/ Modelo	Estimated/ Estimado	Standard error/ Error estándar	T value/ Valor t	T probability/ Prob. t	n	AIC	Adjusted R ² (%) / R ² ajustado (%)	Residual standard error/ Error estándar residual		
Stem/ Fuste	$B = aDBH^b$	a	1.38	0.14	9.71	< 0.001	30	-170.40	96.94	0.01
		b	1.91	0.09	20.90	< 0.001				
Branches/ Ramas	$B = aDBH^b$	a	2.12	0.52	4.07	< 0.001	30	-177.91	97.25	0.01
		b	3.00	0.24	12.64	< 0.001				
Leaves/ Hojas	$B = aDBH^b$	a	0.11	0.03	4.20	< 0.001	29	-242.65	80.89	0.00
		b	1.69	0.21	8.20	< 0.001				
Coarse roots / Raíces gruesas	$B = aDBH^b$	a	0.27	0.09	3.00	< 0.001	12	-63.46	77.09	0.01
		b	1.23	0.28	4.48	< 0.001				
Fine roots/ Raíces finas	$B = aDBH^b$	a	0.04	0.02	2.26	< 0.001	12	-98.62	56.26	0.00
		b	1.03	0.35	2.94	< 0.001				

DBH: diameter at breast height (1.3 m), n: number of trees, AIC: Akaike Information Criterion.

DAP: diámetro a la altura del pecho (1.3 m), n: número de árboles, AIC: criterio de información de Akaike.

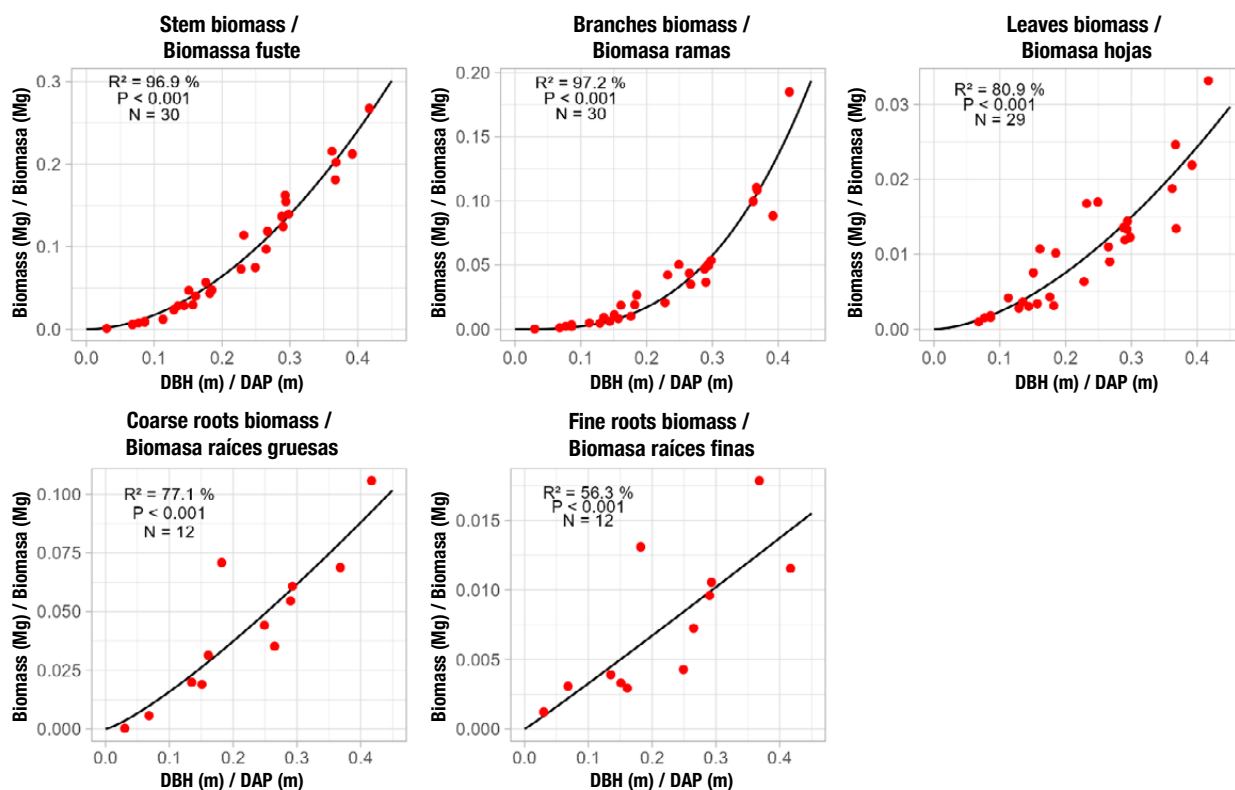


Figure 3. Models fitted to estimate the biomass of each component of *Retrophyllum rospigliosii*. DBH: Diameter at breast height. Figura 3. Modelos ajustados para estimar la biomasa de cada componente de *Retrophyllum rospigliosii*. DAP: diámetro a la altura del pecho.

Table 5. Biomass expansion factor (BEF) for aboveground biomass of *Retrophyllum rospigliosii* trees per diameter class. Cuadro 5. Factor de expansión de biomasa aérea (FEB) para árboles de *Retrophyllum rospigliosii* por clase diamétrica.

BEF/FEB	Class I/Clase I 2.0 - 8.7	Class II/Clase II 8.7 - 15.3	Class III/Clase III 15.3 - 22.0	Class IV/Clase IV 22.0 - 28.7	Class V/Clase V 28.7 - 35.3	Class VI/Clase VI 35.3 - 42.0
Average (cm)/ Promedio (cm)	1.40 ± 0.17	1.45 ± 0.19	1.54 ± 0.22	1.53 ± 0.22	1.42 ± 0.04	1.65 ± 0.13
Range (cm)/ Rango (cm)	1.16-1.62	1.32-1.77	1.25-1.78	1.37-1.90	1.39-1.47	1.52-1.82

± standard error of the mean.

± error estándar de la media.

Biomass per tree section

The tree section contributing the most to total biomass was the stem, with 46.65 %, followed by coarse roots at 22.67 %, branches at 20.12 %, fine roots at 5.36 %, and leaves at 5.2 % (Table 6).

Carbon per tree section

The carbon content was similar among sections (around 49 %), except for fine roots, which had 41.08 % (Figure 4). On average, each tree stores 0.09 ± 0.06 Mg C. Therefore, it is estimated that a plantation of *R. rospigliosii* with 1666 trees·ha⁻¹ stores a total of 156.09 ± 92.80 Mg C·ha⁻¹ (Figure 4).

componentes de la sección aérea tuvieron mayor ajuste (>80 %) que los componentes de la sección subterránea (entre 56 y 77 %).

Factor de expansión de biomasa

El FEB promedio fue 1.50 con valor mínimo de 1.16 y máximo de 1.90 (Cuadro 5). En general, los valores promedio aumentaron a medida que la clase diamétrica incrementó.

Biomasa por sección del árbol

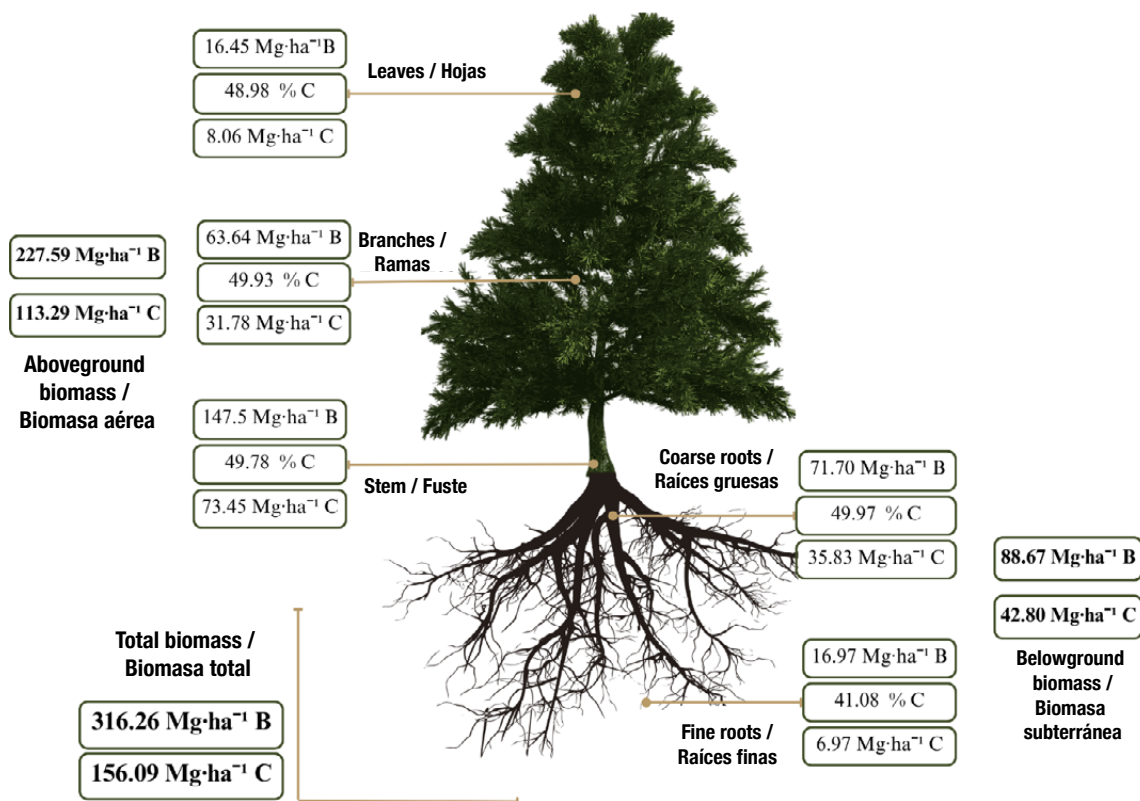
La sección del árbol que más aportó a la biomasa total fue el fuste con 46.65 %, seguido por las raíces gruesas

Table 6. Biomass of each section of *Retrophyllum rospigliosii* tree.**Cuadro 6. Biomasa por sección del árbol de *Retrophyllum rospigliosii*.**

Biomass / Biomasa	Stem / Fuste	Leaves / Hojas	Branches / Ramas	Coarse roots / Raíz gruesa	Fine roots / Raíz fina
Aboveground (%) / Aérea (%)	67.59 ± 7.80	8.74 ± 3.88	23.67 ± 6.93	-	-
Belowground (%) / Subterránea (%)	-	-	-	81.07 ± 12.42	18.93 ± 12.42
Total (%)	46.65 ± 8.37	5.20 ± 2.06	20.12 ± 6.76	22.67 ± 9.22	5.36 ± 8.69

Average value ± standard error.

Valor promedio ± error estándar.

**Figure 4. Biomass and carbon Content per tree section of *Retrophyllum rospigliosii*.****Figura 4. Contenido de biomasa y carbono por sección del árbol de *Retrophyllum rospigliosii*.**

Discussion

Based on destructive sampling, the average volume per tree of *R. rospigliosii* was recorded as 0.27 m³, with a form factor of 0.50 and a wood basic density of 0.36 g·cm⁻³. According to these results, the shape of the trees can be classified as the paraboloid dendrometric type (Kershaw et al., 2017). A study of a forest dominated by *R. rospigliosii* and *Prumnopitys harmsiana* (Pilg.) Laub. in Ecuador reported a volume of 510 m³·ha⁻¹, much higher than the estimate for the study area (300 m³·ha⁻¹) (Yaguana et al., 2012). Regarding wood density, it can

con 22.67 %, las ramas con 20.12 %, raíces finas con 5.36 % y por último las hojas con 5.2 % (Cuadro 6).

Carbono por sección del árbol

El contenido de carbono fue similar entre las secciones (alrededor del 49 %), con excepción de las raíces finas que tuvieron 41.08 % (Figura 4). Se estima que, en promedio, cada árbol almacena 0.09 ± 0.06 Mg C. Así, se estima que una plantación de *R. rospigliosii* con 1 666 árboles·ha⁻¹ almacena en total 156.09 ± 92.80 Mg C·ha⁻¹ (Figura 4).

be classified as soft and light, coinciding with the basic density ($0.34 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$) of the same species reported by Portillo et al. (2019). However, these density values are much lower than those presented by Baker et al. (2004), who measured $0.57 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ in wood from natural forests. A similar trend was reported for 19 species planted for restoration purposes in tropical areas of Ghana, where the wood density of the species was lower compared to individuals in forests (Yeboah et al., 2014). This reduction is because individuals experience greater intraspecific competition in plantations than under natural conditions (Nguyen et al., 2014). The reduction in basic wood density of plantation species is also evidence of a possible reduction in the rate of carbon sequestration (Yeboah et al., 2014), an aspect that should be considered in the management of plantations for restoration purposes.

Regarding the biomass per *R. rospigliosii* tree, average values of 0.14 Mg of aboveground biomass and 0.05 Mg of belowground biomass were found. In all individuals of the plantation, aboveground biomass was greater than belowground biomass. However, the belowground component plays an important role, as this compartment contributes the most to the total biomass after the stem, as described by Rodríguez et al. (2019) in *Pinus patula* Schlttdl. & Cham. trees.

The Husch model provided the best fit for estimating aboveground, belowground, and total carbon, as well as for estimating aboveground and belowground biomass of *R. rospigliosii*, while the nonlinear Spurr model was a better fit for estimating total biomass. It is important to emphasize that, overall, all models showed optimal fits to the dataset ($R^2 > 94 \%$). The Husch and Spurr models have been widely used in forestry estimation due to their good fit and ability to generate accurate predictions (Kiviste et al., 2002).

In the present study, the biomass of each component of *R. rospigliosii* was estimated using the Husch model. A higher fit was observed for the models of the aboveground tree components ($R^2 > 80 \%$), while the estimation of coarse root biomass ($R^2 = 77 \%$) and fine root biomass ($R^2 = 56 \%$) showed lower fits. These results are consistent with reports on biomass and carbon estimation in other conifer species. For instance, in *Cupressus lusitanica* Mill. in Costa Rica, Fonseca-González et al. (2023) reported a 97 % fit for total biomass using the Husch model. In Mexico, Carrillo et al. (2014) used the Husch model to estimate total carbon in *Pinus montezumae* Lamb. ex Gordon & Glend, achieving fits greater than 98 %, and later obtained a 98 % fit when estimating the aboveground biomass of *Pinus hartwegii* Lindl. (Carrillo et al., 2016). Similarly, Rodríguez et al. (2019) estimated the root biomass of 90 *Pinus patula* trees with a 92 % fit and total biomass with a 97 % fit. Other plantation broadleaf species, such as *Tectona*

Discusión

Mediante el muestreo destructivo, en promedio por árbol de *R. rospigliosii*, se registró volumen de 0.27 m^3 , factor de forma de 0.50 y densidad básica de la madera de $0.36 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$. A partir de estos resultados se puede clasificar la forma de los árboles en el tipo dendrométrico paraboloide (Kershaw et al., 2017). La evaluación de un bosque dominado por *R. rospigliosii* y *Prumnopitys harmsiana* (Pilg.) de Laub. en Ecuador reportó un volumen de $510 \text{ m}^3\cdot\text{ha}^{-1}$, muy superior al estimado para el área de estudio ($300 \text{ m}^3\cdot\text{ha}^{-1}$) (Yaguana et al., 2012). En cuanto a la densidad de la madera, esta se puede clasificar como blanda y liviana, coincidiendo con la densidad básica ($0.34 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$) de la misma especie reportada por Portillo et al. (2019). No obstante, estos valores de densidad son mucho más bajos que los expuestos por Baker et al. (2004) con mediciones de $0.57 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ en madera de bosque natural. Una tendencia similar fue reportada para 19 especies plantadas con fines de restauración en zonas tropicales de Ghana, donde la densidad específica de la madera de las especies fue menor en comparación con la de individuos presentes en los bosques (Yeboah et al., 2014). Probablemente, dicha reducción se deba a que los individuos experimentan mayor competencia intraespecífica en las plantaciones que en condiciones naturales (Nguyen et al., 2014). La disminución de la densidad básica de la madera de las especies provenientes de plantaciones evidencia también una posible reducción en la tasa de captura de carbono (Yeboah et al., 2014), aspecto que debe ser considerado en la gestión de las plantaciones con fines de restauración.

En cuanto a la biomasa por árbol de *R. rospigliosii*, se encontraron valores promedio de 0.14 Mg de biomasa aérea y 0.05 Mg de biomasa subterránea. En todos los individuos de la plantación, la biomasa aérea fue mayor que la biomasa subterránea. No obstante, el componente subterráneo juega un papel importante, ya que este compartimento es el que más aporta a la biomasa total después del fuste, como lo exponen Rodríguez et al. (2019) en árboles de *Pinus patula* Schlttdl. & Cham.

El modelo de Husch presentó el mejor ajuste para la estimación del carbono aéreo, subterráneo y total, así como de la biomasa aérea y subterránea de *R. rospigliosii*, mientras que, el modelo no lineal de Spurr se ajustó mejor para la estimación de biomasa total. Es importante resaltar que, en general, todos los modelos presentaron ajustes óptimos al conjunto de datos ($R^2 > 94 \%$). Los modelos de Husch y Spurr han sido usados ampliamente en la estimación forestal, se caracterizan por su buen ajuste y por generar predicciones precisas (Kiviste et al., 2002).

En el presente estudio, la biomasa por componente de *R. rospigliosii* se estimó con el modelo de Husch y se observó un mayor ajuste en los modelos de los componentes

grandis L. f. in Guatemala, showed fits of 78 % using the Husch model (López et al., 2018).

El average BEF for *R. rospigliosii* was 1.50 which is higher than the constant proposed by the Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) for conifer plantations in the tropics, set at 1.30 (IPCC, 2019). In Brazil, an average BEF of 1.47 was reported for *Pinus elliottii* Engelm. and *Pinus taeda* L., established under conditions similar to those of this study (Sanquetta et al., 2011). In Costa Rica, an average BEF of 1.54 was calculated for individuals of *C. lusitanica* from plantations (Fonseca-González et al., 2023). These results are similar to those found for *R. rospigliosii* and underscore the importance of calculating specific BEFs, as relying on the IPCC constant of 1.30 could lead to underestimations in carbon estimation.

Regarding the biomass contribution per tree section for *R. rospigliosii*, the stem was the largest contributor to total biomass, followed by coarse roots, branches, fine roots, and finally, leaves. These findings are consistent with other conifers, where most of biomass is concentrated in the stem (Rodríguez et al., 2019). Notably, the root component of *R. rospigliosii* accounted for 35.35 % of the total biomass, highlighting its significance in the quantification of this species' biomass. Carbon content across components was similar (approximately 49 %), except for fine roots, where the content was lower and exhibited greater variability ($41.08 \% \pm 5.02 \%$). In other planted conifer species, carbon content ranged between 44 % and 49 % for tree components, similar to those observed in *R. rospigliosii* (Hernández-Vera et al., 2017; Pompa-García et al., 2017).

Lastly, on average, one hectare of *R. rospigliosii* with 1666 trees stores 316.26 ± 187.26 Mg of biomass and 156.09 ± 92.80 Mg C. These values are low compared to those reported for other conifer plantations and that at the end of their cycle (~15 to 20 years) can store up to 230 Mg C·ha⁻¹ (Cook et al., 2014). Additionally, carbon storage is lower than that reported in premontane moist forests in Colombia which is between 149 and 235 Mg C·ha⁻¹, with significantly lower densities (Alvarez et al., 2012; Yepes et al., 2016). Although no data were found on biomass and carbon sequestration of *R. rospigliosii* in natural forests in Colombia, reports on diameters and heights of individuals are considerably greater under these conditions, reaching up to 30 m in height and more than 1 m DBH (Marín, 1998).

Conclusions

Biomass accumulation and carbon storage were estimated in 20-year-old experimental plantations of *Retrophyllum rospigliosii* established for restoration

aéreos del árbol ($R^2 > 80 \%$) y menor en la estimación de la biomasa de las raíces gruesas ($R^2 = 77 \%$) y finas ($R^2 = 56 \%$). Los resultados coinciden con los reportes de estimación de la biomasa y carbono en otras especies de coníferas. Por ejemplo, para *Cupressus lusitanica* Mill. en Costa Rica, Fonseca-González et al. (2023) reportan ajustes del 97 % en la biomasa total con el modelo de Husch. En México, con el modelo de Husch, Carrillo et al. (2014) estimaron carbono total en *Pinus montezumae* Lamb. ex Gordon & Glend con ajustes mayores de 98 %, luego obtuvieron un ajuste de 98 % al estimar la biomasa aérea de *Pinus hartwegii* Lindl. (Carrillo et al., 2016); asimismo, Rodríguez et al. (2019) estimaron la biomasa de las raíces de 90 árboles de *Pinus patula* con un ajuste de 92 % y biomasa total con un ajuste de 97 %. Otras especies latifoliadas de plantación como *Tectona grandis* L. f en Guatemala presentaron ajustes del 78 % con el modelo de Husch (López et al., 2018).

El FEB promedio para *R. rospigliosii* fue 1.50. Este es mayor que la constante propuesta por el Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC, por sus siglas en inglés) para plantaciones de coníferas en el trópico que es de 1.30 (IPCC, 2019). En Brasil se reportó un FEB promedio de 1.47 para *Pinus elliottii* Engelm. y *Pinus taeda* L. establecidas en condiciones similares a las de este estudio (Sanquetta et al., 2011). En Costa Rica, se calculó un FEB promedio de 1.54 para individuos de *C. lusitanica* procedentes de plantaciones (Fonseca-González et al., 2023). Estos resultados son similares a los encontrados para *R. rospigliosii* y evidencia la necesidad de calcular FEB específicos, ya que se pueden generar subestimaciones en la estimación del carbono haciendo uso de la constante de 1.30 propuesta por el IPCC.

Respecto al aporte de biomasa por sección del árbol de *R. rospigliosii*, el fuste fue el componente que más aportó a la biomasa total, seguido por las raíces gruesas, ramas, raíces finas y por último las hojas. Estos resultados son comunes en coníferas, donde la mayor cantidad de biomasa se encuentra acumulada en el fuste (Rodríguez et al., 2019). Cabe resaltar que el componente radicular de *R. rospigliosii* aportó 35.35 % de la biomasa total, evidenciando la importancia de este componente en la cuantificación de la biomasa de los árboles de esta especie. Los contenidos de carbono por componente fueron similares entre ellos (alrededor del 49 %), excepto en las raíces finas donde el contenido fue menor y presentó mayor variabilidad ($41.08 \% \pm 5.02 \%$). En otras especies de coníferas plantadas se encontraron contenidos de carbono que varían entre 44 % y 49 % para los componentes de los árboles, similares a los encontrados para *R. rospigliosii* (Hernández-Vera et al., 2017; Pompa-García et al., 2017).

Finalmente, en promedio, una hectárea de *R. rospigliosii* con 1666 árboles almacena 316.26 ± 187.26 Mg de

purposes in the Colombian Andes. Individuals of this species, grown in high-density monospecific plantations, exhibited relatively low biomass values ($316.26 \pm 187.26 \text{ Mg}\cdot\text{ha}^{-1}$) and carbon sequestration ($156.08 \pm 92.80 \text{ Mg C}\cdot\text{ha}^{-1}$) compared to those in natural forests. The lack of biodiversity in monospecific plantations could limit productivity by reducing the potential for complementarity and facilitation. Given the large size attained by *R. rospigliosii* under natural conditions, this species demonstrates significant potential for carbon sequestration in stem. Therefore, restoration efforts should prioritize the enrichment of degraded forests with this species or its inclusion in agroforestry systems.

Acknowledgments

To the members of the Seedbed for Applied Silviculture of the Cauca University for their collaboration in the development of the field study and to the company Smurfit-Westrock Colombia for providing the experimental sites and for their logistical support for this work.

Conflict of interest

The authors declare no economic conflicts of interest or personal relationships that could have influenced the research presented in this article.

End of English version

References / Referencias

- Affleck, D. L. R. (2019). Aboveground biomass equations for the predominant conifer species of the Inland Northwest USA. *Forest Ecology and Management*, 432, 179–188. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2018.09.009>
- Alvarez, E., Duque, A., Saldarriaga, J., Cabrera, K., de las Salas, G., del Valle, I., Lema, A., Moreno, F., Orrego, S., & Rodríguez, L. (2012). Tree above-ground biomass allometries for carbon stocks estimation in the natural forests of Colombia. *Forest Ecology and Management*, 267, 297–308. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2011.12.013>
- Araujo, E. C. G., Sanquetta, C. R., Dalla Corte, A. P., Pelissari, A. L., Orso, G. A., & Silva, T. C. (2023). Global review and state-of-the-art of biomass and carbon stock in the Amazon. *Journal of Environmental Management*, 331, 117251. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2023.117251>
- Baker, T. R., Phillips, O. L., Malhi, Y., Almeida, S., Arroyo, L., Di Fiore, A., Erwin, T., Killeen, T. J., Laurance, S. G., & Laurance, W. F. (2004). Variation in wood density determines spatial patterns in Amazonian forest biomass. *Global Change Biology*, 10(5), 545–562. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2486.2004.00751.x>
- Carrillo, F., Acosta Mireles, M., Flores Ayala, E., Juárez Bravo, J. E., & Bonilla Padilla, E. (2014). Estimación de biomasa y

biomasa y $156.09 \pm 92.80 \text{ Mg C}$. Estos valores son bajos en comparación con los reportados para otras plantaciones de coníferas y que al final de su ciclo (~15 a 20 años) pueden almacenar hasta de $230 \text{ Mg C}\cdot\text{ha}^{-1}$ (Cook et al., 2014). Adicionalmente, el almacenamiento de carbono es inferior al reportado en bosques húmedos premontanos en Colombia que se encuentra entre 149 y $235 \text{ Mg C}\cdot\text{ha}^{-1}$, con densidades significativamente inferiores (Alvarez et al., 2012; Yepes et al., 2016). Aunque no se encontraron datos sobre la biomasa y captura de carbono de *R. rospigliosii* en bosques naturales de Colombia, los reportes sobre diámetros y alturas de los individuos son considerablemente mayores en estas condiciones, alcanzando hasta 30 m de altura y más de 1 m de DAP (Marín, 1998).

Conclusiones

La acumulación de biomasa y el carbono almacenado se estimaron en plantaciones experimentales adultas (20 años) de *Retrophyllum rospigliosii* con fines de restauración en la región Andina colombiana. Los individuos de esta especie, establecidos en plantaciones mono-específicas y de alta densidad, alcanzan valores de biomasa ($316.26 \pm 187.26 \text{ Mg}\cdot\text{ha}^{-1}$) y captura de carbono ($156.08 \pm 92.80 \text{ Mg C}\cdot\text{ha}^{-1}$) relativamente bajos en comparación con los individuos en bosques naturales. La falta de biodiversidad en plantaciones mono-específicas de la especie podría limitar la productividad al reducir el potencial de complementariedad y facilitación. Dada la gran talla que alcanzan los individuos de *R. rospigliosii* en condiciones naturales, esta especie presenta un gran potencial para la captura de carbono en el fuste; por ello, se recomienda enfocar los esfuerzos de restauración en el enriquecimiento de bosques degradados con esta especie o en su incorporación en sistemas agroforestales.

Agradecimientos

A los miembros del Semillero de Investigación en Silvicultura Aplicada de la Universidad del Cauca por su colaboración en el desarrollo del trabajo de campo y a la empresa Smurfit-Westrock Colombia por facilitar los sitios experimentales y por su apoyo logístico para la realización del trabajo.

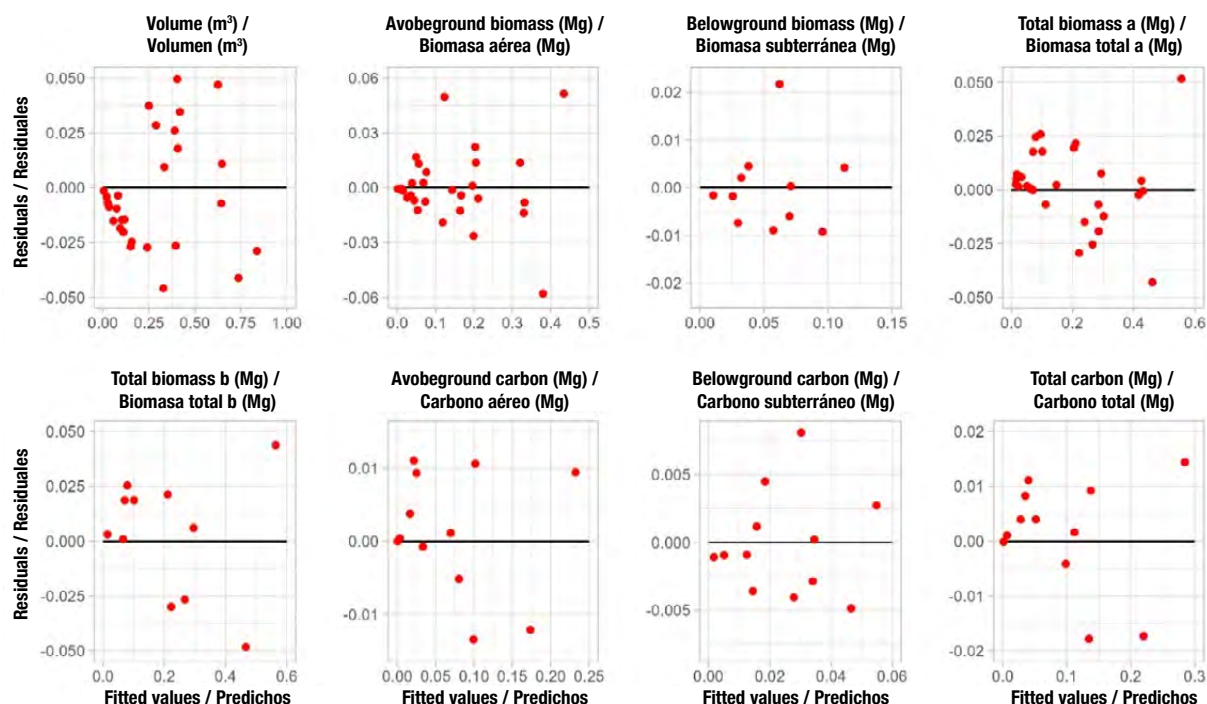
Conflicto de intereses

Los autores declaramos que no tenemos conflictos de intereses económicos ni relaciones personales conocidas que pudieran haber influido en la investigación presentada en este artículo.

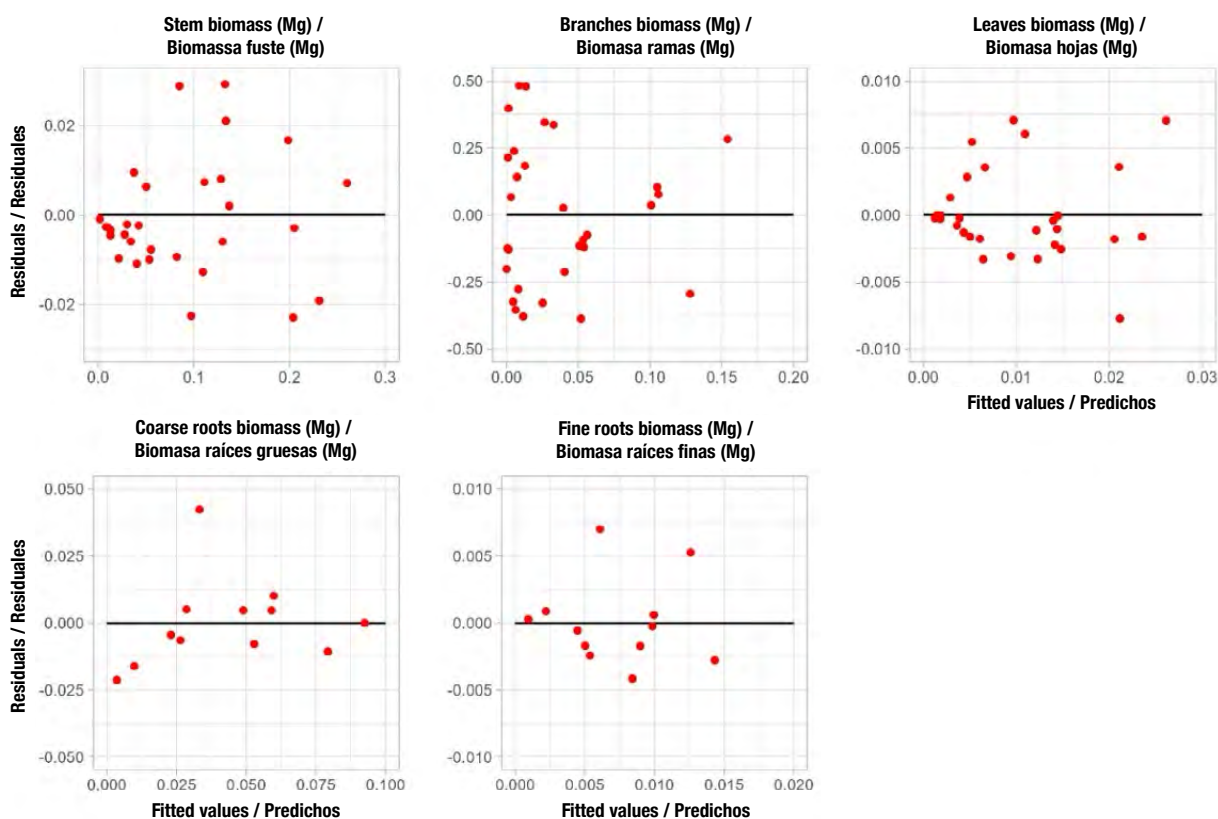
Fin de la versión en español

- carbono en dos especies arbóreas en La Sierra Nevada, México. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 5(5), 779–793. https://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2007-09342014000500005
- Carrillo, F., Acosta Mireles, M., Jiménez Cruz, C. del R., González Molina, L., & Etchevers Barra, J. D. (2016). Ecuaciones alométricas para estimar la biomasa y el carbono de la parte aérea de *Pinus hartwegii* en el Parque Nacional Ixta-Popo, México. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 7(3), 681–691. <https://doi.org/10.29312/remexca.v7i3.327>
- 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>
- Chojnacky, D. C., Heath, L. S., & Jenkins, J. C. (2014). Updated generalized biomass equations for North American tree species. *Forestry*, 87(1), 129–151. <https://doi.org/10.1093/forestry/cpt053>
- Cogollo, A., Velásquez-Rúa, C., Toro, J. L., & García, N. (2007). Las podocarpáceas. In N. García (Ed.), *Libro rojo de plantas de Colombia (vol. 5): Las magnoliáceas, las miristicáceas y las podocarpáceas* (pp. 193–224). Instituto Alexander von Humboldt, Corporación Autónoma Regional del Centro de Antioquia, Jardín Botánico Joaquín Antonio Uribe de Medellín, Instituto de Ciencias Naturales de la Universidad Nacional de Colombia, Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial. https://www.researchgate.net/publication/279204794_Libro_Rojo_de_Plantas_de_Colombia_Volumen_5_Las_magnolias_las_miristicaceas_y_las_podocarpaceas
- Cook, R. L., Binkley, D., Mendes, J. C. T., & Stape, J. L. (2014). Soil carbon stocks and forest biomass following conversion of pasture to broadleaf and conifer plantations in southeastern Brazil. *Forest Ecology and Management*, 324, 37–45. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2014.03.019>
- Correia, A. C., Faias, S. P., Ruiz-Peinado, R., Chianucci, F., Cutini, A., Fontes, L., Manetti, M. C., Montero, G., Soares, P., & Tomé, M. (2018). Generalized biomass equations for Stone pine (*Pinus pinea* L.) across the Mediterranean basin. *Forest Ecology and Management*, 429, 425–436. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2018.07.037>
- Federici, S., Tubiello, F. N., Salvatore, M., Jacobs, H., & Schmidhuber, J. (2015). New estimates of CO₂ forest emissions and removals: 1990–2015. *Forest Ecology and Management*, 352, 89–98. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2015.04.022>
- Fonseca-González, W., Rojas Vargas, M., Villalobos Chacón, R., & Alice Guier, F. (2023). Estimation of the biomass and carbon in *Cupressus lusitanica* Mill. trees in Costa Rica. *Revista de Ciencias Ambientales*, 57(2), 18330. <http://doi.org/10.15359/rca.57-6>
- Gardner, M., & Thomas, P. (2013). *Retrophyllum rospigliosii*. The IUCN Red List of Threatened Species 2013: E. T34110A2846471. <https://doi.org/10.2305/IUCN.UK.2013-1.RLTS.T34110A2846471>
- Griscom, B. W., Adams, J., Ellis, P. W., Houghton, R. A., Lomax, G., Miteva, D. A., Schlesinger, W. H., Shoch, D., Siikamäki, J. V., Smith, P., Woodbury, P., Zganjar, C., Blackman, A., Campari, J., Conant, R. T., Delgado, C., Elias, P., Gopalakrishna, T., Hamsik, M. R., ... Fargione, J. (2017). Natural climate solutions. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 114(44), 11645–11650. <https://doi.org/10.1073/pnas.1710465114>
- Han, S. H., & Park, B. B. (2020). Comparison of allometric equation and destructive measurement of carbon storage of naturally regenerated understory in a *Pinus rigida* plantation in South Korea. *Forests*, 11(4), 425. <https://doi.org/10.3390/f11040425>
- Hernández-Ramos, J., Santos-Posadas, H. M. D., Valdez-Lazalde, J. R., Tamarit-Urías, J. C., Ángeles-Pérez, G., Hernández-Ramos, A., Peduzzi, A., & Carrero, O. (2017). Biomasa aérea y factores de expansión en plantaciones forestales comerciales de *Eucalyptus urophylla* S. T. Blake. *Agrociencia*, 51(8), 921–938. <https://www.agrociencia-colpos.org/index.php/agrociencia/article/view/1336>
- Hernández-Vera, D., Pompa-García, M., Yerena-Yamallel, J. I., & Alanís-Rodríguez, E. (2017). Within-tree carbon concentration variation in three Mexican pine species. *Bosque (Valdivia)*, 38(2), 381–386. <https://doi.org/10.4067/S0717-92002017000200015>
- Holdridge, L. R. (1982). *Ecología basada en zonas de vida*. Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura.
- Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). (2019). *2019 Refinement to the 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories*. Institute for Global Environmental Strategies. <https://www.ipcc.ch/report/2019-refinement-to-the-2006-ipcc-guidelines-for-national-greenhouse-gas-inventories/>
- Kershaw, J. A., Ducey, M. J., Beers, T. W., & Husch, B. (2017). *Forest mensuration* (5th edition). John Wiley & Sons, Ltd.
- Kiviste, A., Álvarez-González, J. G., Rojo-Alboreca, A., & Ruiz, A. D. (2002). *Funciones de crecimiento de aplicación en el ámbito forestal*. Monografías INIA.
- Liu, B., Bu, W., Zang, R. (2023). Improved allometric models to estimate the aboveground biomass of younger secondary tropical forests. *Global Ecology and Conservation*, 41, e02359. <http://doi.org/10.1016/j.gecco.2022.e02359>
- Loetsch, F., Zöhrer, F., & Haller, K. (1973). *Forest inventory* (2nd ed.). BLV Verlagsgesellschaft.
- López, H. G., Vaides, E. E., & Alvarado, A. (2018). Evaluación de carbono fijado en la biomasa aérea de plantaciones de teca en Chahal, Alta Verapaz, Guatemala. *Agronomía Costarricense*, 42(1), 137–153. <http://doi.org/10.15517/rac.v42i1.32201>
- Marín, A. (1998). *Ecología y silvicultura de las Podocarpáceas andinas de Colombia*. Smurfit Cartón de Colombia.
- Nguyen, H., Firn, J., Lamb, D., & Herbohn, J. (2014). Wood density: A tool to find complementary species for the design of mixed species plantations. *Forest Ecology and Management*, 334, 106–113. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2014.08.022>
- Ortega, G., & Muñoz, V. (2020). *Rescatando la biodiversidad colombiana. Nuestra flora como escenario del bicentenario de la campaña libertadora*. Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible de Colombia. <https://www.minambiente.gov.co/wp-content/uploads/2022/06/RESCATANDO-LA-BIODIVERSIDAD-FAUNA-Nov-84.pdf>

- Picard, N., Saint-André, L., & Henry, M. (2012). *Manual for building tree volume and biomass allometric equations: from field measurement to prediction*. Food and Agricultural Organization of the United Nations, Centre de Coopération Internationale en Recherche Agronomique pour le Développement. <https://www.fao.org/4/i3058e/i3058e.pdf>
- Pompa-García, M., Sigala-Rodríguez, J. A., Jurado, E., & Flores, J. (2017). Tissue carbon concentration of 175 Mexican forest species. *iForest - Biogeosciences and Forestry*, 10(4), 754. <https://doi.org/10.3832/ifer2421-010>
- Portillo, P. R., Cueva, N., Sierra, J. C., & Vásquez, Á. M. (2019). Propiedades físico mecánicas del *Retrophyllum rospigliosii* (Pilger) CN Page de 22 años en dos sistemas de plantación en Colombia. *Revista Forestal del Perú*, 34(1), 41–51. <http://doi.org/10.21704/rfp.v34i1.1284>
- R Core Team. (2023). R: A language and environment for statistical computing. [software]. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. <http://www.R-project.org/>
- Ramírez, J. A., Marín, A., Urrego, J. B., Castaño, Á., & Ospina, R. (2021). Efecto de la fertilización en el crecimiento de *Retrophyllum rospigliosii* de la zona andina colombiana. *Madera y Bosques*, 27(3), e2732315. <https://doi.org/10.21829/myb.2021.2732315>
- Rodríguez, G., García, J. Á., Leyva, J. C., Ruiz, C., Enríquez, J. R., & Santiago, W. (2019). Biomasa estructural y por compartimentos en regeneración de *Pinus patula* en áreas con matarrasa. *Madera y Bosques*, 25(1), e2511713. <https://doi.org/10.21829/myb.2019.2511713>
- Sanquetta, C. R., Corte, A. P., & da Silva, F. (2011). Biomass expansion factor and root-to-shoot ratio for *Pinus* in Brazil. *Carbon Balance and Management*, 6(1), 6. <https://doi.org/10.1186/1750-0680-6-6>
- Temesgen, H., Affleck, D., Poudel, K., Gray, A., & Sessions, J. (2015). A review of the challenges and opportunities in estimating above ground forest biomass using tree-level models. *Scandinavian Journal of Forest Research*, 30(4), 326–335. <https://doi.org/10.1080/02827581.2015.1012114>
- Teobaldelli, M., Somogyi, Z., Migliavacca, M., & Usoltsev, V. A. (2009). Generalized functions of biomass expansion factors for conifers and broadleaved by stand age, growing stock and site index. *Forest Ecology and Management*, 257(3), 1004–1013. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2008.11.002>
- Yaguana, C., Lozano, D., Neill, D., & Asanza, M. (2012). Diversidad florística y estructura del bosque nublado del río Numbala, Zamora-Chinchipe, Ecuador: El “bosque gigante” de Podocarpaceae adyacente al Parque Nacional Podocarpus. *Revista Amazónica: Ciencia y Tecnología*, 1(3), 226–247. <https://doi.org/10.59410/RACYT-v01n03ep05-0019>
- Yeboah, D., Burton, A. J., Storer, A. J., & Opuni-Frimpong, E. (2014). Variation in wood density and carbon content of tropical plantation tree species from Ghana. *New Forests*, 45(1), 35–52. <https://doi.org/10.1007/s11056-013-9390-8>
- Yepes, A., Sierra, A., Niño, L. M., López, M., Garay, C., Cabrera, E., & Barbosa, A. (2016). Biomasa y carbono total almacenado en robledales del sur de los Andes Colombianos: Aportes para el enfoque REDD+ a escala de proyectos. *Revista de Biología Tropical*, 64(1), 399–412. <https://doi.org/10.15517/rbt.v64i1.18221>



Appendix 1. Residuals of predicted values from models fitted to estimate volume, biomass, and carbon of *Retrophyllum rospigliosii*.
 Apéndice 1. Residuales de los valores predichos por los modelos ajustados para la estimación del volumen, biomasa y carbono de *Retrophyllum rospigliosii*.



Appendix 2. Residuals of predicted values from models fitted to estimate the biomass of each component of *Retrophyllum rospigliosii*.
 Apéndice 2. Residuales de los valores predichos por los modelos ajustados para estimar la biomasa de cada componente de *Retrophyllum rospigliosii*.