



UNIVERSIDAD DISTRITAL
FRANCISCO JOSÉ DE CALDAS



<https://doi.org/10.14483/2256201X.24183>

ARTÍCULO DE INVESTIGACIÓN CIENTÍFICA Y TECNOLÓGICA

ISSN 0120-0739 • e-ISSN 2256-201X

Estimación de biomasa aérea: aproximaciones locales y de referencia en el Chaco Salteño Argentino

Aboveground Biomass Estimation: Local and Reference Approaches in the Argentine Salteño Chaco

Juan Manuel Cellini^a, Rocío Lara Arcidiacono^b

^a Laboratorio de Investigaciones en Maderas (LIMAD), Universidad Nacional de la Plata (UNLP). La Plata, Buenos Aires 1900, Argentina.

^b Centro Austral de Investigaciones Científicas (CADIC), Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET). Ushuaia, Tierra del Fuego 9410, Argentina.

Autor para correspondencia

Recibido: 7 de octubre de 2025

Aceptado: 28 de noviembre de 2025

Citación: Cellini, J. M., & Arcidiacono, R. L. (2026). Estimación de biomasa aérea: Aproximaciones locales y de referencia en el Chaco Salteño Argentino. *Colombia Forestal*, 29(1), e24183.

<https://doi.org/10.14483/2256201X.24183>

Highlights

- Se desarrollaron ecuaciones alométricas locales para *Salta triflora* y *Senegalia praecox*.
- Las estimaciones locales de biomasa difieren significativamente de las generales.
- La densidad de madera local fue superior a la bibliográfica.
- Incluir la corteza para determinar la densidad del leño mejora la precisión del cálculo de carbono.
- Las ecuaciones locales mejoran la precisión de inventarios del Chaco Salteño.

Resumen

El objetivo de este artículo fue comparar la estimación de biomasa aérea total obtenida mediante ecuaciones alométricas locales con aproximaciones generales de la bibliografía en el Chaco Salteño argentino. Se realizó un inventario forestal en 4891.7 ha, con 90 unidades de muestreo octogonales concéntricas. Se desarrollaron ecuaciones alométricas e hipsométricas locales para *Salta triflora* y *Senegalia praecox*. Se compararon tres metodologías de cálculo de biomasa (local, general con densidad bibliográfica y general con densidad local). Las ecuaciones locales ajustadas mostraron una excelente bondad de ajuste ($R^2 > 97\%$) y se confirmó que las estimaciones de biomasa aérea con ecuaciones locales difieren significativamente

de las generales. La densidad de madera medida localmente superó los promedios bibliográficos. Es necesario generar y aplicar ecuaciones alométricas y datos de densidad locales, ya que la variación en la metodología y en la densidad de la madera puede generar diferencias de hasta 23 799.6 toneladas de biomasa.

Palabras clave: alometría, densidad de madera, inventario forestal, *Salta triflora*, *Senegalia praecox*

Abstract

The objective of this article was to compare aboveground biomass estimates obtained through local allometric equations against general approaches from the literature in the Argentine Salteño Chaco. A forest inventory was conducted over 4891.7 ha, using 90 concentric octagonal sampling units. Local allometric and height equations were developed for *Salta triflora* and *Senegalia praecox*. Three methodologies for biomass calculation were compared: local, general with bibliographic density, and general with local density. The local equations showed an excellent fit ($R^2 > 97\%$), and it was confirmed that local biomass estimates differ significantly from general ones. The local wood density values exceeded bibliographic averages. It is necessary to generate and apply local allometric equations and density data, as methodological variation can lead to differences of up to 23 799.6 tonnes of total biomass.

Keywords: allometry, wood density, forest inventory, *Salta triflora*, *Senegalia praecox*

INTRODUCCIÓN

En el escenario de cambio climático global dado por el aumento en las emisiones de gases de efecto invernadero, los ecosistemas forestales desempeñan un papel esencial (Sione *et al.*, 2020), pues actúan como reservorios de carbono en la vegetación y el suelo (Gasparri *et al.*, 2010). En este contexto, la estimación de biomasa y carbono almacenado es fundamental (Ontiveros *et al.*, 2015; Sione *et al.*, 2020). La estimación de biomasa es una herramienta para valorar la cantidad de carbono que se almacena en las estructuras vivas en un momento dado (Ontiveros *et al.*, 2009), lo cual es fundamental para evaluar la contribución de los bosques al ciclo del carbono, conocer su potencial de captura (Castillo-Ruperti *et al.*, 2022) y el rol del sector forestal en el cumplimiento de las metas relacionadas con el cambio climático (Law & Harmond, 2011).

Para la cuantificación de la biomasa, una herramienta clave es el uso de ecuaciones alométricas (Ontiveros *et al.*, 2009). Estas son relaciones matemáticas que se utilizan para estimar la biomasa con base en una o más variables independientes, como el diámetro a la altura del pecho (DAP), la altura total, el área basal, la densidad básica o el diámetro de copa (Martínez Yrizar *et al.*, 1992). Una consideración fundamental al emplear ecuaciones alométricas es la importancia de la especificidad regional y local. La biomasa varía entre sitios, entre especies e incluso entre secciones de un mismo individuo (Kirby & Potvin, 2007), lo que ratifica la importancia de generar funciones específicas para cada Ecorregión (Conti *et al.*, 2013; Iglesias & Barchuk, 2010; Sione *et al.*, 2020), a fin de aumentar la precisión de las estimaciones de biomasa y carbono (Sione *et al.*, 2020) en comparación con ecuaciones generales (Návar *et al.*, 2013). En este sentido, las ecuaciones generales desarrolladas para otras regiones, o basadas en coeficientes amplios (Chave *et al.*, 2014), pueden generar estimaciones imprecisas con respecto a los resultados de ecuaciones locales específicas (Návar *et al.*, 2019). La comparación de ecuaciones con otras reportadas en la literatura para la misma especie demuestra la importancia de generar funciones específicas y locales, a fin de brindar precisión a las estimaciones de biomasa

y carbono. En ambientes como el Espinal santafesino, la comparación de funciones locales vs. genéricas ratifica la importancia de utilizar funciones para una especie en particular (Conti *et al.*, 2013). Debido a que el potencial de un sistema forestal para secuestrar y almacenar carbono (C) en forma de biomasa depende de la calidad de sitio, la edad, la composición de especies y el contenido de C en los compartimentos de cada especie (Castillo-Ruperti *et al.*, 2022), se espera que existan diferencias significativas en la biomasa, pues es marcada la diferenciación en la composición de especies y tamaños de los diferentes estratos.

Comparar diferentes ecuaciones alométricas en una región es una práctica poco común pero necesaria (Martínez Yrizar *et al.*, 1992), pues existe una brecha de conocimiento significativa relacionada con su validación y aplicación. Cuando no se dispone de una validación local, evaluar las ecuaciones alométricas de otros sitios en comparación con ecuaciones locales es importante para mejorar la precisión de las estimaciones. Esto es fundamental para el manejo forestal sostenible, la conservación y el cumplimiento de los compromisos relacionados con el cambio climático global. Es por ello que el objetivo de este trabajo fue comparar las estimaciones de biomasa aérea obtenidas mediante la aplicación de ecuaciones alométricas locales para las especies más representativas del monte salteño con estimaciones obtenidas de ecuaciones alométricas generales seleccionadas de la bibliografía, utilizando datos de un inventario forestal. Específicamente, se buscó (i) determinar la riqueza, el tamaño y la densidad de madera de especies forestales, con el fin de identificar las más representativas para el área de estudio; (ii) estimar la biomasa aérea mediante ecuaciones alométricas desarrolladas para las especies más representativas y su contraparte general y ampliamente implementada, mediante el DAP, la altura total y la densidad de madera reportados en la literatura, además de aplicar la metodología “b” con densidades de madera calculadas a partir de muestras del sitio de estudio; y (iii) realizar una estratificación del área de estudio, en aras de analizar y comparar las estimaciones de biomasa total obtenidas con las ecuaciones alométricas locales y generales. La hipótesis de investigación es que las estimaciones de biomasa aérea obtenidas mediante ecuaciones alométricas desarrolladas localmente diferirán significativamente de las generales o específicas de otras regiones. Se espera que las ecuaciones locales proporcionen estimaciones que se ajusten mejor a las condiciones particulares del bosque estudiado.

MATERIALES Y MÉTODOS

Área de estudio

Este estudio se realizó en el Establecimiento Chaguaral (23°56'33"S - 63°45'17"O), ubicado en la localidad de General Pizarro, Provincia de Salta, Argentina. Abarca una superficie de 4891.7 ha en una región de transición entre las Yungas y el Gran Chaco Americano. Esta posición transicional confiere al área de Chaguaral características que pueden compartir elementos de ambos ecosistemas. No existen antecedentes de extracción maderera en el predio. Sin embargo, se observaron evidencias de extracciones pasadas en sectores específicos.

Inventario de campo y toma de datos

Para el inventario forestal se implementó un diseño de muestreo sistemático en una matriz hexagonal, con 90 unidades de muestreo (UM) octogonales concéntricas de dos tamaños, debido a que los árboles varían en

abundancia según su tamaño. Se utilizó a) un circunradio de 9.495 m (255 m²) y b) un circunradio de 18.803 m (1000 m²). Se midió el DAP (cm) para cada tamaño de parcela. En la parcela b se midieron todos los ejemplares de $5 \geq \text{DAP} < 20$ cm, y en la a se midieron aquellos con $\text{DAP} \geq 20$ cm. La diferencia metodológica con la parcela circular radica en que los ocho lados que componen el perímetro son líneas rectas, facilitando la decisión de incluir árboles límite. También se determinó la altura total (AT, m) de todas las especies excepto *Salta triflora* (Griseb.) A.D. Sánchez y *Senegalia praecox* (Griseb.) Seigler & Ebinger; para estas especies se usaron ecuaciones de biomasa basadas únicamente en el DAP, de acuerdo con los objetivos del inventario forestal.

Determinación de peso seco de *Salta triflora* y *Senegalia praecox*

Se seleccionaron 17 individuos de *S. triflora* y 15 de *S. praecox*, abarcando un amplio rango de DAP y AT para asegurar la representatividad de la muestra. Se midió el DAP de cada árbol, y después del apeo se determinó a) la AT con cinta métrica y b) el peso en verde con una balanza de precisión (± 0.05 kg). Asimismo, se obtuvieron rodajas de 5 cm de espesor al nivel del DAP y a la mitad de la AT de cada individuo, las cuales fueron pesadas en verde con una balanza de precisión (± 0.0005 kg), hasta completar 20 muestras por especie. Posteriormente, las rodajas fueron secadas en estufa a 104 °C hasta alcanzar peso constante, con el fin de determinar el contenido promedio de humedad por individuo. Este valor se utilizó para calcular la biomasa aérea a partir del peso en verde

Determinación de la densidad básica de *Salta triflora* y *Senegalia praecox*

Cada rodaja secada en estufa fue dividida en tres secciones: corteza (C), xilema exterior (E) y xilema interior (I), determinados los últimos dos por la mitad del radio de la muestra sin corteza—debido a que las especies no diferencian albura y duramen. Así, se obtuvieron tres muestras por sección, de un peso mínimo de 0.5 g. Posteriormente, se determinó el volumen de cada muestra al 0% de humedad, siguiendo el método de desplazamiento de fluidos, con una balanza de precisión (± 0.005 g, Ohaus Pioneer). Se procedió según la norma [IRAM 9544 \(1985\)](#), que contempla la determinación de la densidad anhidra de la madera. Para obtener un valor único de densidad por especie, se midió el área de cada sección de las rodajas y se calcularon los valores porcentuales promedio. Se generó un promedio ponderado para cada rodaja, y estos valores fueron promediados por especie. Se calculó la densidad básica con el modelo de [Núñez \(2007\)](#).

Ajuste de ecuaciones alométricas locales

Se desarrollaron ecuaciones alométricas locales para *S. triflora* y *S. praecox* debido a su alta frecuencia en el proyecto y la falta de información en la literatura. El ajuste se llevó a cabo mediante regresiones no lineales, estimando los parámetros a y b de la ecuación mediante el método de Marquardt, con la siguiente fórmula:

$$\text{Biomasa Aérea (Kg)} = a * \text{DAP(cm)}^b \quad (1)$$

Este método fue seleccionado por su eficacia y robustez en el ajuste de modelos no lineales de tipo potencial (Marquardt, 1963), que constituyen el formato estándar en la alometría forestal. El DAP es una variable precisa y fácil de medir, lo que contribuye a la simplicidad y operatividad de la toma de datos, sin comprometer la exactitud en las estimaciones. La bondad de ajuste se evaluó a través del coeficiente de determinación (R^2), y se calcularon estadísticos adicionales como el error cuadrático medio (MSError) y el criterio de información de Akaike (AIC), además de la significancia estadística de los parámetros estimados y su error estándar. Asimismo, la validez del ajuste fue asegurada mediante la verificación de los supuestos estadísticos, la homocedasticidad con la prueba de Levene y la ausencia de autocorrelación con el Estadístico Durbin-Watson (DW).

Ecuaciones alométricas generales y estimación de la altura total

Se utilizó la ecuación alométrica genérica pantropical de Chave *et al.* (2014), que considera el DAP, la densidad de madera (DM) y la AT aplicable en bosques tropicales y subtropicales. Se usaron los valores de DM de Atencia (2003), Coronel (1994), Tortorelli (1956), Encyclopedia of Life (2024), Restor (2025) y Ramírez *et al.* (2000). Para *S. praecox* y *S. triflora*, se calculó la DM a) como promedio de valores de DM bibliográfica y b) con muestras a campo. La AT se estimó mediante el ajuste de una ecuación hipsométrica con las formas $AT(m) = a \cdot DAP(cm)^b$ y $AT(m) = a + b \cdot LN(DAP)$, siguiendo la misma metodología de las ecuaciones alométricas anteriormente descritas.

Aplicación de ecuaciones alométricas

Se utilizaron las UM del área de estudio para evaluar el efecto de la variación de la DM sobre la biomasa estimada. El estudio se estructuró como un análisis de sensibilidad, comparando tres metodologías de cálculo de biomasa total:

- *Alom*: ecuaciones alométricas locales de *S. triflora* y *S. praecox* y, para el resto de las especies, el modelo de Chave *et al.* (2014).
- *Trad*: ecuación de Chave *et al.* (2014) con la AT de *S. triflora*. Se calculó *S. praecox* con las ecuaciones desarrolladas y la DM de la literatura.
- *TradDen*: ecuación de Chave *et al.* (2014) con la AT de *S. triflora*. Se calculó *S. praecox* con las ecuaciones desarrolladas y la DM medida.

Las comparaciones se realizaron mediante el cálculo de la biomasa total, con una relación raíz/parte aérea de 0.28 (un valor estándar), y una metodología internacional adoptada por la UNFCC (2013) para ecosistemas secos y subtropicales.

Considerando el área basal por hectárea ($m^2 \cdot ha^{-1}$), se realizó una estratificación con las especies que presentaron una frecuencia > 10% del total de las parcelas. Esto, mediante un análisis de conglomerados, utilizando

el método de Ward ([Ward, 1963](#)) con la distancia euclidiana. Se obtuvo un dendrograma que muestra las relaciones entre las UM según sus valores de similitud. De acuerdo con los grupos formados, se agruparon las parcelas en cinco estratos. Se utilizó bibliografía de la región Chaqueña para establecer los valores de DM básica para *S. triflora* y *S. praecox*. Todos los valores de DM utilizaron un cálculo de densidad básica en g.cm^{-3} y fueron determinados por medio de la relación entre el peso seco de la muestra de madera (0% humedad) y el volumen verde. Los valores de DM anhidra fueron convertidos a básicos mediante la ecuación de [Núñez \(2007\)](#).

Análisis de datos

Se realizaron análisis de varianza (ANOVA) y pruebas de Tukey ($p < 0.05$) para la DM, considerando como factor la sección analizada ([Arcidiacono et al., 2025](#)). Asimismo, las diferencias de biomasa (en porcentaje) fueron analizadas con ANOVA y pruebas de Tukey ($p < 0.05$), utilizando como factores los estratos del inventario forestal. Se evaluó la normalidad mediante la prueba de Kolmogorov-Smirnov, y la homocedasticidad con la de Levene. En caso de incumplimiento de supuestos, se aplicaban métodos no paramétricos (Kruskal-Wallis) y se realizaban comparaciones de medias con la prueba de Conover-Iman ($p < 0.05$). Para los análisis estadísticos, se utilizó el programa InfoStat ([Di Rienzo et al., 2015](#)).

RESULTADOS

La zona de estudio presenta una marcada riqueza de especies y familias botánicas (34 y 19 respectivamente), con rangos de DAP variables en las especies más abundantes, *i.e.*, *S. triflora* y *S. praecox*. Se observa la mayor abundancia con un DAP inferior a 22.1 cm. Los valores obtenidos del inventario forestal muestran un área basal promedio de $14.7 \text{ m}^2.\text{ha}^{-1}$ y una densidad de $1424.8 \text{ ind}.\text{ha}^{-1}$. En *Schinopsis balansae* Engl., *Aspidosperma quebracho-blanco* Schltdl. y *Ceiba chodatii* (Hassl.) Ravenna, los DAP máximos fueron de 66.9, 85.3 y 149.0 cm respectivamente. También se ajustaron las ecuaciones alométricas e hipsométricas de *S. triflora* y *S. praecox* ([Figura 1](#)). La bondad de ajuste y la verificación de los supuestos estadísticos se muestran en la [Tabla 1](#).

Se observan diferencias significativas en los valores de DM por sección ([Tabla 2](#)) entre la corteza y la sección interna en *S. triflora* y *S. praecox*; la corteza puede presentar mayor o menor DM que las secciones interiores. Para *S. triflora*, la DM de la corteza (0.86 g.cm^{-3}) y la sección interna (0.84 g.cm^{-3}) presenta diferencias significativas ($F=3.49$, $p=0.0373$; $C>I$). Para *S. praecox*, los valores de la corteza (1.10 g.cm^{-3}) y la sección externa (1.10 g.cm^{-3}) no presentan diferencias, pero sí lo hacen cuando se comparan con la sección interna (1.18 g.cm^{-3}), que reporta mayores valores ($F=10.27$, $p=0.0002$; $C=E<I$). Para *S. triflora*, los valores bibliográficos de DM oscilan entre 0.619 y 0.944 g.cm^{-3} , con un promedio de 0.765 g.cm^{-3} y una desviación estándar de 0.108 . En el caso de *S. praecox*, el rango es de 0.499 y 1.003 g.cm^{-3} , y el promedio y desvío de DM de $0.786 \pm 0.170 \text{ g.cm}^{-3}$. Estos promedios de DM resultaron menores que los obtenidos en el estudio local, mientras que solo un valor ([Sato et al., 2015](#)) para *S. triflora* (0.944 g.cm^{-3}) fue superior al valor de DM obtenido.

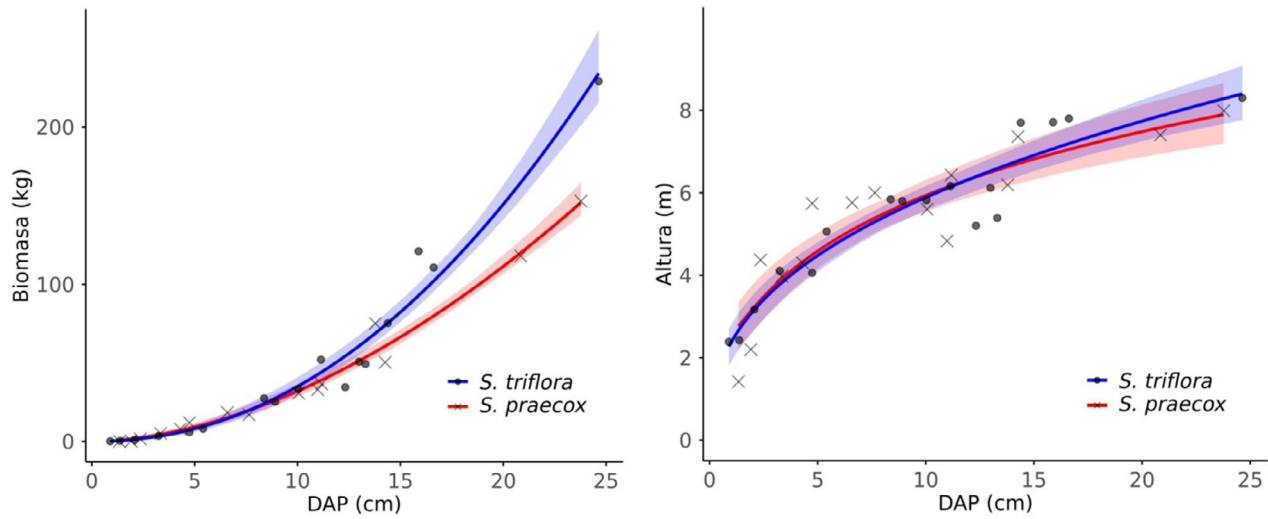


Figura 1. Ecuaciones alométricas e hipsométricas de *Salta triflora* y *Senegalia praecox* de Chaguaral, Chaco Salteño, Argentina. Rango de DAP (cm): *Salta triflora* 0.9-24.6; *Senegalia praecox* 1.3-23.8.

Tabla 1. Ecuaciones alométricas e hipsométricas de *Salta triflora* y *Senegalia praecox* de Chaguaral, Chaco salteño, Argentina. MSE = error cuadrático medio, MAE = error absoluto de la media, AIC = criterio de información de Akaike, DW = estadístico Durbin-Watson, R^2 = coeficiente de determinación, S.E. (p) = error estándar y valor p.

n	MSE (MAE)	AIC (DW)	R^2	Parámetro a \pm S.E. (p)	Parámetro b \pm S.E. (p)
<i>Salta triflora</i> Biomasa aérea = a DAP^b					
17	111.47 (6.2)	132.25 (2.9)	0.97	0.27012268 \pm 0.09361346 (0.0113)	2.11228858 \pm 0.11611182 (<0.0001)
<i>Salta triflora</i> Altura= a DAP^b					
17	0.35 (0.4)	34.38 (2.2)	0.90	2.37594915 \pm 0.24448049 (<0.0001)	0.39411626 \pm 0.04106312 (<0.0001)
<i>Senegalia praecox</i> Biomasa aérea = a DAP^b					
15	38.89 (3.2)	101.33 (1.7)	0.98	0.511364722 \pm 0.148541445 (0.0044)	1.797090943 \pm 0.097296189 (<0.0001)
<i>Senegalia praecox</i> Altura= a + LN(DAP)^b					
15	0.52 (0.5)	36.89 (1.7)	0.85	1.60497046 \pm 0.46267834 (0.0042)	1.94429154 \pm 0.22219565 (<0.0001)

Se analizó la estratificación del área de estudio, lo que resultó en el agrupamiento de las parcelas en cinco estratos (correlación copenética=0.416), nombrados según las especies predominantes: el estrato TaNo, representado por la mayor densidad de *Tabebuia nodosa* (Griseb.) Griseb., con *Calycophyllum multiflorum* y *Bougainvillea campanulata* como secundarias; el estrato SePr, que está dominado por *S. praecox*, y *Cynophalla retusa*; el estrato ScBa, representado por *Schinopsis balansae* y *Ceiba chodatii*, *Sarcotoximum salicifolium*, *S. triflora* y *S. praecox* como secundarias; el estrato CyRe, correspondiente a *C. retusa*, que está acompañada por *S. salicifolium*; y el estrato AsQu, dominado por la especie *A. quebracho-blanco* y con *Cereus forbesii* como acompañante. Estos agrupamientos presentaron diferencias significativas en la biomasa total por hectárea, que consideró las especies como factor (Tabla 3).

Tabla 2. Resultados del análisis de varianza y la prueba de Tukey para los valores de densidad calculados para madera y corteza, obtenidos a 1.3 m de altura en *Senegalia praecox* y *Salta triflora*

Especie	Sección	n	Densidad (g.cm ⁻³)	DAP (cm)
<i>Salta triflora</i>	C	20	0.81 (0.86 ± 0.02) 0.90 b	9.8 ± 6.4
	E	20	0.80 (0.85 ± 0.02) 0.89 ab	
	I	20	0.79 (0.84 ± 0.03) 0.90 a	
	F (p)		3.49 (0.0373)	
	D0		0.8493	
<i>Senegalia praecox</i>	C	20	0.96 (1.10 ± 0.09) 1.24 a	9.1 ± 6.8
	E	20	1.04 (1.10 ± 0.04) 1.16 a	
	I	20	1.01 (1.18 ± 0.06) 1.30 b	
	F (p)		10.27 (0.0002)	
	D0		1.1193	

Tabla 3. Resultados del análisis de varianza y la prueba de Tukey para los valores de biomasa total (t.ha⁻¹) calculados mediante ecuaciones alométricas para las especies que presentaron una frecuencia mayor del 10 % por estrato

Especie	1 - TaNo	2 - SePr	3 - ScBa	4 - CyRe	5 - AsQu	H	p
<i>Anisocapparis speciosa</i>	0.38	0.54	0.74	0.42	0.93	4.10	0.3434
<i>Aspidosperma quebracho-blanco</i>	2.57 a	30.07 b	21.50 b	34.77 b	52.38 c	34.02	<0.0001
<i>Bougainvillea campanulata</i>	2.09 b	0.52 a	1.73 ab	0.67 ab	1.22 ab	9.56	0.0446
<i>Calycophyllum multiflorum</i>	11.05 b	0.00 a	0.16 a	0.49 a	0.00 a	5.61	0.0004
<i>Castela coccinea</i>	0.00	0.09	0.87	0.22	0.91	4.93	0.0781
<i>Ceiba chodatii</i>	1.43 a	1.18 a	13.06 b	1.69 a	0.34 a	23.42	<0.0001
<i>Cereus forbesii</i>	0.00 a	0.00 a	0.026 a	0.04 a	0.69 b	20.80	<0.0001
<i>Cynophalla retusa</i>	0.15 a	0.70 b	0.31 a	0.75 b	0.23 a	20.91	0.0002
<i>Libidia paraguariensis</i>	4.80	5.34	11.30	13.48	3.05	8.09	0.0746
<i>Mimozyanthus carinatus</i>	3.08	1.85	4.83	3.77	1.56	4.61	0.3169
<i>Monteverdia spinosa</i>	0.00 a	0.00 a	0.01 a	0.32 b	0.00 a	21.09	<0.0001
<i>Salta triflora</i>	11.51 abc	7.92 a	15.40 c	9.93 ab	14.70 bc	17.51	0.0015
<i>Sarcomphalus mistol</i>	1.92	1.81	2.28	4.02	1.40	1.74	0.7267
<i>Sarcotoxikum salicifolium</i>	0.05 a	0.02 a	0.53 b	0.67 b	0.16 ab	14.12	0.0007
<i>Schinopsis balansae</i>	5.10 a	16.54 b	29.87 c	14.24 ab	10.83 ab	25.23	<0.0001
<i>Senegalia praecox</i>	2.10 a	4.89 b	4.51 b	3.86 ab	2.23 ab	9.48	0.0495
<i>Stetsonia coryne</i>	1.25	0.34	0.05	1.78	0.00	4.19	0.0613
<i>Tabebuia nodosa</i>	11.39 b	3.75 a	0.62 a	1.74 a	4.21 ab	19.45	<0.0001

El análisis de sensibilidad en cuanto a la variación de la DM generó diferencias significativas en las estimaciones de biomasa por hectárea y en la superficie total. En la [Tabla 4](#) se observan las diferencias de biomasa total por estrato. Aquí, la metodología Alom presentó los mayores valores. Para los distintos estratos, se observaron variaciones en las diferencias; las mayores fueron entre Alom y Trad, y disminuyeron al comparar Alom con TradDen. Al aplicar tres metodologías de cálculo de la biomasa en dos especies, se observaron diferencias que representan, para toda la superficie del inventario forestal, una disminución de 23 799.6 t de biomasa total (5.6%) al comparar Alom con Trad y de 12 257.0 t (3.0%) para Alom vs. TradDen. La comparación entre TradDen (DM local) y Trad (DM bibliográfica) mostró que el las DM locales disminuyen la biomasa total estimada en comparación con el uso de valores bibliográficos.

Tabla 4. Resultados del análisis de varianza no paramétrico y la prueba de Conover-Iman para diferencias porcentuales entre los valores de biomasa total ($t \cdot ha^{-1}$) calculados mediante tres metodologías en cada estrato

Diferencias	1 TaNo	2 SePr	3 ScBa	4 CyRe	5 AsQu
Alom-Trad	8.7% b	5.4% b	6.0% b	5.4% b	5.7% b
Alom-TradDen	5.8% ab	2.1% a	3.2% a	2.9% a	3.6% a
TradDen-Trad	3.2% a	3.3% a	2.9% a	2.8% a	2.2% a
H	8.78	21.01	32.27	9.83	14.49
p	0.0124	<0.0001	<0.0001	0.0073	0.0007

DISCUSIÓN

El Establecimiento Chaguaral mostró a *S. triflora* y *S. praecox* como las especies más representativas en términos de frecuencia y densidad. A este respecto, [Tálaro y Caziani \(2003\)](#) observaron una estructura forestal similar a la del área de estudio en bosques chaqueños perturbados. La densidad de árboles jóvenes de *S. praecox* en bosques con historia de extracción supera a la del bosque primario, ya que es indicadora de áreas bajas y degradadas ([Giménez et al., 2011](#)), con tendencia a expandirse y aumentar su densidad ([Tálaro & Caziani 2003](#)). *Salta triflora* también prospera en ambientes perturbados, lo que contribuye a altas densidades de individuos más pequeños ([Tálaro & Caziani 2003](#)). En este estudio se observó una elevada riqueza de especies con rangos de diámetro variables, donde *S. triflora* y *S. praecox* fueron las más abundantes, con valores de DAP más bajos. Lo anterior sugiere una alteración estructural, similar a lo observado por [Tálaro y Caziani \(2003\)](#), vinculada a perturbaciones históricas o actuales. Sin embargo, el bosque de *S. balansae* y *A. quebracho-blanco*, junto con *Sarcomphalus mistol* (Griseb.) Hauenschild, es la comunidad vegetal de mayor valor de conservación, y probablemente la menos alterada ([López de Casenave et al., 1995](#); [Tálaro & Caziani, 2003](#)).

En Argentina se han realizado diversos estudios sobre estimación de biomasa y captura de carbono ([Maggio & Cellini 2016](#)). Sin embargo, estas investigaciones son específicas para algunas localidades, y aún existen muchas áreas sin evaluar ([Blundo et al., 2025](#)). Las ecuaciones desarrolladas mostraron una excelente bondad de ajuste, lo que permitió realizar estimaciones precisas de la biomasa total a partir de variables de fácil medición. La comparación entre estas ecuaciones y su contraparte general ratifica la importancia de generar funciones específicas para cada ecorregión ([Sione et al., 2020](#)), a fin de brindar precisión a las estimaciones de biomasa y carbono. Si estas estimaciones se realizan mediante ecuaciones genéricas ([Chave et al., 2014](#)), podrían surgir sesgos de estimación de hasta 400%, ya que, por lo general, estas ecuaciones han sido desarrolladas en contextos diferentes a los de los países de la región ([Sileshi, 2014](#)). La posibilidad de contar con estimaciones confiables para la biomasa aérea de la vegetación leñosa resulta imprescindible para el manejo productivo, la conservación o la restauración de los ecosistemas de bosque. Se ha observado que las ecuaciones desarrolladas para otras regiones sobreestiman los valores de biomasa total para *Neltuma nigra* (Griseb.) C.E. Hughes & G.P. Lewis en bosques nativos ([Sione, 2020](#)). Este patrón de sobreestimación por el uso de ecuaciones genéricas ha sido reportado en otros estudios, con sesgos del 10% con respecto a las estimaciones locales en bosques tropicales y subtropicales ([Chave et al., 2014](#); [Blundo et al., 2025](#)). Estudios en el Chaco Árido ([Iglesias & Barchuk, 2010](#)) desaconsejan el uso de una única ecuación y muestran que la AT no constituye un aporte significativo para la estimación de biomasa en algunas leguminosas—incluyendo *S. praecox*.

Esto contrasta con la importancia de la medición de la AT en Yungas, donde su inclusión o no puede generar diferencias de hasta 94 y 113% en la biomasa estimada (Blundo et al., 2025).

Los valores de DM medidos localmente para *S. triflora* y *S. praecox* resultaron ser superiores a los promedios bibliográficos, lo que influyó en los cálculos de biomasa. Asimismo, se observaron diferencias significativas en los valores de DM, no solo entre la corteza y las secciones del xilema (externo e interno), sino también al comparar las DM obtenidas localmente con los datos bibliográficos (Arcidiacono et al., 2025). Las diferencias en la DM entre la corteza y las secciones del xilema reflejan adaptaciones fisiológicas al ambiente semiárido (Martínez-Cabrera et al., 2009) y perturbado (Arcidiacono et al., 2025). En *S. triflora*, la mayor DM en la corteza respecto al xilema interno proporciona una protección térmica contra la intensa radiación solar y el fuego, conllevando una reducción en la pérdida de agua (Arcidiacono et al., 2025). Por otro lado, *S. praecox* presenta $C (1.10 \text{ g.cm}^{-3}) = E (1.10 \text{ g.cm}^{-3}) < I (1.18 \text{ g.cm}^{-3})$, una estrategia que provee resistencia mecánica y una mayor eficiencia en la conducción de agua bajo estrés hídrico, con el fin de mitigar el riesgo de embolismo o cavitación (López et al., 2005; Zapata et al., 2013).

Lo anterior refuerza la necesidad de ampliar las definiciones y metodologías de medición de DM para los cálculos de carbono, incluyendo muestras que consideren la diversidad de tejidos presentes en el árbol. Aunque las ecuaciones locales del Chaco Salteño mostraron valores superiores de biomasa en comparación con las generales—mientras que en Misiones el uso de DM locales tendió a subestimar el carbono frente a los valores bibliográficos (Arcidiacono et al., 2025)—, ambos estudios resaltan la importancia de generar y aplicar ecuaciones alométricas y datos de DM que sean locales y específicos para cada región de estudio. Esto es importante para mejorar la precisión de los inventarios y para el desarrollo de estrategias de manejo forestal sostenible.

La variabilidad en la DM es importante en el cálculo de la biomasa, ya que, para valores de DM de especies de alta variación, solo podrán ser utilizados localmente las obtenidas dentro de las áreas de los sitios considerados (Blundo et al., 2025). Es importante destacar que no siempre se dispone de mediciones de DM de cada especie, sobre todo en bosques muy diversos (Blundo et al., 2025). No obstante, la DM es importante en estos cálculos, sobre- o sub-dimensionando los resultados cuando los datos son escasos y deben estimarse promedios locales (Ontiveros et al., 2009).

En este estudio, nuestro cálculo de la biomasa con diferentes fuentes de datos de DM generó diferencias significativas en las estimaciones por hectárea y para la superficie total del inventario forestal (Arcidiacono et al., 2025). Los resultados resaltan la importancia de generar y aplicar ecuaciones alométricas y datos de DM que sean locales y específicos para la región de estudio. Varias investigaciones ratifican que las ecuaciones específicas para cada ecorregión son fundamentales para aumentar la precisión de las estimaciones de biomasa y carbono. Esto resalta cómo las relaciones alométricas pueden variar significativamente entre diferentes ecorregiones y especies, e incluso dentro de la misma familia, mostrando la necesidad de ajustar ecuaciones locales como las de este trabajo. Lo anterior valida la hipótesis inicial, demostrando que las estimaciones de biomasa aérea obtenidas con ecuaciones alométricas locales difieren significativamente de aquellas producidas con ecuaciones generales o específicas de otras regiones. Esto resalta la importancia de generar y aplicar ecuaciones alométricas y datos de DM que sean locales y específicos para cada región de estudio, un paso indispensable para mejorar la precisión de los inventarios y las estrategias de manejo forestal sostenible.

Se observaron diferencias significativas en las estimaciones de biomasa de un inventario forestal al comparar ecuaciones alométricas locales con generales y distintas fuentes de valores de DM, lo que refuerza la importancia de la especificidad regional y local (Arcidiacono *et al.*, 2025). La diferencia en las fuentes de DM modificó las estimaciones de biomasa total. Al comparar la metodología Alom con Trad, se observó una disminución del 5.3% en la biomasa total. Además, la comparación entre Alom y TradDen mostró una reducción del 3.0%. Estas cifras demuestran que el uso de DM locales en las ecuaciones puede conducir a una disminución considerable de la biomasa total estimada en comparación con los datos bibliográficos. La distribución de biomasa en Chaguaral mostró variación significativa entre los diferentes estratos, lo que destaca la importancia de la estratificación para una estimación precisa. Los agrupamientos de parcelas definidos, como el estrato SePr o el ScBa, presentaron diferencias significativas en la biomasa total por hectárea. La marcada diferenciación en la composición de especies y tamaños entre estratos también sugiere que estas diferencias son esperables.

La precisión alcanzada mediante el desarrollo de ecuaciones alométricas locales para *S. triflora* y *S. praecox* tiene implicaciones prácticas directas, pues estos resultados mejoran la precisión de los inventarios de carbono y apuntan al desarrollo de políticas de mitigación del cambio climático. Se observó que el uso de ecuaciones generales puede generar diferencias de hasta 23 799.6 toneladas de biomasa en la superficie total inventariada. La utilización de estas ecuaciones locales, junto con datos de DM locales y la inclusión de la corteza, es indispensable para una mayor precisión en las estimaciones relacionadas con el manejo forestal sostenible en la ecorregión (Blundo *et al.*, 2025). La extensión y validación de este modelo metodológico a otras ecorregiones del Chaco, donde las relaciones alométricas y la DM varían significativamente, permitirá una estimación más confiable de los contenidos, la variación de carbono y la función del bosque nativo como sumidero.

CONCLUSIONES

Este estudio logró desarrollar y ajustar ecuaciones alométricas e hipsométricas locales para *S. triflora* y *S. praecox*, especies de alta frecuencia en el Chaco Salteño, lo que proporcionó una herramienta importante para la estimación precisa de la biomasa aérea en esta ecorregión. Se validó la hipótesis principal al confirmar que las estimaciones de biomasa aérea obtenidas con ecuaciones alométricas locales difieren significativamente de las generadas con aproximaciones generales o específicas de otras regiones. Asimismo, las diferencias significativas en la densidad de la madera, al contrastar la corteza con el xilema y los valores locales con los reportados en la literatura, resaltan la variabilidad inherente de las especies. La inclusión de la corteza en la determinación de la densidad es necesaria para el cálculo de biomasa y carbono, ya que puede representar hasta el 13% del carbono total. Las estimaciones de biomasa generadas por nuestra metodología de cálculo muestran una disminución considerable de la biomasa total estimada cuando se emplean densidades locales en modelos generales. Esto, en comparación con las ecuaciones alométricas locales. Este trabajo resalta la importancia de generar y aplicar ecuaciones alométricas y datos de densidad de madera que sean locales y específicos para la región de estudio. Una mayor precisión en estas estimaciones es importante para los inventarios forestales, el desarrollo de estrategias de manejo forestal sostenible, la conservación de los bosques nativos como sumideros de carbono viables y el cumplimiento de los compromisos globales relacionados con el cambio climático.

AGRADECIMIENTOS

Los autores desean expresar su profundo agradecimiento a la Universidad Nacional de La Plata (UNLP), pública, gratuita y cogobernada, por su invaluable contribución a la formación profesional e investigativa de los autores. Asimismo, extendemos nuestro reconocimiento a AIKE NBS S. A. U. por el financiamiento y por facilitar el acceso al área de estudio. Finalmente, agradecemos a los ejemplares cortados para la realización de este estudio, con el fin de obtener los datos de biomasa y DM local que sustentan la precisión de esta investigación.

CONFLICTO DE INTERESES

Los autores declaran que no existe conflicto de intereses de carácter financiero o personal que pueda haber influido de manera inapropiada en los resultados que aquí se presentan.

CONTRIBUCIÓN POR AUTOR

J. M. C. y R. L. A. idearon la investigación; J. M. C. y R. L. A. llevaron a cabo la investigación en terreno; J. M. C. y R. L. A. analizaron los datos y redactaron el manuscrito; y J. M. C. y R. L. A. contribuyeron a la discusión y comentaron los borradores.

REFERENCIAS

Arcidiacono, R. L., Taraborelli, C., Ritter, L., Martínez Pastur, G., & Cellini, J. M. (2025). Variaciones de la densidad de la madera: implicaciones en el cálculo del carbono almacenado en capueras de Misiones, Argentina. *Madera y Bosques*, 31, e312650.
<https://doi.org/10.21829/myb.2025.312650>

Atencia, M. E. (2003). *Densidad de maderas (kg/m³) ordenadas por nombre común*. INTI, CITEMA, Argentina.
<https://www.inti.gob.ar/publicaciones/descargac/366>

Blundo, C., Malizia, A., Malizia, L., Ceballos, S., Carilla, J., Fernandez, R., Jiménez, J., Osinaga Acosta, O., & Gasparri, N. I. (2025). Estimaciones de biomasa con diferentes ecuaciones alométricas: Su relación con la estructura del bosque. *Ecología Austral*, 35(1), 115-127.
<https://doi.org/10.25260/EA.25.35.1.0.2428>

Castillo-Ruperti, R. J., Rodríguez-Guerrero, B., & Bravo-Meza, K. (2022). Fijación de carbono (CO₂) del arbolado de los parques La Rotonda y La Madre, Manabí, Ecuador. *Revista Científica Multidisciplinaria Arbitrada Yachasun*, 6(10), 8-21.
<https://doi.org/10.46296/yc.v6i10.0141>

-
- Chave, J., Réjou-Méchain, M., Búrquez, A., Chidumayo, E., Colgan, M. S., Delitti, W. B. C., Domingues, T. F., Duque, A., Fernández-Mena, F., Field, R., Finegan, B., Fischer, F., Garg, M., Hérault, B., Jeffery, K. J., Jørgensen, P. M., Karmirnov, V. N., Kitayama, K., Laurance, S. G., ... Vieilledent, G.** (2014). Improved allometric models to estimate the aboveground biomass of tropical trees. *Global Change Biology*, 20(10), 3177-3190.
- Conti, G., Coirini, R., & Zapata, R.** (2013). Funciones de estimación de volumen y biomasa para *Prosopis* spp. en el Espinal santafesino. *Ciencia, Tecnología y Desarrollo*, 3(7), 39-51.
- Coronel, E. O.** (1994). *Fundamentos de las propiedades físicas y mecánicas de la Madera. Aspectos teóricos y prácticos para la determinación de las propiedades y sus aplicaciones. 1 Parte: Fundamentos de las propiedades físicas de la madera*. El Liberal.
- Di Rienzo, J. A., Casanoves, F., Balzarini, M. G., Gonzalez, L., Tablada, M., & Robledo, C. W.** (2015). *InfoStat (versión 2015)*. Centro de Transferencia InfoStat, FCA, Universidad Nacional de Córdoba.
<http://www.infostat.com.ar>
- Encyclopedia of Life.** (2024). *Global wood density database*.
<https://doi.org/10.5281/zenodo.13322441>
- Gasparri, N. I., Parmuchi, M. G., Bono, J., Karszenbaum, H., & Montenegro, C. L.** (2010). Assessing multi-temporal Landsat 7 ETM+ images for estimating above-ground biomass in subtropical dry forests of Argentina. *Journal of Arid Environments*, 74(10), 1262-1270.
- Giménez, A. M., Hernández, P., Figueroa, M. E., & Barrionuevo, I.** (2011). Diversidad del estrato arbóreo en los bosques del Chaco Semiárido. *Quebracho - Revista de Ciencias Forestales*, 19(1-2), 24-37.
- Instituto de Racionalización Argentino de Materiales (IRAM).** (1985). *IRAM 9544. Método para la determinación de la densidad aparente*. Instituto Argentino de Racionalización de Materiales.
- Iglesias, M. D. R., & Barchuk, A. H.** (2010). Modelos de regresión para estimar biomasa aérea de seis leguminosas leñosas del Chaco Árido. *Ecología Austral*, 20(1), 71-79.
- Kirby, K. R., & Potvin, C.** (2007). Variation in carbon storage among tree species: Implications for the management of a small-scale carbon sink project. *Forest Ecology and Management*, 246(2-3), 208-221.
<https://doi.org/10.1016/j.foreco.2007.03.072>
- Law, B. E., & Harmon, M. E.** (2011). Forest sector carbon management, measurement and verification, and discussion of policy related to climate change. *Carbon Management*, 2(1), 73-84.
<https://doi.org/10.4155/cmt.10.40>
- López, B. C., Sabaté, S., Gracia, C. A., & Rodríguez, R.** (2005). Wood anatomy, description of annual rings, and responses to ENSO events of *Prosopis pallida* H.B.K., a wide-spread woody plant of arid and semi-arid lands of Latin America. *Journal of Arid Environments*, 61(4), 541-554.

- López de Casenave, J., Pelotto, J. P., & Protomastro, J. J. (1995). Edge–interior differences in vegetation structure and composition in a Chaco semiarid forest, Argentina. *Forest Ecology and Management*, 72, 61-69.
- Maggio, A. D., & Cellini, J. M. (2016). *Recopilación de ecuaciones de volumen y biomasa de especies forestales de la República Argentina*. Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sustentable, Presidencia de la Nación.
<http://sedici.unlp.edu.ar/handle/10915/54918>
- Marquardt, D. W. (1963). An algorithm for least squares estimation of nonlinear parameters. *Journal of the Society of Industrial and Applied Mathematics*, 2, 431-441.
- Martínez-Cabrera, H. I., Jones, C. S., Espino, S., & Schenk, H. J. (2009). Wood anatomy and wood density in shrubs: Responses to varying aridity along transcontinental transects. *American Journal of Botany*, 96(8), 1389-1397.
- Martínez Yrizar, A., Sarukhán, J., Pérez-Jiménez, L. A., Carabias, J., Maass, M., Cervantes, A., & Solís, A. (1992). Aspectos funcionales de ecosistemas forestales tropicales de México. *Ciencia*, 43(4), 451-457.
- Návar, J., Contreras, E., & Cortés, M. (2013). Modelos fustales de biomasa aérea de árboles de bosques secos tropicales de Sinaloa, México. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales*, 4(17), 80-93.
- Návar, J., Contreras, J., & González, H. (2019). Estimación del volumen, biomasa y contenido de carbono de especies arbóreas en un bosque de Durango, México. *Revista Fitotecnia Mexicana*, 42(2), 119-127.
<https://doi.org/10.35196/rfm.2019.2.119>
- Núñez, C. E. (2007). Relaciones de conversión entre densidad básica y densidad seca de madera. *Revista de Ciencia y Tecnología*, 9(9), 44-50.
- Ontiveros, S., Manrique, S., Franco, J., Díaz, R., & Barranco, N. (2009). Estimación de la biomasa aérea leñosa en tres ambientes de la provincia de Salta. *ASADES Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente*, 13, 115-122.
- Ontiveros, S., Manrique, S., Franco, J., Díaz, R., & Barranco, N. (2015). Biomasa y stock de carbono en la Reserva de Campo Alegre, La Caldera, Provincia de Salta. *ASADES Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente*, 19, 06.01-06.12.
- Ramírez, D., Pérez de Molas, L., & Galeano, D. (2000). *Determinación de propiedades físicas de 13 especies de maderas del bosque xerofítico del Chaco Paraguayo, para la valoración como sumidero de carbono*. Universidad Nacional de Asunción.
- Restor (2025). *Restor*.
<https://restor.eco/platform/sites/2ecbb620-20cf-404a-bfa8-379a138091fe/biodiversity/trees/>
- Sato, T., Saito, M., Ramírez, D., Pérez de Molas, L.F., Toriyama, J., Monda, Y., Kiyono, Y., Herebia, E., Dubie, N., Duré Vera, E., Ramírez Ortega, J.D., & Vera de Ortiz, M. (2015) Development of allometric equations for tree biomass in forest ecosystems in Paraguay. *JARQ*, 49, 281-291.
<http://dx.doi.org/10.6090/jarq.49.281>

- Sileshi, G. W.** (2014). A critical review of forest biomass estimation models, common mistakes and corrective measures. *Forest Ecology and Management*, 329, 237-254.
<https://doi.org/10.1016/j.foreco.2014.06.026>
- Sione, S. M., Ledesma, S. G., Rosenberger, L. J., Oszust, J. D., Andrade Castañeda, H. J., Maciel, G. O., Wilson, M. G., & Sasal, M. C.** (2020). Ecuaciones alométricas de biomasa aérea para *Prosopis nigra* (Griseb.) Hieron. en bosques de Entre Ríos (Argentina). *Agronomía & Ambiente. Revista de la Facultad de Agronomía UBA*, 40(1), 63-76.
<http://agronomiayambiente.agro.uba.ar/index.php/AyA/article/view/122>
- Tálamo, A., & Caziani, S. M.** (2003). Variation in woody vegetation among sites with different disturbance histories in the Argentine Chaco. *Forest Ecology and Management*, 184, 79-92
- Tortorelli, L. A.** (1956). *Maderas y bosques argentinos*. Orientación Gráfica.
- United Nations Framework Convention on Climate Change (UNFCCC)** (2013). *Estimation of carbon stocks and change in carbon stocks of trees and shrubs in A/R CDM Project activities*.
<http://cdm.unfccc.int/methodologies/ARmethodologies/tools/ar-am-tool-14-v4.1.pdf>
- Ward, J. H.** (1963). Hierarchical grouping to optimize an objective function. *Journal of the American Statistical Association*, 58(301), 236-244.
<https://doi.org/10.1080/01621459.1963.10500845>
- Zapata, R., Guerra, P., & Bogino, S.** (2013). Anatomía del leño y potencial dendroclimático de *Ramorinoa girolae*: Una especie endémica de ambientes áridos de Argentina. *Bosque*, 34(3), 359-370.

