

Modelos alométricos multiespecie para predecir biomasa en pajonales altoandinos tropicales

Multi-species allometric models to predict biomass in tropical high Andean grasslands

Fritz Carlos Trillo Zárate^{1,5}, Cecilio Barrantes Campos¹, Gerver Romero Delgado², Edson Tito Quispe², Pamela Quiroga Espilco³, Jimny Nuñez Delgado⁴

RESUMEN

Los modelos de crecimiento y alometría de los pastizales permiten conocer fenómenos de crecimiento y desarrollo. En consecuencia, el objetivo del estudio fue desarrollar un modelo alométrico multiespecie para estimar biomasa en tres gramíneas de la zona altoandina de Jauja, Perú, a una altitud de 3600 msnm. Las gramíneas nativas fueron *Festuca dolichophylla* (J. Presl) de porte alto (50-90 cm), *Festuca humilior* (Nees & Meyen) de porte mediano (20-35 cm) y *Calamagrostis vicugnarum* (Weddell) Pilger de porte bajo (5-25 cm). Las variables medidas fueron: biomasa (g, Y_B), diámetro basal (cm, X_D), diámetro canopia (cm, X_C) y altura (cm, X_H). Se utilizó la regresión potencial eligiendo la fortaleza de los modelos por el criterio de Akaike (IAC) y el coeficiente de determinación ajustado ($R^2_{ajustado}$). El modelo alométrico multiespecie fue $Y = 1.238 * X_D^{2.231}$, debido a su menor IAC (383.795) y mayor R^2 ajustado (85.4%). *C. vicugnarum* (Weddell) Pilger tuvo un efecto sobre el modelo multiespecie basado en el diámetro basal. El modelo multiespecie en *F. dolichophylla* (J. Presl) muestra estimados promedio en 37% por

¹ Departamento de Producción Animal, Facultad de Zootecnia, Universidad Nacional Agraria La Molina, Lima, Perú

² Laboratorio de Ecología y Utilización de Pastizales, Facultad de Zootecnia, Universidad Nacional Agraria La Molina, Lima, Perú

³ Laboratorio de Análisis de Suelos, Plantas, Agua y Fertilizantes, Facultad de Agronomía, Universidad Nacional Agraria La Molina, Lima, Perú

⁴ Departamento de Producción Animal, Facultad de Medicina Veterinaria, Universidad Nacional Mayor de San Marcos, Lima, Perú

⁵ E-mail: frillo@lamolina.edu.pe

Recibido: 4 de febrero de 2020

Aceptado para publicación: 26 de agosto de 2020

Publicado: 25 de noviembre de 2020

debajo del modelo individual. La variable explicativa de diámetro basal tiene mayor fortaleza en el modelamiento para gramíneas nativas de pastizales. También se debe considerar que la altura a la hoja bandera tuvo una mayor fortaleza que el diámetro de la canopia. Los modelos alométricos multispecies permitieron aumentar la fortaleza predictiva en especies de porte alto, mediano y bajo; sin embargo, hay que considerar el comportamiento de la pendiente en *C. vicugnarum* (Weddell) Pilger y la relación modelo multispecies e individual en *F. dolichophylla* (J. Presl).

Palabras clave: alometría, diámetro basal, diámetro de canopia, gramínea, pastizales

ABSTRACT

The models of growth and allometry of grasslands allow to know growth and development phenomena. Consequently, the aim of this study was to develop a multi-species allometric model to estimate biomass in three grasses in the High Andean Zone of Jauja, Peru, at an altitude of 3600 m above sea level. The native grasses were *Festuca dolichophylla* (J. Presl) tall (50-90 cm), *Festuca humilior* (Nees & Meyen) medium (20-35 cm) and *Calamagrostis vicugnarum* (Weddell) Pilger short (5- 25 cm). The measured variables were biomass (g, Y_B), basal diameter (cm, X_D), canopy diameter (cm, X_C) and height (cm, X_H). The potential regression was used by choosing the strength of the models by the Akaike criterion (IAC) and the adjusted coefficient of determination (adjusted R^2). The multispecies allometric model was $Y = 1,238 * X_D^{2,231}$, due to its lower IAC (383.795) and higher adjusted R^2 (85.4%). *C. vicugnarum* (Weddell) Pilger had an effect on the multi-species model based on the basal diameter. The multi-species model in *F. dolichophylla* (J. Presl) shows average estimates at 37% below the individual model. The explanatory variable of basal diameter has greater modelling strength for native grasses. It should also be considered that the height of the flag leaf had a greater strength than the diameter of the canopy. The multispecies allometric models allowed to increase the predictive strength in species of high, medium and low size; however, the behaviour of the slope in *C. vicugnarum* (Weddell) Pilger and the multispecies and individual model relationship in *F. dolichophylla* (J. Presl) must be considered.

Key words: allometry, basal diameter, canopy diameter, grass, grassland

INTRODUCCIÓN

La determinación de la productividad de la biomasa es fundamental para conocer la capacidad de almacenamiento de carbono de las plantas, ya que esta varía de acuerdo con el sitio ecológico (Shipley y Dion, 1992; Brown *et al.*, 2004). En muchas especies de gramíneas nativas resulta complejo tomar medidas directas de la biomasa sin perturbar la mata, por lo que se estila el uso de modelos alométricos con las que se hacen inferencia de

productividad (Yuen *et al.*, 2016), y así poder inferir la cantidad de carbono que es retenido por el pastizal.

La cosecha de tallos, raíces y hojas es el estilo común para estimar la producción de biomasa; sin embargo, con la alometría solo se utiliza el área de las coronas y la altura de la mata para desarrollar modelos que tengan buena confianza de predicción en base al criterio de Akaike (Yang *et al.*, 2017). La alometría es un método no destructivo que

permite cuantificar y monitorear cambios ecológicos dentro de los ecotonos sucesionales dinámicos sensibles al cambio climático (Osland *et al.*, 2014).

Los ecosistemas altoandinos tropicales sobre los 3500 msnm, donde las comunidades principales son los pajonales, carecen de descriptores de fisionomía y funcionamiento para un estudio ecológico eficiente. En este caso, los modelos alométricos pueden permitir obtener niveles de referencia de la captura de carbono para establecer políticas de manejo de pastizales, así como medir el impacto de cambios de uso de la tierra (Oliveras *et al.*, 2014). La biomasa vegetativa está asociada a la biomasa reproductiva en muchas gramíneas altoandinas tropicales, por lo tanto, la medición alométrica permitirá, además dar un estimado de la capacidad reproductiva de muchas especies (Niu *et al.*, 2009).

Las modelos alométricos tienen la necesidad del uso de gran cantidad de información para que tengan buena precisión, de allí que los modelos multiespecie son una buena alternativa en ecosistemas altoandinos tropicales que tienen escasa información (Nafus *et al.*, 2009). Por lo tanto, el objetivo del presente estudio fue desarrollar un modelo alométrico multiespecie para estimar biomasa en *Festuca dolichophylla* (J. Presl), *Festuca humilior* (Nees & Meyen) y *Calamagrostis vicugnarum* (Weddell).

MATERIALES Y MÉTODOS

Área de Estudio

El estudio se realizó en el distrito de Canchayllo (Figura 1), área que corresponde a tundra húmeda, que presentó una temperatura ambiental promedio de 9 °C, velocidad de viento del N-E a 11 km/h, humedad ambiental 70% y precipitación total 680 mm. El suelo es del orden inceptisol, suborden ustepts, gran grupo calciustepts y subgrupo de lithic

calciustepts; con pendientes entre 10 y 50%, textura franco arenoso y permeabilidad moderada. La capacidad de uso mayor del suelo comprendió a tierras aptas para pastos de baja calidad agrológica, asociado a tierras de protección limitada por suelo y erosión. La toma de muestras se realizó en una superficie de 5000 m². El pastizal nativo tuvo un periodo de descanso (exclusión del pastoreo) de 12 meses. En el área de trabajo se instalaron seis transectos al paso de 50 metros lineales.

Material Vegetal

La *Festuca dolichophylla* (J. Presl) es de raíz adventicia fasciculada con rizomas no alargados, tallos de 50-90 cm de altura; lígula ciliolada de 1.8-2.7 mm, con extensiones laterales de 3 mm; láminas foliares involutas permanentemente enrolladas de 10-20 cm x 0.8-1.4 mm, panículas abiertas y laxas de 12-20 x 3-7 cm, ramas inferiores 6-10 cm, espiguillas 12-13 mm, gluma inferior 4.5-5 mm, gluma superior 5.7-6.2 mm y lemas 6-7.2 mm. Es considerada como gramínea de porte alto (Tovar, 1993).

La *Festuca humilior* (Nees & Meyen) es de hojas basales laxas y pampilíneas, de 3-6 espiguillas, flores de glumas y lemas lanceoladas acuminadas desiguales, tallos erguidos y semierguidos de 20-35 cm, lígula de 0.5-0.7 mm, láminas foliares involutas o convolutas subuladas de 4-15 cm x 0.7-1.2 mm, panículas contraídas angostas con ramas adpersa o adperso-ascendentes de 4-7 cm. Es considerada como gramínea de porte mediano (Tovar, 1993).

La *Calamagrostis vicugnarum* (Weddell) Pilger es de láminas foliares involutas, casi filiformes de 2-4.5 cm x 0.5 mm, tallos de 5-25 cm, panículas 2-6 cm, glumas angostas hacia el ápice, lema cilidricas de 3.5-4 mm, raíces rizomatosas. Es considerada gramínea de porte bajo (Tovar, 1993).

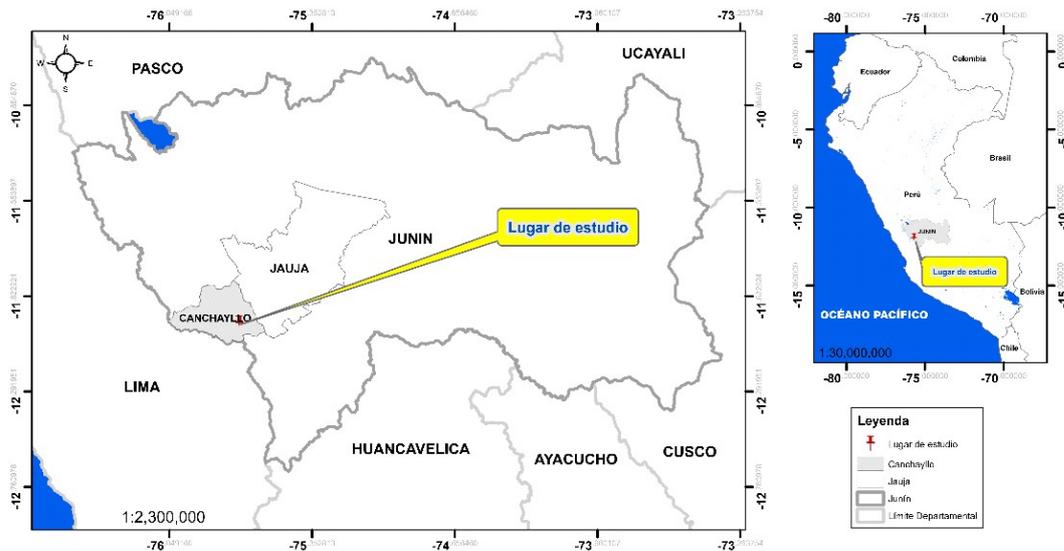


Figura 1. Ubicación geográfica de la zona de estudio

Mediciones Alométricas

Las mediciones se realizaron al final del periodo lluvioso (abril-mayo), considerándose como especies claves del sitio de pastizal a las tres especies en estudio. Con una regla milimétrica se midió el diámetro basal estimando un promedio en dos medidas ortogonales (± 0.1 mm), tanto para las matas grandes como pequeñas. La altura (cm) de mata se midió desde el suelo hasta la canopia delimitada por la hoja bandera. Posterior a la medición se cosecharon las matas a 1 cm del suelo (incluida la mitad de la corona) y se llevaron al Laboratorio de Ecología y Utilización de Pastizales de la Universidad Nacional Agraria La Molina, Lima. Se les colocó en una estufa a 60 °C por 48 horas, previa eliminación del material senescente y luego se pesaron las muestras en una balanza digital (Ohaus®, Ranger 3000) con capacidad para 3000 g y precisión de 0.1 g, y finalmente se determinó la biomasa vegetal (kg MS).

Modelos Alométricos Generalizados

Se obtuvo una relación curvilínea (escala geométrica) de biomasa-altura utilizando transformaciones de logaritmo natural (ln). El modelo $(\ln y) = a + b (\ln x)$ se transformó en $y = e^{ax^b}$, una variación de la función de potencia ($y = ax^b$) para las relaciones alométricas (Andariese y Covington, 1986). La variable respuesta fue la biomasa de la mata: $Y =$ biomasa del año 2016 al término de la época lluviosa [$\ln(\text{g, mata}^{-1})$]. Las variables explicativas fueron el diámetro basal [$X_D, \ln(\text{cm})$], diámetro canopia [$X_C, \ln(\text{cm})$] y la altura de la planta [$X_H, \ln(\text{cm})$].

Se utilizó una regresión simple por pasos ($p < 0.05$) para ingresar el comando de ajuste del modelo en el software R v. 3.4, para predecir la biomasa en cada especie (especies individuales) y para todas las especies combinadas (multiespecies).

Se propusieron siete modelos de acuerdo con las variables explicativas, de los cuales se eligió uno mediante el principio de parsimonia y el criterio de Akaike (IAC). Se evaluó el efecto de una especie individual en los modelos multiespecie, al excluir sistemáticamente una especie del modelo y luego predecir la biomasa para las especies excluidas (w). En seguida, se comparó el R^2 ajustado procedente del modelo multiespecies completo (tres especies). Las especies excluidas influyeron en el modelo multiespecies completo si $R^2_{\text{multiespecie}} \neq R^2_{\text{individual}}$.

RESULTADOS

Variables Claves para los Modelos Alométricos

Los modelos propuestos analizados bajo el IAC indicaron que los modelos 5 y 7 fueron los más apropiados para proponer un modelo alométrico; sin embargo, bajo el principio de parsimonia el modelo apropiado es el siguiente: $Y = 0.104 * X_D^{1.584} * X_H^{1.065}$ (Cuadro 1)

La variable de diámetro de canopia solamente explica el 16.3% del modelo, mientras que las variables diámetro basal y altura a la hoja bandera explican el 85.4 y 71.5%, respectivamente, de allí que pueden dar predictivos más precisos. El R^2 ajustado del modelo, al adicionar la variable explicativa altura aumenta solo en 6.5%. Ante eso, es mejor quedarse con el modelo en función al diámetro basal, debido a su menor IAC y mayor R^2 . El mejor principio de parsimonia lo evidenció el modelo $Y = 1.238 * X_D^{2.231}$.

Evaluación del Modelo Multiespecie

El *Calamagrostis vicugarum* (Weddell) Pilger tiene un impacto al ser excluido del modelo multiespecie significativo evidenciado su menor R^2 ajustado (6.7%) (Cuadro 2); sin embargo, no evidenció in-

fluencia cuando se le utilizó en los modelos predictivos con *Festuca dolichophylla* (J. Presl) y *Festuca humilior* (Nees & Meyen).

El coeficiente regresor disminuye cuando se excluye del modelo las mediciones de *F. dolichophylla* (J. Presl); sin embargo, el R^2 ajustado es similar en ambos modelos. Por otro lado, el coeficiente regresor aumenta en el modelo donde se incluye *F. dolichophylla* (J. Presl) y *C. vicugarum* (Weddell) Pilger. El coeficiente regresor es similar en el modelo multiespecie cuando se excluye *C. vicugarum* (Weddell) Pilger (Cuadro 2).

Al excluir *F. dolichophylla* (J. Presl) y *F. humilior* (Nees & Meyen), la capacidad predictiva se comporta de manera similar que cuando están incluidos en el modelo; sin embargo, el comportamiento predictivo se sobreestima para *C. vicugarum* (Weddell) Pilger.

El modelo individual de *C. vicugarum* (Weddell) Pilger evidencia menor R^2 ajustado (56.3%), mientras que *F. dolichophylla* (J. Presl) muestra un mayor R^2 ajustado (93%), incluso mayor a los de multiespecie. El modelo individual de *F. dolichophylla* (J. Presl) tiene un regresor comparable con el de los modelos multiespecie, mientras que el modelo individual de *C. vicugarum* (Weddell) Pilger muestra un regresor por debajo de los modelos multiespecie (Cuadro 2).

Predicción del Modelo Multiespecie en la Población Actual

La relación del promedio predicho en el modelo multiespecie con el modelo individual está por encima del 9-19% en *F. humilior* (Nees & Meyen) y *C. vicugarum* (Weddell) Pilger; mientras en *F. dolichophylla* (J. Presl) está por debajo en 37%.

Los modelos de especie individual evidenciaron una ligera sobreestimación; sin embargo, el modelo multiespecie en *F. humilior* (Nees & Meyen) y *C. vicugarum*

Cuadro 1. Comparación de modelos de regresión para las variables explicativas: diámetro basal (DB), diámetro de canopia (DC) y altura a la hoja bandera (AHB), utilizando logaritmo natural transformado

Variable explicativa (X)	Variable dependiente (Y): Peso de biomasa						
	Modelo						
	1	2	3	4	5	6	7
DB	2.23***			2.29***	1.58***		1.54***
EE	(0.06)			(0.07)	(0.07)		(0.08)
DC		1.18***		-0.15*		0.73***	0.08
EE		(0.171)		(0.081)		(0.090)	(0.063)
AHB			2.44***		1.07***	2.29***	1.09***
EE			(0.10)		(0.08)	(0.09)	(0.08)
Constante	1.238***	1.096	0.010***	1.592***	0.104***	0.003***	0.087***
EE	(0.072)	(0.371)	(0.300)	(0.155)	(0.188)	(0.300)	(0.244)
IAC	383.79	802.31	544.88	382.39	245.33	488.15	245.91
n	240	240	240	240	240	240	240
R ²	0.85	0.17	0.72	0.86	0.92	0.78	0.92
R ² ajustado	0.85	0.16	0.71	0.86	0.92	0.78	0.92
CME	0.23	0.55	0.32	0.23	0.17	0.29	0.17
Estadístico de F	1395.7***	47.7***	597.0***	706.5***	1342.0***	412.5***	896.6***
	(gl=1238)	(gl=1238)	(gl=1238)	(gl=2237)	(gl=2237)	(gl=2237)	(gl=3236)

* p<0.1; ** p<0.05; *** p<0.01; EE: Error estándar; IAC: Criterio de información de Akaike; CME: Cuadrado medio del error

(Weddell) Pilger evidencia sobreestimación. El regresor del modelo individual de *C. vicugnarum* (Weddell) Pilger muestra una pendiente distinta al modelo multiespecie; no obstante, la relación entre los estimados de los modelos es aceptable.

DISCUSIÓN

La fortaleza del modelo multiespecie propuesto para predecir la biomasa en gramíneas cespitosas comunes en pastizales altoandinos fue consistente con trabajos reportados para otras especies de plantas (Aguilar *et al.*, 2012; Kebede y Soromessa,

2018). Los resultados son consistentes en cuanto al uso de información multiespecie e individuales de gramíneas nativas, donde también se evidenció que la altura mejora la fortaleza predictiva de los modelos (Andariese y Covington, 1986; Nafus *et al.*, 2009). El modelo con la variable explicativa de diámetro basal presentó una precisión de 78.5-87.6%, que está dentro del rango 80-91% reportado (Nafus *et al.*, 2009; Oliveras *et al.*, 2014; Yang *et al.*, 2017).

El peso de biomasa se relaciona a través de ecuaciones alométricas de potencia con medidas como diámetro basal, diámetro de canopia y altura a la hoja bandera en gramíneas, que a su vez estén asociados con

Cuadro 2. Impacto de *Festuca dolichophylla* (J. Presl) (fedo), *Festuca humilior* (Nees & Meyen) y *Calamagrostis vicugnarum* (Weddell) Pilger (cavi) en el modelo multiespecie

Variable explicativa	Variable dependiente: Peso de biomasa fresca						
	Modelo						
	fedo-fehu-cavi	fehu-cavi	fedo-cavi	fedo-fehu	fedo	fehu	cavi
Diámetro basal	2.231***	2.037***	2.461***	2.131***	2.336***	1.990***	1.204***
EE	(0.06)	(0.089)	(0.12)	(0.122)	(0.092)	(0.097)	(0.127)
Constante	1.238***	1.303	1.138***	1.567***	0.529***	0.421***	0.596***
EE	(0.072)	(0.098)	(0.128)	(0.168)	(0.139)	(0.128)	(0.081)
IAC	383.795	119.705	107.361	154.635	56.951	169.737	57.847
Observaciones	240	95	60	85	50	120	70
R ²	0.854	0.848	0.878	0.787	0.931	0.780	0.569
R ² ajustado	0.854	0.846	0.876	0.785	0.930	0.778	0.563
CME	0.232 (gl=238)	0.445 (gl=93)	0.573 (gl=58)	0.587 (gl=83)	0.411 (gl=48)	0.483 (gl=118)	0.356 (gl=68)
Estadístico de F	1395.7*** (gl=1238)	518.9*** (gl=1; 93)	417.3*** (gl=1;58)	307.0*** (gl=1;83)	648.0*** (gl=1;48)	418.0*** (gl=1118)	89.8*** (gl=1;68)

* p<0.1; ** p<0.05; *** p<0.01; EE: Error estándar; IAC: Criterio de información de Akaike; CME: Cuadrado medio del error

Cuadro 3. Relación de las predicciones de biomasa de los modelos de multiespecie-especies individuales

Especie	Multiespecie (g)	Especie individual (g)	Tasa multiespecie / individual
<i>Festuca dolichophylla</i> (J. Presl)	26.953	42.722	0.631
<i>Festuca humilior</i> (Nees & Meyen)	19.437	17.772	1.094
<i>Calamagrostis vicugnarum</i> (Weddell) Pilger	4.167	3.497	1.192

el metabolismo ecológico en ecosistemas (Brown *et al.*, 2004). El crecimiento alométrico de las diferentes características funcionales medidas en las gramíneas nativas está asociado a perturbaciones como el pastoreo y la estacionalidad climática, las cuales han sido tomadas en cuenta en el desarrollo de este modelo (Acosta-Gallo *et al.*, 2011; Xiliang *et al.*, 2016).

La transformación logarítmica de la biomasa en plantas ajusta más los modelos predictivos alométricos, ya que se evidencia una distribución log-normal de la variable dependiente. Las variables independientes pueden ser asignadas por componentes principales o un análisis *stepwise* (Chappell, 1989; Aguilar *et al.*, 2012). Los modelos de este estudio coincidieron con una distribución log-normal y las variables explicativas se determinaron mediante *stepwise*.

Muchas de las especies de gramíneas nativas asocian su crecimiento de biomasa y producción de semillas a variables climáticas como la precipitación, siendo posible estudiar patrones alométricos para estimar la producción de semilla (Chen y Giladi, 2018). Las gramíneas altoandinas están fuertemente asociadas a la precipitación, coincidiendo su máximo crecimiento con la finalización de la época húmeda y la producción de semillas.

La captura de carbono y nitrógeno están asociadas con el desarrollo foliar en los árboles, siendo considerados bancos de almacenamiento de estos minerales en beneficio del cambio climático (Spinnler *et al.*, 2003; McClaran *et al.*, 2013; Paul *et al.*, 2019). Los pajonales altoandinos son considerados bancos de almacenamiento de carbono y nitrógeno, por lo que el uso de las ecuaciones para la predicción de su volumen de almacenamiento es clave.

La plasticidad de muchas plantas es un inconveniente al predecir la biomasa mediante ecuaciones alométricas, ya que en especies poco rígidas es difícil desarrollar una ecuación predictiva. La plasticidad de las matas

es una característica evolutiva que prioriza el crecimiento individual en desmedro del mantenimiento del sistema (Weiner, 2004). Las gramíneas nativas erectas son rígidas por lo que la estimación con ecuaciones alométricas es muy confiable, además que son especies adaptadas y mantienen el ecosistema altoandino.

CONCLUSIONES

- El modelo alométrico multiespecie en el estudio de *Festuca dolichophylla* (J. Presl), *Festuca humilior* (Nees & Meyen) y *Calamagrostis vicugnarum* (Weddell) Pilger proponen al diámetro basal y altura a la hoja bandera como variables explicativas con fortaleza predictiva, siendo la altura a la hoja bandera la que evidenció un mejor comportamiento.
- Los modelos alométricos multiespecie en función a diámetro basal permitió aumentar la fortaleza predictiva en las especies estudiadas; sin embargo, hay que considerar el comportamiento de la pendiente en *Calamagrostis vicugnarum* (Weddell) Pilger y la relación modelo multiespecie e individual en *Festuca dolichophylla* (J. Presl) cuando se desee estimar la biomasa a partir de dicha ecuación.

LITERATURA CITADA

1. **Acosta GB, Casado MA, Montalvo J, Pineda FD. 2011.** Allometric patterns of below-ground biomass in Mediterranean grasslands. *Plant Biosyst* 145: 584-595. doi: 10.1080/11263504-2011.578836
2. **Aguilar R, Ghilardi A, Vega E, Skutsch M, Oyama K. 2012.** Sprouting productivity and allometric relationships of two oak species managed for traditional charcoal making in central Mexico. *Biomass Bioenerg* 36: 192-207. doi: 10.1016/j.biombioe.2011.10.029

3. **Andariese SW, Covington WW. 1986.** Biomass estimation for four common grass species in northern Arizona ponderosa pine. *J Range Manage* 39: 472. doi: 10.2307/3899456
4. **Brown JH, Gillooly JF, Allen AP, Savage VM, West GB. 2004.** Toward a metabolic theory of ecology. *Ecology* 85: 1771-1789. doi: 10.1890/03-9000
5. **Chappell R. 1989.** Fitting bent lines to data, with applications to allometry. *J Theor Biol* 138: 235-256. doi: 10.1016/S0022-5193(89)80141-9
6. **Chen SC, Giladi I. 2018.** Allometric relationships between masses of seed functional components. *Perspect Plant Ecol* 35: 1-7. doi: 10.1016/j.ppees.-2018.09.005
7. **Kebede B, Soromessa T. 2018.** Allometric equations for aboveground biomass estimation of *Olea europaea* L. subsp. *cuspidata* in Mana Angetu Forest. *Ecosys Helth Sustain* 4: 1-12. doi: 10.1080/20964129.2018.1433951
8. **McClaran MP, McMurtry CR, Archer SR. 2013.** A tool for estimating impacts of woody encroachment in arid grasslands: allometric equations for biomass, carbon and nitrogen content in *Prosopis velutina*. *J Arid Environ* 88: 39-42. doi: 10.1016/j.jaridenv.2012.08.015
9. **Nafus AM, McClaran MP, Archer SR, Throop HL. 2009.** Multispecies allometric models predict grass biomass in semidesert rangeland. *Rangeland Ecol Manag* 62: 68-72. doi: 10.2111/08-003
10. **Niu K, Choler P, Zhao B, Du G. 2009.** The allometry of reproductive biomass in response to land use in Tibetan alpine grasslands. *Funct Ecol* 23: 274-283. doi: 10.1111/j.1365-2435.2008.01502.x
11. **Oliveras I, van der Eynden M, Malhi Y, Cahuana N, Menor C, Zamora F, Haugaasen T. 2014.** Grass allometry and estimation of above-ground biomass in tropical alpine tussock grasslands. *Austral Ecol* 39: 408-415. doi: 10.1111/aec.12098
12. **Osland MJ, Day RH, Larriviere JC, From AS. 2014.** Aboveground allometric models for freeze-affected black mangroves (*Avicennia germinans*): equations for a climate sensitive mangrove-marsh ecotone. *PLoS One* 9: e99604. doi: 10.1371/journal.pone.-0099604
13. **Paul KI, Larmour J, Specht A, Zerihun A, Ritson P, Roxburgh SH, Hobbs T. 2019.** Testing the generality of below-ground biomass allometry across plant functional types. *Forest Ecol Manag* 432: 102-114. doi: 10.1016/j.foreco.2018.08.043
14. **Shipley B, Dion J. 1992.** The allometry of seed production in herbaceous angiosperms. *Am Nat* 139: 467-483.
15. **Spinnler D, Egli P, Körner C. 2003.** provenance effects and allometry in beech and spruce under elevated CO₂ and nitrogen on two different forest soils. *Basic Appl Ecol* 4: 467-478. doi: 10.1078/1439-1791-00175.
16. **Tovar O. 1993.** Las gramíneas. Tomo 13. Madrid, España: Consejo Superior de Investigaciones Científicas. 480 p.
17. **Xialing Li, Hou X, Ren W, Baoyin T, Liu Z, Li Y, Wu Y, Xu H. 2016.** Long-term effects of mowing on plasticity and allometry of *Leymus chinensis* in a temperate semi-arid grassland, China. *J Arid Land* 8: 899-906. doi: 10.1007/s40333-016-0005-z
18. **Weiner J. 2004.** Allocation, plasticity and allometry in plants. *Perspect Plant Ecol* 6: 207-215. doi: 10.1078/1433-8319-00083
19. **Yang H, Wang Z, Tan H, Gao Y. 2017.** Allometric models for estimating shrub biomass in desert grassland in northern China. *Arid Land Res Manag* 31: 283-300. doi: 10.1080/15324982.-2017.1301595
20. **Yuen JQ, Fung T, Ziegler AD. 2016.** Review of allometric equations for major land covers in SE Asia: uncertainty and implications for above- and below-ground carbon estimates. *Forest Ecol Manag* 360: 323-340. doi: 10.1016/j.foreco.2015.09.016