

Ecuaciones volumétricas para *Alnus acuminata* Kunth (Betulaceae) de plantaciones forestales en los andes del norte peruano

Duberli Geomar Elera Gonzales¹, José Víctor Valdez Campos²,
Fernando Alain Incio Flores³, Roger Chambi Legoas⁴

Palabras Clave: modelamiento forestal, manejo forestal, Perú.

Introducción

Según FAO (2016) y Guariguata et al. (2017), el estancamiento del desarrollo de plantaciones forestales en el Perú, se debe a la falta de manejo y monitoreo del crecimiento de las plantaciones instaladas a nivel nacional desde inicios de la década de 1960. Revertir esa realidad, es uno de los mayores desafíos al que nos enfrentamos los ingenieros forestales del país, más aún cuando se siguen instalando plantaciones forestales de especies nativas y exóticas sin programas de seguimiento y monitoreo de su crecimiento.

Predecir con exactitud el crecimiento, así como el rendimiento y la calidad de los árboles y bosques, sigue siendo una parte esencial del manejo forestal (Drew 2021) y constituyen la base de la planificación a largo plazo (Tompalski et al. 2021). Los inventarios forestales constituyen la mejor fuente de información para dicho proceso (Campos & Leite, 2017), debido a que las decisiones de manejo están directamente afectadas por la disponibilidad de información biométrica relevante de los árboles (Asrat et al. 2020).

La disponibilidad de datos a nivel de árbol facilita el modelamiento del crecimiento a escala fina bien parametrizados y calibrados (Drew 2021), en ese contexto, la cuantificación del volumen maderable es una de las principales variables que requieren ser conocidas en las operaciones forestales (Revilla Chávez et al. 2021). Uno de los métodos más utilizados para cuantificar el volumen de los árboles es el uso de ecuaciones volumétricas, que estiman el volumen total del fuste a partir del diámetro y la altura total o comercial (Andrade et al. 2019; Campos & Leite 2017). Por ello, con el firme propósito de contribuir al desarrollo del sector de plantaciones forestales de Perú; el presente trabajo tiene como objetivo ajustar ecuaciones para estimar

el volumen individual de árboles de *Alnus acuminata* Kunth, especie nativa que forma parte de los agroecosistemas andinos de Perú (Visscher et al. 2023) y que en los últimos años se viene estableciendo en macizos forestales, principalmente en la zona norte de los andes peruanos.

Materiales y Métodos

Los datos fueron obtenidos a partir de la cubicación rigurosa de árboles de *Alnus acuminata* Kunth (Betulaceae) de una plantación forestal establecida en el año 2007, localizada en la margen derecha del río Utcubamba en territorio de la Comunidad Campesina Magdalena, distrito Magdalena, provincia Chachapoyas, norte de Perú, en las coordenadas -6,388526° S y -77,865488° O, a una elevación de 2570 m s.n.m. La plantación se ubica a 5 km de la capital del distrito de Magdalena y 45 km de la ciudad de Chachapoyas; la densidad inicial de la plantación fue de 1283 árboles por hectárea, establecida en sistema tresbolillo a un distanciamiento de 3 m x 3 m.

Basándose en los datos de un inventario forestal de parcelas temporales de 400 m² (20 m x 20 m) en una plantación de 8 años, una muestra de 30 árboles, distribuidos de manera proporcional en toda la amplitud del dap; fueron seleccionados y cubicados rigurosamente. La medición del diámetro a 1,30 m de altura (dap) y de la altura total (h) de los árboles fue realizada con el árbol en pie, luego, los árboles fueron talados y fueron medidos los diámetros a lo largo del fuste en secciones de 1 m de longitud. Los árboles seleccionados tuvieron un rango de 4,30 a 37,5 cm de dap y de 4,1 a 14,6 m de altura.

Los datos de cubicación fueron digitalizados en una planilla de MS Excel. El volumen de cada sección del fuste (V_s) fue calculado aplicando la fórmula de Smalian $V_s = \left(\frac{S_0 + S_1}{2} \right) \cdot l$, y el volumen total (v) de cada árbol fue calculado por la sumatoria sucesiva de los volúmenes

1 Universidad Nacional Autónoma de Chota – UNACH, Escuela Profesional de Ingeniería Forestal y Ambiental. Contacto: dgelerag@unach.edu.pe.
2 Instituto Tecnológico de la Producción – ITP, CITE Forestal Pucallpa. Contacto: jvaldez@itp.gob.pe.
3 Universidad Nacional de Frontera – UNF, Escuela de Ingeniería Forestal. Contacto: fncio@unf.edu.pe.
4 Universidad Nacional Autónoma de Chota – UNACH, Escuela Profesional de Ingeniería Forestal y Ambiental. Contacto: rchambi@unach.edu.pe.

de cada sección cubicada. Finalmente, una base de datos conteniendo los valores del dap, h y v, fue utilizada para ajustar los 6 modelos volumétricos (Tabla 1) utilizando el software R (R Core Team 2022).

Tabla 1. Modelos volumétricos utilizados

Código	Fórmula del modelo
M1	$v = \beta_0 (dap^2 \cdot h) + \varepsilon$
M2	$\log(v) = \beta_0 + \beta_1 \log(dap) + \beta_2 \log(h) + \varepsilon$
M3	$v = \beta_0 dap^{\beta_1} + \varepsilon$
M4	$v = \beta_0 (dap^2 h)^{\beta_1} + \varepsilon$
M5	$\log(v) = \beta_0 + \beta_1 \log(dap) + \beta_2 dap + \varepsilon$
M6	$\log(v) = \beta_0 + \beta_1 \log(dap^2 \cdot h) + \varepsilon$

Las estimaciones generadas por los 6 modelos volumétricos fueron evaluadas por el coeficiente de determinación (R^2), coeficiente de determinación ajustado (R_{aj}^2) y el error estándar residual ($S_{y \cdot x}$), además de análisis gráficos del volumen observado (v) frente al volumen estimado (v). Sobre la base de la evaluación descrita, se seleccionó el mejor modelo volumétrico, entre los seis evaluados.

Resultados

Los valores estimados de los coeficientes y los estadísticos de bondad de ajuste de los 6 modelos utilizados se presentan en la Tabla 2.

Tabla 2. Coeficientes y estadísticas de bondad de ajuste de los 6 de modelos ajustados

Código	β_0	β_1	β_2	R^2	R_{aj}^2	$S_{y \cdot x}$
M1	0,00004179	-	-	0,9689	0,9689	0,0306
M2	-9,39971	2,08731	0,60778	0,9744	0,9723	0,0289
M3	0,0004165	2,0383458		0,9464	0,9444	0,0410
M4	0,0001247	0,8817		0,9778	0,9769	0,0264
M5	-8,663059	2,323171	-0,002432	0,9404	0,9356	0,0441
M6	-9,77793	0,96742		0,9729	0,9719	0,0291

De manera general, podemos afirmar que los modelos volumétricos ajustados para estimar el volumen individual de árboles de *Alnus acuminata* (aliso) presentan buenas estadísticas de ajuste, con R^2 superior a 0,94, es decir, estos modelos explican más del 94% de la variabilidad de los datos de volumen mediante los diámetros y alturas.

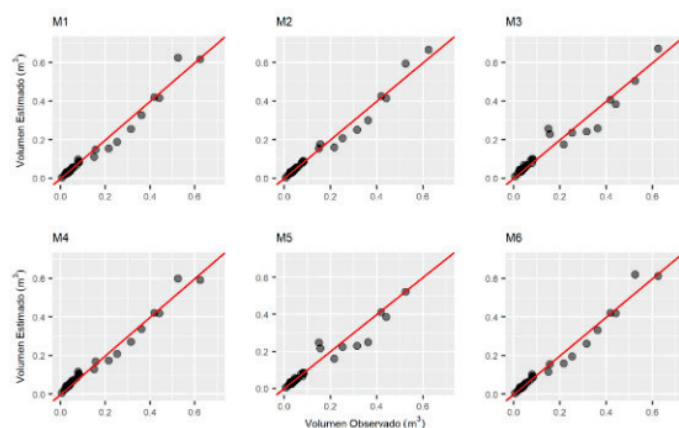


Figura 2. Valores observados vs valores estimados de los 6 modelos volumétricos utilizados

Según las estadísticas calculadas, el gráfico de valores observados y estimados y la distribución de los residuos, se propone la ecuación $v = 0,0001247(-dap^2h)0,8817$ (M4), con $R^2 = 0,9769$ como la mejor alternativa para estimar el volumen total del fuste de árboles de *Alnus acuminata* (aliso) de plantaciones forestales en la zona de estudio.

Discusión

Este trabajo es el primero que presenta modelos matemáticos para estimar el volumen individual de árboles de Aliso (*Alnus acuminata*) en plantaciones forestales de los andes del norte peruano. Su importancia resulta fundamental, ya que Aliso es una especie nativa de rápido crecimiento que representa una alternativa real para el desarrollo de proyectos de reforestación con fines comerciales en la zona andina (Aulestia-Guerrero et al. 2018). Los modelos volumétricos son una herramienta fundamental en el manejo forestal (Campos & Leite 2017) y facilitan el conocimiento del crecimiento y desarrollo a nivel de árbol y bosque, permitiendo la toma de decisiones acorde a los requerimientos y necesidades de cada especie. La buena calidad de ajuste de los modelos presentados, indica que es posible estimar el volumen del fuste en árboles de aliso a partir de datos de dap y h obtenidos a partir de inventarios forestales, tal como se utiliza en la gran mayoría de especies con cierto nivel de conocimiento silvicultural como *Guazuma crinita* (Revilla Chávez et al. 2021) o con un conocimiento avanzado de manejo como *Pinus patula* (Villar et al. 2014).

Conclusiones

Se ajustaron seis ecuaciones de regresión para estimar el volumen total del fuste de árboles de *Alnus acumi-*

nata Kunth de plantaciones forestales puras establecidas en los andes del norte de Perú. Se sugiere el uso de la ecuación $v=0,0001247(dap2h)0,8817$ para estimar el volumen total del fuste en inventarios forestales, teniendo como datos de entrada el diámetro a la altura del pecho (dap) y la altura total (h) de los árboles. El incremento de áreas de manejo, los avances en el manejo silvicultural de la especie, la mejora genética y nuevos inventarios, brindarán mayores datos para generar modelos hipsométricos e incluso modelos volumétricos más simples y precisos, así como el uso y aplicación de tecnologías modernas de inventario en plantaciones de esta especie.

Bibliografía Citada

Andrade VHF, Machado S do A, Figueiredo Filho A, Botosso PC, Miranda BP, & Schöngart J. (2019). Growth models for two commercial tree species in upland forests of the Southern Brazilian Amazon. *Forest Ecology and Management*, 438, 215–223. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2019.02.030>

Asrat Z, Eid T, Gobakken T, Negash M. (2020). Modelling and quantifying tree biometric properties of dry Afromontane forests of south-central Ethiopia. *Trees*, 34(6), 1411–1426. <https://doi.org/10.1007/s00468-020-02012-8>

Aulestia-Guerrero E, Jiménez L, Quizhpe-Palacios J, Capa-Mor D. (2018). *Alnus acuminata* kunth: una alternativa de reforestación y fijación de dióxido de carbono. *Bosques Latitud Cero*, 8(2). <https://revistas.unl.edu.ec/index.php/bosques/article/view/495>

Campos JCC, Leite HG. (2017). *Mensuração florestal: perguntas e respostas*. 5a Edição, atualizada e ampliada. In Viçosa, MG: Universidade Federal de Viçosa (5a Edição). Editora UFV.

Drew DM. (2021). Exploring new frontiers in forecasting forest growth, yield and wood property variation. *Annals of Forest Science*, 78(2), 30. <https://doi.org/10.1007/s13595-021-01054-3>

FAO. (2016). *Los bosques y el cambio climático en el Perú*.

Guariguata, M. R., Arce, J., Ammour, T., & Capella, J. L. (2017). *Las plantaciones forestales en Perú: Reflexiones, estatus actual y perspectivas a futuro*. Center for International Forestry Research (CIFOR). <https://doi.org/10.17528/cifor/006461>

R Core Team. (2022). *R: A language and environment for statistical computing*. In R Foundation for Statistical Computing (4.2.2). R Foundation for Statistical Computing. <https://www.R-project.org/>

Revilla Chávez JM, Abanto-Rodríguez C, Guerra Arévalo WF, García Soria D, Guerra Arévalo H, Domínguez Torrejón G, da Silva Carmo ILG. (2021). Modelos alométricos para estimar el volumen de madera de *Guazuma crinita* en plantaciones forestales. *Scientia Agropecuaria*, 12(1), 25–31. <https://doi.org/10.17268/sci.agropecu.2021.003>

Tompalski P, Coops NC, White JC, Goodbody TRH, Hennigar CR, Wulder MA, Socha J, Woods ME. (2021). Estimating Changes in Forest Attributes and Enhancing Growth Projections: a Review of Existing Approaches and Future Directions Using Airborne 3D Point Cloud Data. *Current Forestry Reports*, 7(1), 1–24. <https://doi.org/10.1007/s40725-021-00135-w>

Villar CMÁ, Marcelo BFE, Baselly VJR, Villena, VJJ. (2014). Estimación de volúmenes maderables en plantaciones de *Pinus patulashltdl. & cham.* en la Cooperativa Atahualpa Jerusalén Granja Porcón en la región Cajamarca. In Instituto Nacional de Innovación Agraria. INIA. Estación Experimental Agraria Baños del Inca - Cajamarca. <http://repositorio.inia.gob.pe/handle/inia/912>

Visscher AM, Vanek S, Meza K, Wellstein C, Zerbe S, Ccanto R, Olivera E, Huaraca J, Scurrah M, & Fonte SJ (2023). Tree-based land uses enhance the provision of ecosystem services in agricultural landscapes of the Peruvian highlands. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 342, 108213. <https://doi.org/10.1016/J.AGEE.2022.108213>