

Ecuaciones alométricas para la estimación de la biomasa arbórea a partir de residuos de plantaciones de *Gmelina arborea* Roxb. y *Tectona grandis* L.f. en Guanacaste, Costa Rica

Allometric equations for estimation of tree biomass from plantation residues of *Gmelina arborea* Roxb. and *Tectona grandis* L.f. in Guanacaste, Costa Rica

Mainor Rodríguez¹ • Dagoberto Arias²  • Juan Carlos Valverde²  • Diego Camacho³ 

Abstract

The use of thinning residues and the final harvests of plantations of *Gmelina arborea* and *Tectona grandis* for energetic purposes has become a financially viable activity in the most recent years; however, in most cases neither the producer nor the buyer has an estimate in generated biomass. For the purpose of facilitating the commercialization of biomass, it is necessary to have allometric equations that facilitate an estimation of the biomass produced. In this paper, the objective was to generate and validate allometric equations to calculate the aerial forest biomass from the residues of *Gmelina arborea* and *Tectona grandis* plantations; the study was developed with three plantations of *T. grandis* and two plantations of *G. arborea* with different ages; harvesting individuals and calculating the amount of biomass produced. Nine allometric models were analyzed and a decrease ratio of the percentage of residues was found as the diameter of the individuals of both species increased. For *T. grandis* the best model was $B = 7,35^{0,16 \cdot d}$ with a R^2 of 0.75 and an average square error of 85.51; with *G. arborea* the best model was $B = 5,40^{1,24 \cdot d}$ with a R^2 of 0.82 and an average square error of 100.54. The feasibility of using these models is to estimate the crop residues of non-timber plantations, since multiple studies show the functionality of the models including the use of wood.

Key words: Forest plantation, forest biomass, branches, biomass estimation, forest residues.

1. Departamento Producción, Biomass Internacional de Costa Rica; Guanacaste, Costa Rica; mbetors@gmail.com

2. Escuela de Ingeniería Forestal, Tecnológico de Costa Rica; Cartago, Costa Rica; darias@tec.ac.cr; jcvalverde@tec.ac.cr

3. Programa de Regionalización Interuniversitaria, CONARE; Cartago, Costa Rica; dicamacho@tec.ac.cr

Recibido: 19/07/2017

Aceptado: 10/06/2018

Publicado: 19/09/2018

DOI: 10.18845/rfmk.v15i1.3723

Resumen

El uso de los residuos de los raleos y las cosechas finales de plantaciones de *Gmelina arborea* y *Tectona grandis* con fines energéticos, se ha convertido en una actividad financieramente viable en los años más recientes; sin embargo en la mayoría de los casos ni el productor ni el comprador tienen un estimado de la biomasa generada. Para efectos de facilitar la comercialización de la biomasa es necesario disponer de ecuaciones alométricas que faciliten una estimación de la biomasa producida. En el presente trabajo se planteó como objetivo generar y validar ecuaciones alométricas para el cálculo de la biomasa forestal aérea a partir de los residuos de plantaciones de *Gmelina arborea* y *Tectona grandis*; el estudio se desarrolló con tres plantaciones de *T. grandis* y dos plantaciones de *G. arborea* con distintas edades; cosechando individuos y calculando la cantidad de biomasa producida. Se analizaron nueve modelos alométricos y se encontró una relación de decrecimiento del porcentaje de residuos conforme aumentaba el diámetro de los individuos de ambas especies. Para *T. grandis* el mejor modelo fue $B = 7,35 \cdot 0,16^d$ con un R^2 de 0,75 y un cuadrado medio del error de 85,51; para *G. arborea* el mejor modelo fue $B = 5,40 \cdot 1,24^d$ con un R^2 de 0,82 y cuadrado medio del error de 100,54. La viabilidad de uso de estos modelos es con la finalidad de estimar los residuos de la cosecha de las plantaciones que no es maderable, ya que múltiples estudios muestran la funcionalidad de los modelos incluyendo el uso de la madera.

Palabras clave: Plantación forestal, biomasa forestal, ramas, estimación de biomasa, residuos forestales.

Introducción

La biomasa de origen vegetal se ha convertido en la última década en una de las mejores opciones para el desarrollo de proyectos energéticos (Kim y Park, 2016), ya que presenta la ventaja de ser una energía renovable, no requiere tecnologías de alto costo para su obtención y transformación, se puede implementar en sitios donde el desarrollo económico es limitado y puede beneficiar economías locales, sus ciclos productivos son cortos y de manejo sencillo, ajustados a la demanda energética que tenga el mercado (Suzuki et al., 2017); la biomasa vegetal se puede obtener a partir de especies herbáceas, arbustivas y arbóreas (Chen et al., 2009), que se pueden plantar en cultivos mixtos (combinación de especie herbáceas con arbóreas o arbustivas), cultivos puros (de una especie única) o procedente de residuos de los sistemas agro productivos (Bilgili et al., 2017).

El sector forestal constituye una de las áreas con mayor potencialidad para la generación de biomasa energética (MINAE, 2011; ICE, 2015); tradicionalmente se ha dedicado a la obtención de madera sólida para aserrijo (dedicada al segmento constructivo, mueblero, papelerero entre otros), lo que ha significado que en el proceso de obtención de la madera se genere una gran cantidad de residuos (ONF, 2015), esto debido a la falta de conicidad y asimetría de las trozas, en conjunto con los defectos como rajaduras en la madera, nudos por ramas y médula que varían entre especies y la edad del individuo (ONF, 2016), haciendo necesario el desarrollo de patrones de corte que permitan obtener las piezas de interés comercial con la mayor calidad posible y que incidan en una mayor eficiencia en su aprovechamiento, generalmente inferior al 60 % con respecto del volumen inicial de la troza (Elghoneimy y Gruver, 2011).

Tradicionalmente los residuos obtenidos se han utilizado en productos de menor valor agregado (Fang et al., 2017) o en procesos de manufactura complejos para generación de otros productos compuestos como son los laminados de madera sólida o las láminas aglomeradas (Beusheva et al., 2006); no obstante, el uso más extendido ha sido la generación energética, en la que los residuos se combustionan en calderas y a partir del calor se genera electricidad para alimentar el proceso productivo o para la venta (Elghoneimy y Gruver, 2011), siendo un proceso que disminuye la dependencia eléctrica de las empresas pero generalmente cuenta con deficiencias, producto de diseños ineficientes o tecnologías con eficiencia inferior al 40 % de la capacidad potencial de la biomasa consumida (Herbert y Krishnan, 2016).

Otra opción que se puede acceder con la silvicultura es al desarrollo de plantaciones dendroenergéticas, que consisten en cultivos de alta densidad (con más de 5 000 árboles por hectárea), con un manejo productivo mínimo y enfocado únicamente a la producción de biomasa (Gonzalez-Salazar et al., 2016), aunque se pueden combinar sistema de producción de madera y biomasa. Bajo este contexto productivo, la prioridad es la producción de altos volúmenes de biomasa indiferentemente de la calidad que tenga (algo que en la silvicultura tradicional de la madera es de vital importancia) (Biddinika et al., 2017). Sin embargo, el desarrollo de cultivos dendroenergéticos en la región centroamericana aún se encuentra a nivel piloto o en plantaciones con extensiones reducidas (Barboza, 2016).

En el caso de Costa Rica, el sector forestal se ha enfocado en el manejo del bosque natural, el aprovechamiento de árboles en potreros y la silvicultura de plantaciones forestales, todos con el objetivo de la producción maderera para múltiples usos (Arias, 2004), especializándose en la reforestación de dos

especies de alta demanda nacional (*Gmelina arborea* Roxb.) e internacional (*Tectona grandis* L.f.), especies que presentan ciclos de cosecha que varían de 6 a 30 años dependiendo del objetivo del cultivo y un ciclo de podas y raleos para la mejora de la calidad de la madera (Pancel, 2016), generando en el ciclo de vida del modelo productivo, una cantidad de residuos que generalmente no son cuantificados ni utilizados y terminan siendo abandonados, quemados o enterrados (de Camino y Morales, 2013). En cambio, el desarrollo de las plantaciones dendroenergéticas aunque continúa siendo limitado, se ha enfocado al desarrollo de plantaciones piloto que bajo un paquete tecnológico óptimo busca la producción exclusiva de biomasa bajo las condiciones del país (Barboza, 2016).

En complemento con el bagazo, la cascarilla de arroz y residuos de la palma aceitera, los residuos forestales se han convertido en la mejor opción del mercado energético nacional, existiendo un vacío de información sobre las cantidades, frecuencia de generación, características y distribución de dichos residuos. Es de vital importancia para generar información confiable, disponer de ecuaciones alométricas de referencia que faciliten la estimación de la biomasa al momento de ofertarla en el mercado (Méndez-González et al., 2011). El presente trabajo consistió en el desarrollo de modelos alométricos para el cálculo de la biomasa forestal a partir de los residuos de plantaciones de *G. arborea* y *T. grandis* aprovechadas en Guanacaste, Costa Rica.

Materiales y métodos

Especies y sitios de estudio

Se analizaron plantaciones de *Gmelina arborea* y *Tectona grandis* que se establecieron con fines madereros (figura 1). La selección de las plantaciones de ambas especies, consideró los siguientes factores: (i) que cada sitio representara las especies, el manejo silvicultural y los fines productivos de la región (ii) los residuos obtenidos no calificaban como producto para aserrío y (iii) la biomasa obtenida pudiera comercializarse en el mercado nacional.

Se seleccionaron dos plantaciones de *G. arborea*, con edades de 4 y 9 años, la primera plantación se ubicó en Abangares, Guanacaste y estaba caracterizada por la aplicación de un raleo selectivo al 40 % al tercer año; la segunda plantación se localizó en Nandayure, Guanacaste y se le aplicó la cosecha total de los individuos. En cambio, con *T. grandis*, se utilizaron tres plantaciones forestales con distintas edades (5,9 y 19 años), localizadas en Hojancha, Guanacaste; a la plantación de 5 y 9 años de edad se les aplicó raleos

selectivos con intensidades del 33 %, mientras que la plantación de 19 años se cosechó en su totalidad.

Selección y variables dasométricas evaluadas

Se seleccionaron 30 individuos de *G. arborea* y 40 individuos de *T. grandis* siguiendo la metodología descrita por Ortíz (2005), la selección se dio a partir de la valoración de la distribución diamétrica de los individuos existentes en el sitio que permitieron generar las categorías diamétricas presentes en el cuadro 1; los árboles seleccionados se caracterizaron por estar ausentes de enfermedades y daños mecánicos en su estructura al igual de ubicarse en los bordes de la plantación.

Cada árbol cosechado se le midió el diámetro a 1,3 m sobre nivel del suelo, la altura total y la altura comercial (definida hasta que el fuste del individuo presentó un diámetro mínimo de 8 cm o presencia de las ramas de la copa), posteriormente se cortó en segmentos de 2,5 m de longitud, midiendo el diámetro de cada cara de las trozas generadas (figura 2). A cada árbol se le calculó el área basal, implementando la ecuación 1.

$$g = \frac{\pi}{4} \cdot d^2 \quad (1)$$

Donde: g es el área basal del individuo en m^2 ; d es el diámetro a 1,3 m sobre nivel del suelo en m.

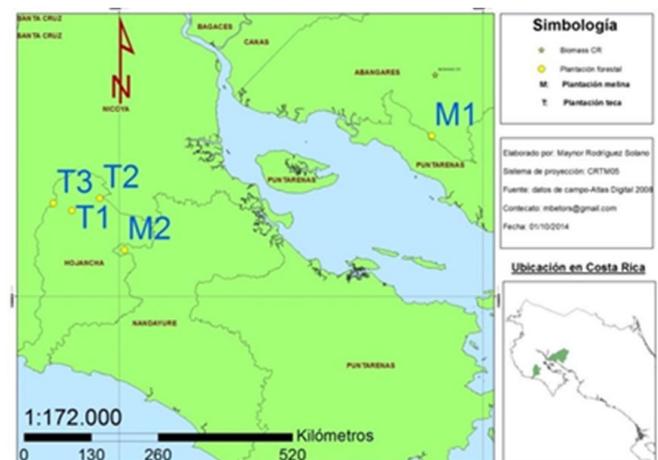


Figura 1. Ubicación geográfica de las tres plantaciones de *T. grandis* y las dos plantaciones de *G. arborea* evaluadas para desarrollo de ecuaciones alométricas para biomasa de residuos en Guanacaste, Costa Rica.

Figure 1. Geographic location of the three plantations of *T. grandis* and two plantations of *G. arborea* evaluated for the development of allometric equations for waste biomass in Guanacaste, Costa Rica.

Además, se calculó el volumen total en condición verde del cada individuo, implementando la fórmula de Smalian (ecuación 2).

$$V_{TV} = \frac{(g_1 + g_2)}{2} \cdot l \quad (2)$$

Donde: V_{TV} es el volumen total en condición verde del individuo en m^3 ; g_1 es el área basal del diámetro menor de la troza en m^2 ; g_2 es área basal del diámetro mayor de la troza en m^2 y l es la longitud de la troza en metros.

Posteriormente, se pesaron todos los árboles medidos por segmentos considerando las trozas como las ramas y se sacaron muestras equivalentes al 10 % del peso total y se secaron por un periodo de 48 horas a 105 °C para determinar el contenido de humedad en la madera que para *T. grandis* fue de 52 % y para *G. arborea* del 69 %.

Ajuste y selección de las ecuaciones alométricas

A partir de las mediciones de los individuos cosechados, se seleccionaron 30 individuos de *T. grandis* y 20 individuos de *G. arborea* (de cada una de las clases diamétricas definidas), para el ajuste de nueve ecuaciones alométricas propuestas por Arias (2004), a cada modelo se le calculó sus respectivos coeficientes (cuadro 2) y se determinó su coeficiente de determinación (R^2) y el cuadrado medio del error y demás estimadores sobre la bondad del modelo (diferentes gráficos de residuales); se seleccionaron los tres modelos en cada especie que mostraron el mayor ajuste y menor error y cumplieran los supuestos de normalidad y análisis gráfico de los residuos; estos modelos se validaron con 10 árboles de cada especie que no se consideraron dentro del desarrollo de los modelos y a partir de ello se calculó el error de modelo y prueba de Wilcoxon según Ortiz (2005).

Análisis estadísticos

A partir de los pesos secos de la biomasa de fuste y ramas se determinó el porcentaje de residuos con respecto al volumen total de cada individuo, posteriormente se calculó el peso de dichos residuos en función al diámetro. Con respecto a la prueba y validación de las ecuaciones alométricas se desarrollaron con el paquete estadístico SAS versión 9.2; con una significancia del 95 %.

Resultados y discusión

Caracterización inicial de las plantaciones

La plantación de *T. grandis* con cinco años de edad se caracterizó por tener un diámetro promedio de 9,1

Cuadro 1. Categorías diamétricas y cantidad de árboles muestreados de *T. grandis* y *G. arborea* para desarrollo y validación de ecuaciones alométricas de residuos forestales de plantaciones en Guanacaste, Costa Rica.

Table 1. Diameter categories and number of trees sampled from *T. grandis* and *G. arborea* for development and validation of allometric equations of forest residues from plantations in Guanacaste, Costa Rica.

Especie	Clase diamétrica (cm)	Cantidad de árboles muestreados
<i>T. grandis</i>	5,0 - 15,0	10
	15,0 - 25,0	10
	25,0 - 35,0	20
<i>G. arborea</i>	5,0 - 25,0	10
	25,0 - 35,0	10

Cuadro 2. Ecuaciones alométricas ajustadas para cálculo de la biomasa seca de los residuos de *T. grandis* y *G. arborea* procedentes de plantaciones forestales en Guanacaste, Costa Rica.

Table 2. Adjusted allometric equations for calculating the dry biomass of *T. grandis* and *G. arborea* residues from forest plantations in Guanacaste, Costa Rica.

Ecuación	Ecuación alométrica
1	$B = \alpha^{B \cdot d}$
2	$B = 10^{\alpha \cdot d^{\beta}}$
3	$B = (\alpha \cdot (d / (d + 1))) + \beta \cdot d$
4	$B = \alpha / (1 + \beta^{(-\lambda \cdot d)})$
5	$B = 10^{(\alpha + \beta \cdot (1/d))}$
6	$B = (\alpha \cdot \beta / (d + 1)) + \beta \cdot d$
7	$B = \alpha \cdot e^{(\beta/d)}$
8	$B = \alpha / (1 + \beta \cdot e^{(-\lambda \cdot d)})$
9	$B = 10^{\alpha \cdot d^{\beta}}$

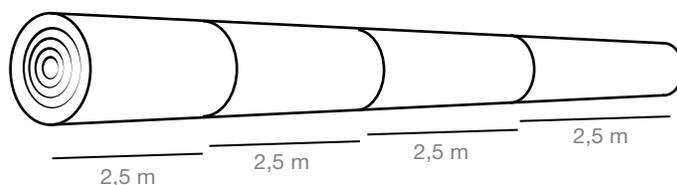


Figura 2. Esquema de mediciones diamétricas realizadas a diferentes alturas del fuste de los árboles de *T. grandis* y *G. arborea* cosechados en plantaciones ubicadas en Guanacaste, Costa Rica.

Figure 2. Diagram of metric measurements taken at different heights of the tree trunks of *T. grandis* and *G. arborea* harvested in plantations located in Guanacaste, Costa Rica.

cm a una densidad de 1 100 árb/ha, la plantación de 8 años presentó un diámetro promedio de 21,1 cm a una densidad de 625 árb/ha y la plantación de 19 años con un diámetro promedio de 29,6 cm a una densidad de 333 árb/ha. Los diámetros promedio de las plantaciones concuerdan con evaluaciones realizadas por Pérez y Kanninen (2015) en plantaciones de *T. grandis* en la zona norte de Costa Rica con valores diamétricos de 8,5 a 10,5 cm en plantaciones de 4 a 6 años y de 25,4 a 30,9 cm en plantaciones con más de 15 años con densidad de 333 árboles/ha.

En el caso de las dos plantaciones de *G. arborea*, la de edad de cuatro años presentó un diámetro medio de 10,1 cm a una densidad de 900 árb/ha y la plantación con 9 años de edad presentó un diámetro promedio de 28,9 cm a una densidad de 625 árb/ha; los valores en ambos casos guardan congruencia a los presentados por Morataya et al. (2015) para la región norte de Costa Rica con valores de 9,86 cm de diámetro para plantaciones de 9 años de edad y de 26,6 cm de diámetro en plantaciones de 10 años de edad, con suelos de baja fertilidad con acidez moderada.

Relación entre los residuos forestales en condición verde en función al diámetro

El análisis de los residuos forestales mostró para ambas especies que conforme aumentaba el diámetro del individuo, el porcentaje de residuos se disminuye (figura 3), en el caso de *T. grandis* se obtuvo una reducción del 45 % de residuos entre la menor clase diamétrica (de 5 a 10 cm) y la mayor clase diamétrica (de 30 a 35 cm); en cambio con *G. arborea* con la ecuación 2, la reducción fue del 32 %. Esto evidencia que el manejo silvícola concentra la biomasa en el componente de interés, que para fines comerciales es la madera.

La tendencia de reducción porcentual de residuos por aumento diamétrico se debe a que los árboles con diámetros bajos cuentan con un uso industrial limitado y en muchos casos financieramente poco rentable para el desarrollo de productos de bajo costo en la industria del aserrío (Zhao et al. 2017), por cual tienden a ser considerados como desecho o material sin uso en el campo; además, por su composición tienden a presentar una relación porcentual alta de biomasa acumulada en ramas (material que a nivel industrial es poco relevante), en cambio con árboles con diámetros superiores a 15 cm se pueden desarrollar múltiples productos debido a que alcanzan alturas mayores y con ello generan un volumen comercial superior al de los residuos concentrados en ramas y deformidades de las trozas. Wayne et al. (2017) menciona que los procesos de cosecha maderera con fines productivos en las especies tropicales con diámetros superiores a 20 cm, se pueden obtener entre el 60 a 80 % del volumen total del árbol, ya que la potencialidad productiva se concentra en las trozas de

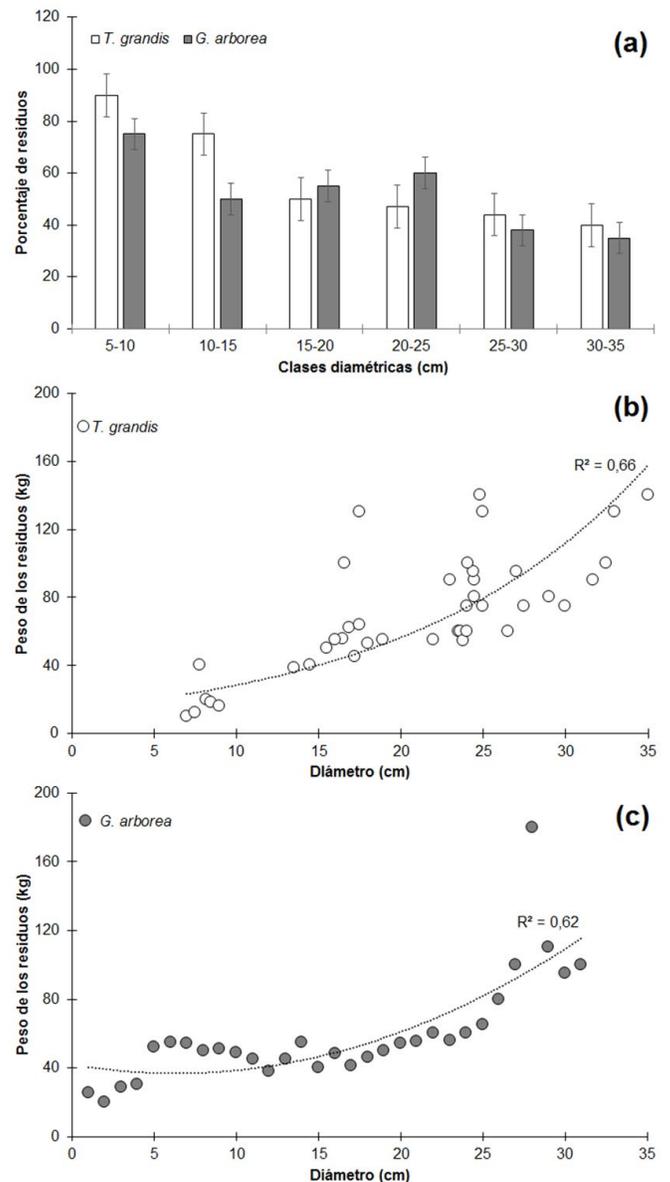


Figura 3. Porcentaje de residuos (a) y peso de residuos secos (b y c) en función al diámetro para árboles cosechados de *T. grandis* y *G. arborea* de plantaciones ubicadas en Guanacaste, Costa Rica.

Figure 3. Percentage of residues (a) and weight of dry residues (b and c) depending on the diameter for trees harvested from *T. grandis* and *G. arborea* from plantations located in Guanacaste, Costa Rica.

madera para optimizar la obtención de productos a nivel de industrial.

Con respecto a la relación entre el peso de la biomasa seca con respecto a la clase diamétrica; en ambas especies se determinó el mismo comportamiento que conforme el diámetro aumenta, el peso de los residuos se incrementaron de forma exponencial, alcanzando con *T. grandis* (figura 3b) valores de biomasa máxima por individuo hasta de 160 kg, mientras con *G. arborea* de 182 kg (figura 3c). Estas variaciones se deben a que

Cuadro 3. Tres mejores ecuaciones alométricas obtenidas para cálculo de la biomasa seca en función al diámetro para plantaciones de *T. grandis* y *G. arborea* procedentes plantaciones en Guanacaste, Costa Rica.

Table 3. Three best allometric equations obtained for the calculation of dry biomass according to diameter for plantations of *T. grandis* and *G. arborea* in Guanacaste, Costa Rica.

Especie	No. Ecuación	Ecuación alométrica	R ²	CME	P.F
<i>T. grandis</i>	1	$B=7,35^{(0,16^d)}$	0,75	85,51	0,001
	2	$B=10^{(2,58-9,53*(1/d))}$	0,67	110,07	0,001
	3	$B=((-54,91*9,20)/(d+1))+9,20*d$	0,60	103,80	0,001
<i>G. arborea</i>	4	$B=5,40^{(1,24*d)}$	0,82	100,54	0,001
	5	$B=10^{(-0,29*d^{1,28})}$	0,73	120,72	0,001
	6	$B=(-0,24*d/(d+1))+1,24*d$	0,68	123,10	0,001

los árboles de pequeño tamaño presentan residuos de bajo peso, debido a que el grado de desarrollo de estos individuos es limitado (Palotti et al. 2017), si bien pueden presentar gran cantidad de ramas se caracterizan por tener un tamaño pequeño y con ello un peso reducido (Bellouard et al. 2017). En árboles maduros, la biomasa presente en ramas es mayor debido a que presentan un mayor desarrollo fisiológico y el grado de madurez permite el desarrollo de ramas más gruesas y extensas para mantener proporcionalmente una copa suficiente para generar la fotosíntesis necesaria para el desarrollo individuo (Ordóñez et al., 2001).

Ecuaciones alométricas para el cálculo de biomasa de residuos a partir del diámetro

La evaluación de los modelos de biomasa en función al diámetro se muestra en el cuadro 3, de los tres modelos que generaron mejores predicciones de biomasa, se destaca para *T. grandis* el modelo muy simple $B=7,35^{0,16^d}$ con un R² de 0,75 y un CME de 85,75; estudios desarrollados por Méndez-González et al. (2011) en plantaciones de la misma especie en México reportaron para el mismo tipo de ecuación valores R² inferiores a 0,69 con árboles de 12 años; en cambio con la ecuación 2 y 3 los valores de R² fueron inferiores al 0,67 y mostraron valores de cuadrado medio del error superiores a 103,80; la variación en estos modelos es la funcionalidad para relacionar diámetro con volumen (Paolotti et al. 2017) Los modelos para predecir biomasa, en cambio se ven afectados por las variaciones externas como las condiciones del sitio, el material genético utilizado, la competencia entre los individuos y varios aspectos del manejo de la plantación que afectan de manera directa los cálculos de biomasa (Méndez-González et al. 2011).

Al analizar gráficamente el comportamiento de los datos de validación (observados) con respecto a los proyectados con las tres ecuaciones (figura 4a) se muestra que los datos de las ecuaciones alométricas 1 y 2 se encuentran dentro las bandas de predicción al 95 %, en cambio los datos generados con la ecuación 3 tiene después de 25 cm de diámetro a sobrestimar los valores de la biomasa, esto debido a que es un modelo exponencial con un error considerable que no se adapta concretamente a las condiciones del estudio. Esta situación según (Forrester et al. 2017) tiende a ocurrir en ecuaciones que están diseñadas para plantaciones homogéneas con poca variabilidad entre individuos con la misma variable dependiente (en este caso diámetro) como se mostró en la figura 3a, posterior a los 25 cm, los valores de biomasa tienden a fluctuar y con ello un decrecimiento en los valores, generando que la ecuación 3 no tienda a adaptarse a las condiciones de las plantaciones bajo estudio.

En cuanto a la especie *G. arborea*, las ecuaciones obtenidas (cuadro 3) mostraron valores de R² de 0,65 a 0,82 con valores de CME inferiores a 124,00; siendo la ecuación $B=5,401^{24^d}$ la que mostró mejor coeficiente de determinación (de 0,82) y menor cuadrado medio de error (de 100,54) estos valores concuerdan a los presentados por Wayne et al. (2017) que definieron como mejor modelo para la misma especie, el mismo modelo obteniendo un R² de 0,68 para árboles de 7 años de edad, destacando que para predecir la biomasa en *G. arborea*, algunos factores como la densidad y el uso de material genético natural (semilla) o mejorado (clones) afecta directamente la distribución de la biomasa aérea. Las ecuaciones 5 y 6 del presente estudio mostraron un ajuste menor; al evaluar los datos observados con los predichos de cada ecuación (figura 4b) se denota que la

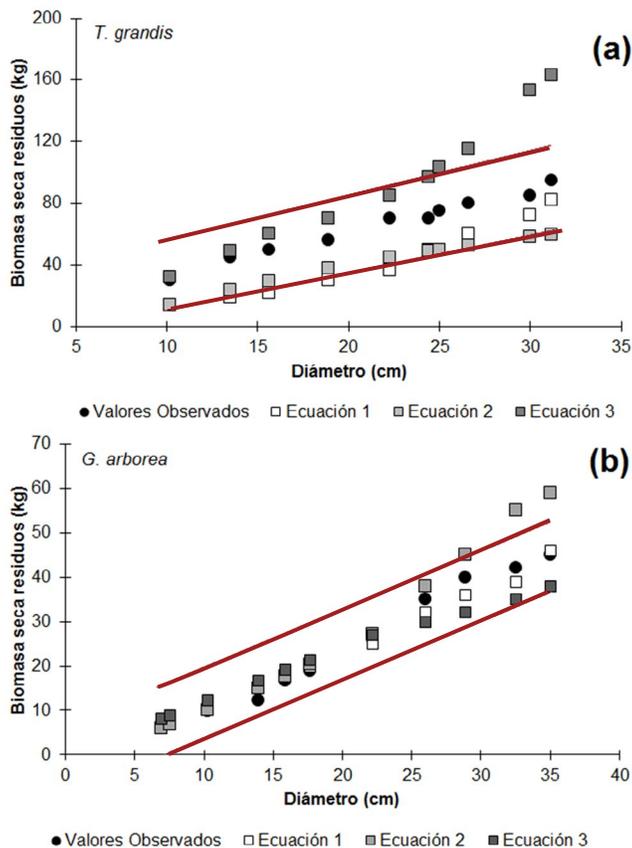


Figura 4. Datos observados y obtenidos por las ecuaciones alométricas para cálculo de la biomasa seca en función al diámetro para *T. grandis* y *G. arborea* procedentes de plantaciones ubicadas en Guanacaste, Costa Rica.

Figure 4. Data observed and obtained by allometric equations to calculate the dry biomass according to the diameter for *T. grandis* and *G. arborea* from plantations located in Guanacaste, Costa Rica.

ecuación 3 muestra mejor ajuste, en cambio la ecuación 4 con diámetros posteriores a 25 cm sobrestiman la biomasa. La ecuación 5 tiende levemente a subestimar valores en la biomasa con diámetros superiores a 30 cm pero sin salir de las bandas de predicción al 95 %.

Los resultados obtenidos muestran la viabilidad de uso de los modelos seleccionados; sin embargo, es importante considerar que pueden tener sesgos en su implementación al depender de aspectos aún complicados de parametrizar como la definición de la madera comercial y las secciones no comerciales, ya que esto varía de las condiciones del sitio, la especie, la genética y el objetivo planteando. Sobre esto último para el caso del presente estudio, se definió claramente las dimensiones o secciones del fuste para fines, de ahí que se debe tener claro el principio inicial del objetivo, esto destacado por Henry et al. (2010) que encontró variaciones de un 20 % entre datos estimados y reales para la estimación de la biomasa producto de un cambio

en los fines del aprovechamiento, encontrando que en plantaciones que se dedican a productos laminados, los requerimientos tienden a tener mayor exigencia de calidad en comparación a fines constructivos, por lo cual se recalca que los modelos para predecir residuos deben partir de una clara definición del concepto de las secciones comerciales.

Conclusiones

El estudio encontró que para ambas especies hay una clara tendencia hacia un decrecimiento del porcentaje de residuos con respecto al diámetro (naturalmente en función de la edad), encontrando que en diámetros menores a 25 cm, la producción de material considerada como residuo es superior al 70 % y en diámetros superiores este porcentaje baja hasta en un 50 %; esto debido a un aumento de la biomasa útil para el desarrollo de productos o materiales maderables. También se encontró que conforme el diámetro de los individuos aumenta, el peso de la biomasa de los residuos se incrementa esto debido a la presencia de ramas o segmentos de la copa que ya no califican como productivos para madera y tienden a ser de mayor tamaño.

En cuanto a las ecuaciones alométricas, se determinó que la mejor ecuación para *T. grandis* fue $B = 7,35^{0,16^d}$ con un R^2 de 0,75 y cuadrado medio del error de 85,51; para *G. arborea* el mejor modelo fue $B = 5,40^{1,24^d}$ con un R^2 de 0,82 y cuadrado medio del error de 100,54. Es importante aclarar que la viabilidad de estos modelos se relaciona con plantaciones cuyo objetivo de cosecha final es con fines maderables, ya que múltiples estudios muestran que la funcionalidad de los modelos se ve altamente afectada por el tipo de uso de la madera, que afecta las características y la cantidad de residuos que se generan y se dejan en el sitio.

Agradecimientos

Agradecemos a la Vicerrectoría de Investigación y Extensión (VIE) del Tecnológico de Costa Rica, al Ministerio de Ciencia, Tecnología y Telecomunicaciones (MICITT), al Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Tecnológicas (CONICIT) por todo el apoyo logístico, técnico y financiero brindado durante la ejecución del presente estudio que formó parte del proyecto “Impulso tecnológico para la producción, transformación y uso de la biomasa para energía y biomateriales a partir de los residuos lignocelulósicos” (Contrato FI084-13).

Referencias

- Arias, D. (2004). Validación del índice de densidad del rodal para el manejo de plantaciones forestales de *Tectona grandis* L.f. en el trópico. *Kurú: Revista Forestal*, 1(1): 1-9.
- Barboza, J. (2016). Análisis de factibilidad financiera de un proyecto de gasificación de biomasa forestal para la generación de 2 MW de potencia en Costa Rica. Tesis de Licenciatura, Escuela de Ingeniería Forestal, Tecnológico de Costa Rica. 57 p.
- Bellouard, Q., Abanades, S., Rodat, S., Dupassieux, N. (2017). Solar thermochemical gasification of wood biomass for syngas production in a high-temperature continuously-fed tubular reactor, *International Journal of Hydrogen Energy*, 42: 13486-13497
- Biddinika, M., Ali, R., Rosyadi, R., Diponegoro, A., Tokimatsu, K., Takahashi, F (2017). Challenges on the Adoption of Rapid Appraisal Method for Assessment of Online Information on Biomass Energy, *Energy Procedia*, 105: 3207-3212.
- Bilgili, M., Koçak, E., Bulut, U., Ku kaya, S. (2017). Can biomass energy be an efficient policy tool for sustainable development?, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 71, 2017: 830-845.
- Chen, M., Zhao., Xia, I. (2009). Comparison of four different chemical pretreatments of corn stover for enhancing enzymatic digestibility, *Biomass Bioenergy* 33: 1381-1385.
- De Camino, R., Morales, J. (2013). Las plantaciones de teca en América Latina: Mitos y realidades. Turrialba, Costa Rica, 410 p.
- Elghoneimy, E., Gruver, W. (2011). Intelligent Decision Support and Agent-Based Techniques Applied to Wood Manufacturing International Symposium on Distributed Computing and Artificial Intelligence. 1: 85-88.
- Fang, Y., Lin, L., Feng, H., Lu, Z., Emms, G. (2017) Review of the use of air-coupled ultrasonic technologies for nondestructive testing of wood and wood products, *Computers and Electronics in Agriculture*, 137: 79-87
- Forrester, D., Tachauer, T., Annighoefer, P., Barbeito, I., Pretzsch, H., Ruiz-Peinado, R., Stark, H., Vacchiano, G., Zlatanov, T., Chakraborty, T., Saha, S., Sileshi, G. (2017). Generalized biomass and leaf area allometric equations for European tree species incorporating stand structure, tree age and climate, *Forest Ecology and Management*, 396: 160-175.
- Gonzalez-Salazar, M., Venturini, M., Pogonietz, W., Finkenrath, M., Ruggero, P. (2016). Methodology for improving the reliability of biomass energy potential estimation, *Biomass and Bioenergy*, 88: 43-58.
- Henry, M., Besnard, A., Asante, W., Eshun, J., Adu-Bredu, S., Valentini, R., Bernoux, M., Saint-André, L. (2010). Wood density, phytomass variations within and among trees, and allometric equations in a tropical rainforest of Africa, *Forest Ecology and Management*, 260: 1375-1388.
- Herbert, G., Krishnan, A. (2016). Quantifying environmental performance of biomass energy, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 59: 292-308.
- ICE. (2015). Potencialidad nuevas energías de producción eléctrica. San José, Costa Rica: ICE.
- Kim, K., Park, K. (2016). Financial development and deployment of renewable energy technologies, *Energy Economics*, 59: 238-250
- Méndez-González, J., Luckie-Navarrete, S., Capó-Arteaga, M., Nájera-Luna, A. (2011). Ecuaciones alométricas y estimación de incrementos de biomasa aérea y carbono en una plantación mixta de cuatro especies tropicales, en *Guanajuato, México. Agrociencia*, 45. 479-491.
- MINAE. (2011). Perspectiva nacional hacia la Carbono Neutralidad 2012 y sus respectivos restos. San José, Costa Rica: MINAE.
- Morataya, G., Steel, N., Walt, W. (2015). Bioenergy process to increase productivity in Latin America. *Biomass*. 35:145-155.
- ONF. (2015). Uso y aportes de la madera en Costa Rica. Heredia Costa Rica. 33 p.
- ONF. (2016). Impacto económico de la madera en Costa Rica. Heredia Costa Rica. 40p.
- Ortiz, (2005). Crecimiento y Rendimiento Forestal. Escuela de Ingeniería Forestal, Tecnológico de Costa Rica 75 p.
- Ordóñez J., De Jong, A., Masera. O. (2001). Almacenamiento de carbono en un bosque en Nuevo San Juan, Michoacán. *Madera y Bosques* 7: 27-47.
- Pancel, L. (2016). Basic outline of tree plantations in the tropics. Amsterdam, Netherlands: Springer. 356p.
- Paolotti, L., Martino, G., Marchini, A., Boggia, A. (2017). Economic and environmental assessment of agro-energy wood biomass supply chains. *Biomass and Bioenergy*, 97: 172-185.
- Pérez, F., Kanninen, H. (2015). Preliminary phytochemical screening, pharmacognostic and physicochemical evaluation of leaf of *Gmelina arborea*. *Journal of Photochemistry and Photobiology*. 103: 159-165
- Suzuki, K., Tsuji, N., Shirai, Y., Hassan, M., Osaki, M. (2017). Evaluation of biomass energy potential towards achieving sustainability in biomass energy utilization in Sabah, Malaysia. *Biomass and Bioenergy*, 97: 149-154.
- Wayne, M., Samuel, E., Oyamakin, E., Angela, R., Chukwu, U. (2017). A new nonlinear model applied to the height-DBH relationship. *Forest Ecology and Management*, 397: 139-149.
- Zhao, X., Liu, W., Deng, Y., Zhu, J. (2017). Low-temperature microbial and direct conversion of lignocellulosic biomass to electricity: Advances and challenges. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Volume 71: 268-282.

Este artículo debe citarse como:

Rodríguez, M; Arias, D; Valvede, JC; Camacho, D. (2018). Ecuaciones alométricas para la estimación de la biomasa arbórea a partir de residuos de plantaciones de *Gmelina arborea* y *Tectona grandis* en Guanacaste, Costa Rica. *Revista Forestal Mesoamericana Kurú*, 15 (Suppl. 01): 61-68. doi. 10.18845/rfmk.v15i1.3732