



Revista de CIENCIAS AMBIENTALES Tropical Journal of Environmental Sciences



Modelos alométricos para la estimación de biomasa y carbono en *Alnus acuminata*

Allometric models for estimating biomass and carbon in *Alnus acuminata*

William Fonseca^a, Laura Ruíz^b, Marilyn Rojas^c y Federico Alice^d

^a Ingeniero forestal, director de la Escuela de Ciencias Ambientales de la Universidad Nacional, Costa Rica, wfonseca@una.ac.cr. ^b Ingeniera forestal e investigadora de la Escuela de Ciencias Ambientales de la Universidad Nacional, Costa Rica, laurarauizcespedes@gmail.com. ^c Ingeniera forestal e investigadora de la Escuela de Ciencias Ambientales de la Universidad Nacional, Costa Rica, marilynrv9@gmail.com. ^d Ingeniero forestal e investigador de la Escuela de Ciencias Ambientales de la Universidad Nacional, Costa Rica, dr.tiza@gmail.com.

Director y Editor:

Dr. Eduardo Mora-Castellanos

Consejo Editorial:

Enrique Lahmann, UICN, Suiza
Enrique Leff, UNAM, México
Sergio Molina, Universidad Nacional, Costa Rica
Olman Segura, Universidad Nacional, Costa Rica
Rodrigo Zeledón, Universidad de Costa Rica
Gerardo Budowski, Universidad para la Paz, Costa Rica

Asistente:

Rebeca Bolaños-Cerdas



Modelos alométricos para la estimación de biomasa y carbono en *Alnus acuminata*

William Fonseca, Laura Ruiz, Marilyn Rojas y Federico Alice

W. Fonseca, ingeniero forestal, es director de la Escuela de Ciencias Ambientales de la Universidad Nacional (Costa Rica) (wfonseca@una.ac.cr). L. Ruiz (lauraruizcespedes@gmail.com), M. Rojas (marilynrv9@gmail.com) y F. Alice (dr.tiza@gmail.com) son ingenieros forestales e investigadores en esa misma unidad académica.

Resumen

Para cuantificar el potencial de las plantaciones forestales como mitigadoras del cambio climático, se necesita información de la biomasa total y de su ritmo de crecimiento. Estudiar la dinámica de la biomasa es una actividad compleja y costosa, según el método utilizado. El objetivo principal de esta investigación fue construir modelos alométricos para estimar la biomasa en los diferentes componentes del árbol (hojas, ramas, fuste y raíz) y en el árbol completo, para *Alnus acuminata* (Kunth), en Costa Rica. Adicionalmente, se desarrollaron modelos para estimar la biomasa y el carbono en árboles por hectárea y para la biomasa y el carbono totales (árboles + vegetación herbácea + necromasa).

Abstract

In order to quantify the climate change mitigation potential of forest plantations, information on total biomass and its growth rate is required. Depending on the method used, the study of the biomass behavior can be a complex and expensive activity. The main objective of this research was to develop allometric models to estimate biomass for different tree components (leaves, branches, stem and root) and total tree biomass in *Alnus acuminata* (Kunth) in Costa Rica. Additionally, models were developed to estimate biomass and carbon in trees per hectare and for total plant biomass per hectare (trees + herbaceous vegetation + necromass). To construct the tree models, 41

Introducción

El calentamiento global, producto del incremento en las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) de origen antropico (uso de combustibles fósiles y cambio de uso de la tierra, principalmente), es uno de los problemas más importantes que enfrenta la humanidad. Las emisiones se incrementaron 3,5 veces desde 1950 hasta los años noventa, una cantidad aproximada de 6,2 000 000 de toneladas de CO₂ por año (IPCC, 2007; Ravindranath y Ostwald, 2008; Streck, Sullivan, Janson y Tarasofsky, 2008).

Los bosques naturales y las plantaciones forestales aumentan cada día su importancia en la mitigación del cambio climático porque regulan el ciclo global del carbono (IPCC, 2007; Bonan, 2008; Liu, Zhao, Si Wang, Biao Lin y Quan Rao, 2008; Basu, 2009). Estos ecosistemas capturan el dióxido de carbono (CO₂) atmosférico y lo fijan en su biomasa. Las plantaciones en el trópico, por

Se evaluaron 41 parcelas distribuidas en 7 sitios y se extrajeron 47 árboles con un diámetro entre 4,5 y 44,5 cm. En los modelos seleccionados para el fuste, la raíz y la biomasa total del árbol se logró un $r^2 > 93,87 \%$, mientras que para las hojas y las ramas un r^2 de 88 %, en los modelos para la biomasa y/o el carbono en árboles y en total por hectárea el r^2 fue $> 99 \%$. El factor de expansión de biomasa promedio fue de 1,22 para biomasa aérea y de 1,43 para la relación biomasa aérea total - biomasa de raíz. La fracción de carbono en la biomasa vegetal varió entre 32,9 y 46,7 % y el porcentaje de carbono en el suelo fue de 3 %.

Palabras clave: *Alnus acuminata*, biomasa, cambio climático, fijación de carbono, modelos alométricos.

sampling plots were evaluated in 7 sites from which 47 trees with a diametric from 4.5 to 44.5 cm were selected to be harvested. In the selected models for the stem, root and total tree biomass, a $r^2 > 93.87 \%$ was accomplished, while the r^2 for leaves and branches was 88 %. For the biomass and carbon models for total trees and total plant biomass per hectare the r^2 was $> 99 \%$. Average biomass expansion factor was 1.22 for aboveground and 1.43 for total biomass (when the root was included). The carbon fraction in plant biomass varied between 32.9 and 46.7 % and the percentage of soil carbon was 3 %.

Keywords: *Alnus acuminata*, allometric models, biomass, carbon fixation, climate change.

su velocidad de crecimiento, poseen mayor capacidad de fijación de carbono y brindan otros servicios ecosistémicos (Salinas y Hernández, 2008; Vallejo, 2009; Fonseca, Navarro, Alice y Rey-Benayas, 2012; Balmaceda, 2012).

Sin embargo, el Protocolo de Kioto, a través del mecanismo de desarrollo limpio (MDL), establece largos, complicados y costosos procedimientos, lo que sumado a la falta de métricas de carbono y a la existencia de muchas barreras hace difícil que el sector forestal pueda ingresar a los mercados de carbono (Salinas y Hernández, 2008). Ante las dificultades del MDL, los países tropicales tienen una nueva opción para obtener ingresos por el carbono almacenado, mediante el programa REDD+ (reducción de emisiones por deforestación y degradación de bosques). Costa Rica ha liderado esta iniciativa y cuenta con la propuesta Readiness R-PP Costa Rica, presentada al Forest Carbon Partnership Facility (FCPF) (Costa Rica, 2010). Para desarrollar esta propuesta y alcanzar la meta de carbono neutralidad promulgada por el gobierno, se debe aumentar el área por restaurar a través

de sucesión secundaria y de plantaciones forestales (Costa Rica, 2009).

La superficie de las plantaciones forestales en el mundo, para el año 2010, se estimó en aproximadamente 264 000 000 de hectáreas, un incremento de 5 000 000 de $\text{ha}^{-1} \text{año}^{-1}$ (FAO, 2010). Las plantaciones en áreas tropicales y subtropicales constituyen el 45 % de los recursos forestales mundiales y el 55 % se encuentra en los países templados y boreales (FAO,



L. Ruiz. Plantación de jaúl, Costa Rica

Cuadro 1. Características de las fincas con plantaciones forestales de *A. acuminata*. Promedio \pm de la desviación estándar (SD) para del dap y el número de árboles

Finca	Edad (años)	dap (cm)	N.º de árboles por ha ⁻¹	N.º de parcelas
Juanito Hernández	3	7,9 \pm 1,86	680 \pm 0,70	2
Lechería 2	5	7,3 \pm 0,38	782 \pm 5,01	12
Landelina	10	23,9 \pm 0,52	324 \pm 6,49	10
Hermanos Pinto	10	20,1 \pm 1,07	350 \pm 7,84	5
Julieta Vargas	12	20,1 \pm 0,32	369 \pm 4,61	6
Matinilla	14	26,3 \pm 3,05	155 \pm 7,02	4
Vara Blanca	22	29,0 \pm 1,58	300 \pm 56,57	2

2006). En Costa Rica existen aproximadamente 40 000 ha y las especies más utilizadas para reforestar son *Gmelina arborea*, *Tectona grandis*, *Vochysia guatemalensis*, *Cupressus lussitanica* y *Alnus acuminata* (OET, 2008; SIREFOR, 2011).

Dada la situación actual y previendo las demandas futuras de información, se propuso investigar el potencial de mitigación del cambio climático que posee *A. acuminata* en plantación forestal y se formuló la siguiente pregunta: ¿cómo realizar estimaciones actuales y futuras de biomasa y carbono con facilidad y precisión? Adicionalmente, se brinda información sobre el factor de expansión de biomasa (FEB) y la fracción de carbono (FC) en los diferentes componentes de la biomasa. Se espera que la información generada provea elementos que faciliten el establecimiento de políticas para el pago por servicios ambientales y contribuya al fortalecimiento de mecanismos de monitoreo, reporte y verificación del carbono, establecidos por la estrategia REDD+ de Costa Rica.

Métodos

Área de estudio

La información de campo se recolectó mayoritariamente en el cantón de Vázquez de Coronado. Según Holdridge (1967), el área corresponde

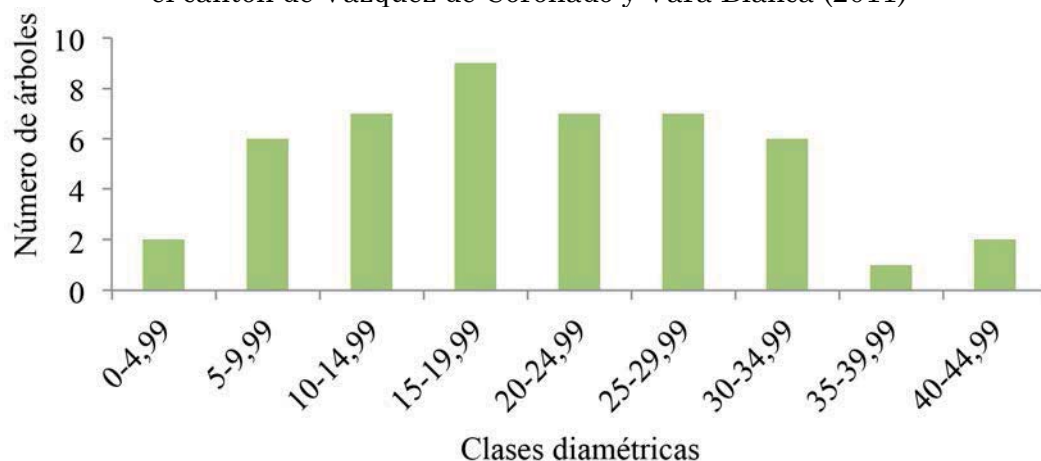
a las zonas de vida bosque pluvial montano bajo y bosque pluvial premontano. La altitud varía entre los 1300 y 1800 msnm. La precipitación media anual oscila entre los 2000 y 3000 mm y la temperatura entre los 15,3 y 18 °C. Las plantaciones se desarrollan en suelos jóvenes con horizonte b, bien drenados, de origen

volcánico y del orden inceptisol (ITCR, 2008), de color oscuro, fértiles y de topografía ondulada.

Muestreo de la biomasa por árbol, no arbórea y necromasa por el método destructivo

Se seleccionaron 6 fincas con plantaciones de *A. acuminata* con edades entre 2 y 14 años (cuadro 1), en donde la CNFL tiene instaladas unidades (parcelas) de muestreo permanentes, de forma rectangular, de 500 m². Adicionalmente, se trabajó en una plantación de 22 años en el sitio denominado Vara Blanca, ubicado dentro de la zona de distribución natural de la especie. La cantidad de parcelas por sitio varió entre 2 y 12, dependiendo del tamaño de la plantación (Salas y Castillo, 2010). En las plantaciones sin parcelas permanentes, se establecieron unidades temporales para determinar la estructura diamétrica. Dentro de cada parcela (permanente o temporal), a cada árbol se le midió el diámetro normal a 1,3 m sobre el nivel del suelo (dap). En cada parcela fueron elegidos 1 o 2 árboles, con un dap cercano al promedio para cuantificar la biomasa. En las parcelas con mayor abundancia de árboles se extrajeron 2 ejemplares. La muestra fue de 47 individuos cubriendo un rango entre 4,5 y 44,5 cm de dap (figura 1).

Figura 1. Distribución diamétrica de los árboles muestreados en las plantaciones de *A. acuminata* con edades entre 2 y 13 años, en el cantón de Vázquez de Coronado y Vara Blanca (2011)



En el caso de la raíz, se evaluó principalmente la raíz estructural (diámetro > 5 mm), según la clasificación propuesta por Sierra, Del Valle y Orrego (2001), y todas aquellas raíces de diámetro menor que al extraer la raíz principal quedan adheridas a esta. Las raíces fueron estimadas mediante la excavación y extracción del sistema radicular de los árboles cortados, usando diferentes equipos, según el sitio de trabajo y las facilidades existentes en las fincas (retroexcavadora, tractor agrícola con cadena y tecla). Las raíces fueron lavadas en el campo y pesadas después de secarse al aire durante aproximadamente 2 horas.

La biomasa no arbórea (herbácea) se recolectó en 4 subparcelas de 1 m² cada una, la necromasa fina (hojarasca y ramas con un diámetro < 2,5 cm) en 4 subparcelas de 0,25 m² cada una y la necromasa gruesa (ramas con un diámetro > 2,5 cm) en 1 subparcela de 25 m². Las subparcelas fueron seleccionadas aleatoriamente dentro de la parcela de 500 m².

Para cuantificar la biomasa, se obtuvo en el campo y por separado el peso fresco de los diferentes componentes del árbol: hojas (Bho), ramas (Brm), fuste (Bfu), raíz (Bra), además del peso de la vegetación herbácea (VH) y de la necromasa

(gruesa y fina). Se tomó una muestra de aproximadamente 550 g, de cada componente de biomasa, para llevarla al laboratorio y secarla en un horno a 60 °C durante 72 horas, con el fin de estimar su contenido de materia seca (MS). En el caso de árboles cuyo volumen representaba un ingreso económico al propietario de la plantación,

se determinó el volumen comercial por medio de la fórmula de Smalian (Prodan, Peters, Cox y Real, 1997) y se utilizó el peso específico de la madera (0,4 gr/cm³ según FAO, 1992; Carpio, 1995; CATIE, 2003) para transformar a biomasa seca.

Biomasa y carbono en la biomasa total por hectárea

La biomasa arbórea (incluyendo raíces) se calculó usando información de parcelas temporales establecidas por Ruiz (2011) y de la red de parcelas permanentes de la CNFL, en total una muestra de 288 observaciones (parcelas). Los individuos de cada parcela se agruparon en clases diamétricas (5 cm de rango) y se calculó el dap promedio por clase. La biomasa del árbol promedio se estimó usando el modelo alométrico desarrollado para el árbol completo, indicado en el cuadro 2 de la sección Resultados. La biomasa y el carbono se obtienen al aplicar las siguientes fórmulas:

$$B_{\text{árb ha}} = \left[\sum_{i=1}^n (B_{\text{árb clase diam}} * n.^{\circ} \text{árb clase diam}) \right] / 1000$$

$$C_t = B_{\text{árb ha}} * FC + B_{\text{vh}} * FC + B_{\text{necromasa}} * FC$$

Donde:

Bárb ha = biomasa arbórea (Mg ha^{-1} = megagramos por hectárea)

$B_{\text{árb clase diam}}$ = biomasa (kg) del árbol de diámetro promedio en la clase diamétrica

$N.^{\circ}$ árb clase diam = número de árboles en la clase diamétrica

Ct = carbono total (Mg ha^{-1})

Bvh = biomasa de la vegetación herbácea (Mg ha^{-1})

Bnecromasa = biomasa de la necromasa (Mg ha^{-1})

FC = fracción de carbono, xxx promedio para los componentes del árbol, xxx para la vegetación herbácea y xxx promedio para necromasa fina y gruesa (Ruíz, 2011).

Ajuste y selección de modelos por árbol y por hectárea

Los modelos se ajustaron mediante el método de mínimos cuadrados ordinarios. Se ensayaron aproximadamente 25 modelos para cada componente de la biomasa del árbol (Bho, Brm, Bfu, Bra) y para la biomasa total del árbol ($B_{\text{árbol}}$). Adicionalmente, se construyeron modelos para la biomasa y el carbono arbóreo por hectárea y para la biomasa y el carbono totales por hectárea (árboles + herbáceas + necromasa). Para construir los modelos se utilizó el programa estadístico Statgraphics Centurion 15.1.02. Para seleccionar la ecuación de mejor ajuste se procedió según la metodología expuesta por Salas (2002) y Segura y Andrade (2008), cumpliendo los siguientes pasos.

- ✓ Comprobación de los supuestos del análisis de regresión (normalidad, independencia y homogeneidad de varianzas). Los modelos fueron eliminados cuando no cumplieron alguno de estos supuestos o cuando presentaron, al menos, un coeficiente no significativo con un nivel de significancia de 0,05.
- ✓ Cálculo de indicadores de ajuste:



L. Ruíz. Plantación de jaúl, Costa Rica

- *El coeficiente de determinación ajustado* (r^{2aj}), cuanto más cercano a uno sea r^{2aj} , el ajuste del modelo será mayor (Segura y Andrade, 2008).
- *El error estándar de la estimación (EEE)*, cuanto menor sea el EEE, el ajuste del modelo será mayor.
- ✓ Cálculo de indicadores de capacidad predictiva de los modelos:
 - *Error cuadrático medio (ECM)*.
 - *Diferencia agregada (DA)*.
- ✓ El índice de Furnival (Furnival, 1961), para comparar modelos lineales con aquellos donde la variable dependiente fue transformada.
- ✓ Error de predicción del modelo (E %) según Chave, Andalo, Brown, Cairns, Chambers, Eamus, Folster, Fromard, Higuchi, Kira, Lescure, Ogawa, Puig, Riéra y Yamakura (2005).

Los modelos que cumplieron con los supuestos de regresión fueron calificados según los indicadores citados anteriormente (r^2_{aj} , EEE, PRESS, ECM, DA, E %). Para el r^2_{aj} la menor calificación correspondió cuando está más cerca de 0 y la mayor al acercarse a 1. En los demás indicadores la escala fue inversa (entre más cerca de 0 la calificación fue mayor). El modelo con mayor puntaje resultó seleccionado. Sumadamente, se graficaron los valores estimados contra los observados, para ver si los modelos sobreestiman o subestiman el cálculo de la biomasa. También, por método gráfico se observó el comportamiento biológico de los modelos.

Validación de los modelos

Los modelos de biomasa total por árbol se validaron con una base de datos de 40 individuos colectados por Fonseca (2009b) y Ruiz (2011), usando la misma metodología, así como los modelos de biomasa y carbono por hectárea con 72

observaciones aportadas por la CNFL que representan la variedad en edad, sitios y crecimientos en diámetro. En este caso, la biomasa y el carbono se calculó según lo indicado en la sección tras anterior (titulada Biomasa y carbono en la biomasa total por hectárea).

Determinación de carbono en la biomasa y en suelo

La muestra seca de cada componente de biomasa y de suelo se trituró a 10 micras para determinar la materia orgánica (MO). El análisis de la materia orgánica se realizó haciendo uso de la metodología de Walkey y Black (Álvarez y Marín, 2011).

Resultados

Modelos de biomasa por árbol y por hectárea

Se ajustaron modelos para cada uno de los componentes del árbol (Bho, Brm, Bfu y Bra) y

para el árbol completo (B_t) (cuadro 2); para la biomasa y el carbono arbóreo por hectárea, y para la biomasa y el carbono totales por hectárea. Los modelos seleccionados presentaron un r^2_{aj} superior al 88 % y error estándar inferior a 0,565, un ajuste significativo al 95 % y una $P < 0,05$. Los coeficientes de cada modelo fueron siempre significativos con una $P < 0,05$. Se observó que los residuos de

Cuadro 2. Modelos de biomasa por componente (hojas (Bho), ramas (Brm), fuste (Bfu), raíces (Bra), árbol ($B_{\text{árbol}}$)) y modelos para estimar biomasa y carbono por hectárea en *A. acuminata* en plantación

Modelo	r^2	EEE	ECM	DA	IF	E%	n
Bho = $\exp(-3,67571 + 1,05572 \cdot \sqrt{\text{dap}})$	88,47	0,452	1,81	0,1	0,4	7,2	47
Brm = $\exp(-3,36041 + 1,31651 \cdot \sqrt{\text{dap}})$	88,42	0,565	13,9	0,36	0,5	8,2	47
Bfu = $\exp(-3,07585 + 2,54774 \cdot \ln(\text{dap}))$	96,97	0,285	48,6	9,6	0,2	1,2	43
Bra = $\exp(-4,44859 + 2,5061 \cdot \ln(\text{dap}))$	93,87	0,388	10,76	0,14	0,3	9,6	47
$B_{\text{árbol}} = \exp(-2,62104 + 2,51636 \cdot \ln(\text{dap}))$	97,63	0,269	58,08	13,2	0,2	1,0	43
Ba = $\exp(0,699735 + 1,28343 \cdot \ln(G))$	99,33	0,102	5,1	0	0,1	0,5	288
Ca = $\exp(-0,145192 + 1,28792 \cdot \ln(G))$	99,33	0,102	2,2	0	0,1	0,4	288
$B_t = \exp(1,77333 + 0,937561 \cdot \ln(G))$	89,24	0,234	11,8	1,7	0,2	1,2	38
$C_t = \exp(0,996085 + 0,455591 \cdot \ln(G^2))$	89,56	0,272	5,2	0,7	0,3	3,6	39

Donde: Bfu = biomasa de fuste (kg), Bho = biomasa de hojas (kg), Brm = biomasa de ramas (kg), Bra = biomasa de raíces (kg), $B_{\text{árbol}}$ = biomasa del árbol completo (kg), C_t = carbono en biomasa total (Mg ha^{-1}), Ba = biomasa arbórea (Mg ha^{-1}), Ca = carbono arbóreo (Mg ha^{-1}), B_t = biomasa total (Mg ha^{-1}), dap = diámetro a 1,30 m sobre el nivel del suelo (cm Ø), G = área basal ($\text{m}^2 \text{ha}^{-1}$), ln = logaritmo natural, r^2 = coeficiente de determinación, EEE = error estándar de los estimados, ECM = error cuadrático medio, DA = diferencia agregada, IF = índice de Furnival, E% = error de predicción del modelo, n = tamaño de la muestra.

los modelos presentaron una distribución normal. Todos presentaron buen comportamiento biológico y expresan la biomasa y/o el carbono como una función de la raíz cuadrada del dap o del logaritmo natural (ln) del dap o del área basal. En el nivel de árbol, la biomasa del fuste, la raíz y la biomasa total presentaron mejor ajuste ($r^2_{aj} > 94\%$), mientras que las hojas y las ramas obtuvieron un r^2_{aj} de 88 %. En los modelos de biomasa y carbono por hectárea (cuadro 2), el ajuste fue superior al 99 %, excepto para el carbono en biomasa total (C_t) con un r^2_{aj} de 89,56 %.

En general, la biomasa y/o el carbono estimados con los modelos elegidos presentan un comportamiento similar a la biomasa y/o el carbono observado, en donde la sobre o subestimación promedio de los valores estimados con respecto a los observados fue menor al 4 % (cuadro 2, figuras 1 y 2 del apéndice).

Factores de expansión de biomasa

En *A. acuminata* el FEB promedio es de 1,22 para la biomasa aérea y de 1,43 cuando se incluyó la biomasa radicular. En ambos casos el error de muestreo fue de 2,3 % (cuadro 3).

Fracción de carbono en la biomasa y porcentaje de carbono en el suelo

La fracción de carbono (FC) en los distintos compartimentos de la biomasa (árboles, hierbas, necromasa gruesa y necromasa fina u hojarasca) y componentes de los árboles (fuste, ramas, follaje

Cuadro 3. Factores de expansión de la biomasa para *A. acuminata* en plantación (promedio \pm SD)

Estadístico	FEB (Bat)	FEB (Bat + Bra)
N	47	47
Mínimo	1,05	1,23
Máximo	1,46	1,78
Promedio	1,22 \pm 0,11	1,43 \pm 0,13
E(%)	2,25	2,27

Nota: n = tamaño de la muestra, E(%) = error de muestreo con un 95 % de probabilidad, Bat = biomasa aérea total, Bra = biomasa radicular.

y raíz) varió entre el 32,9 y el 46,7 %. De los componentes del árbol, el fuste posee mayor FC con 44,4 %. El error de muestreo en los componentes de árbol fue inferior al 4,3 %. El suelo presentó un contenido de carbono de 4,2 % con un error de muestreo de 10,3 % (cuadro 4).

Discusión

En la literatura no se reporta información sobre biomasa, carbono, fracción de carbono, factores de expansión para *A. acuminata*, razón por la cual este estudio hace un aporte importante para el conocimiento de la especie, máxime en momentos actuales, cuando la mitigación del cambio climático cobra cada vez mayor relevancia.

Cuadro 4. Fracción de carbono (%) de cada componente de la biomasa y porcentaje de carbón en el suelo

Estadístico	Componente							
	Necromasa gruesa	Necromasa fina	Herbácea	Hojas	Ramas	Fuste	Raíz	Suelo
n	15	18	21	12	29	13	8	24
X	46,7	32,9	37,7	37,0	41,9	44,4	41,2	3,0
S	3,2	6,2	4,0	2,5	2,8	2,0	1,8	0,7
E %	3,7	9,4	4,8	4,3	2,7	2,8	3,6	10,3



L. Ruiz. Plantación de jaúl, Costa Rica

Modelos de biomasa

En general, los modelos seleccionados presentan buenos ajustes ($r^2_{aj} \geq 82,6 \%$, $P < 0,05$) para todos los componentes de la biomasa y/o el carbono y poco grado de dificultad para el cálculo de esta. Tienen como variable independiente el diámetro normal (a 1,3 m sobre el nivel del suelo) o el área basal, simple de medir y/o de calcular y se obtiene en la mayoría de estudios que registran información para el manejo de plantaciones y/o bosque natural. Esto es una ventaja adicional, ya que permite estimar la biomasa a partir de una sola variable, lo cual baja los costos de los inventarios de biomasa y de carbono.

Las ecuaciones por componentes del árbol presentan una ventaja en el momento de comercializar el carbono, es posible que un comprador se vea más motivado a pagar más y/o a comprar el carbono de mayor permanencia (el que está acumulado en los componentes leñosos); en tal caso puede estimarse la biomasa o el carbono utilizando las ecuaciones desarrolladas para estos componentes. La validez de las ecuaciones generadas en este estudio debe restringirse al rango diamétrico

(4,5 a 45,9 cm) de los árboles muestreados, en caso de extrapolaciones, el resultado debe ser considerado con precaución.

Los modelos de biomasa y/o carbono por hectárea presentan la ventaja de hacer estimaciones más rápidas e, igualmente que en los modelos por componente del árbol, puede decidirse en estimar el carbono en la biomasa total o solo el carbono en árboles.

Los modelos se ajustaron utilizando el dap o el área basal como variable independiente, porque tiene la ventaja de ser una variable objetiva, de fácil medición, de menor costo económico y explica un alto porcentaje de la variabilidad total (Overman, Witte y Saldarriaga, 1994; Regina, 2000; Ferrere, Lupi, Boca, Nakama y Alfieri, 2008; Segura, Kanninen y Suarez, 2006; Fonseca, 2009). Diversos autores, además de los anteriores, utilizaron el dap o el área basal como variable predictora para estimar la biomasa mediante modelos alométricos. Los ajustes logrados en los modelos ($r^2 > 83 \%$), según estos autores, coinciden con los obtenidos para *A. acuminata*, excepto algunas especies con un r^2_{aj} de 0,7.

También el ajuste logrado en los modelos para *A. acuminata* son similares a los obtenidos en otros modelos que utilizan la altura como variable predictora. Por ejemplo, Álvarez (2008) logró un r^2_{aj} de 0,89 utilizando la altura comercial en su modelo de biomasa para *Centrolobium tomentosum* en Bolivia. Segura, Kanninen y Suarez (2006) desarrollaron modelos para biomasa total de *Cordia alliodora* en sistemas agroforestales en Nicaragua, utilizando el dap y la altura total y obtuvieron un r^2_{aj} de 0,95. Otros autores reportan ajustes similares utilizando el dap y la altura (Brown, Gillespie y Lugo, 1989; Najera, 1999; Cole y Ewel, 2006).

En el árbol, los componentes hojas y ramas presentaron ajustes más bajos ($r^2_{aj} = 88 \%$) y EEE más altos ($< 0,56$). Estos componentes mostraron el mismo comportamiento en varias investigaciones para otras especies (Nájera, 1999; Návar,

González y Graciano, 2001; Cole y Ewel, 2006; González, 2008; Ferrere et al., 2008; Fonseca, 2009). El bajo ajuste en la biomasa foliar se debe a que es un componente de menor duración, que es susceptible al ataque de herbívoros, patógenos y mamíferos, que consumen aproximadamente un 11 % del área foliar anual de las especies tropicales (Huntly, 1991; Coley y Aide, 1991; Cole y Ewel, 2006). *A. acuminata* es una especie muy susceptible a problemas fitosanitarios, en total se han reportado 57 agentes causales de daños, el 72 % de estos se reportan en el follaje. Casi la mayoría de las plantaciones de *A. acuminata* del país presenta una serie de manchas pardo amarillentas producidas por *Melampsorium alni*, conocida como la “roya del jaúl” y aparentemente persiste durante todo el año. También se destaca el ataque de una especie no identificada de microlepidóptera. En ambos casos las hojas severamente atacadas mueren y caen, lo que provoca una reducción en el volumen de la copa del árbol (Arguedas y Espinoza, 2007; Álvarez, 2008).

La escogencia del árbol es otro factor que puede estar produciendo el bajo ajuste. El árbol de dap promedio no siempre ocupa el dosel superior, cuya copa es más reducida en comparación a la copa de un árbol del estrato dominante, debido a la disponibilidad de luz con la que cuenta (menor tasa fotosintética). Sin embargo, el árbol de dap promedio tiene la ventaja, en teoría, de representar las condiciones medias del sitio y de eliminar el error de sobreestimación que queremos evitar a toda costa, sobre todo para estimación de stocks de carbono. También, pareciera que las plantaciones de mayor edad (cuadro 1) presentan alta densidad,



L. Ruíz. Plantación de jaúl, Costa Rica

esto puede influir directamente en la biomasa acumulada de ramas, ya que la especie con densidad alta presenta autopoda (CATIE, 1995). Alta densidad implica mayor competencia por recursos y, potencialmente, menor crecimiento por individuo. Peor aún, alta densidad implica mayor asignación de recursos a crecimiento en altura *vs.* crecimiento secundario. Esto tendría implicaciones serias sobre la alometría de los árboles en estos sitios.

Los modelos para estimar biomasa y/o carbono por unidad de área son escasos en la literatura, sobresale el trabajo de Feldpausch, Rondon, Fernandes, Riha y Wandelli (2004) y el de Fonseca (2009) en plantaciones y bosque secundario. En ambos casos se utilizó el área basal como variable regresora con ajustes inferiores a los logrados en este estudio.

Factores de expansión de biomasa

El FEB presenta un error muy bajo ($\pm 2,3$ %). El FEB indica que por cada mg de biomasa de fuste se tiene una biomasa aérea total de 1,2 Mg. Este valor se encuentra en el límite inferior del

rango reportado por diversos autores (FEB entre 1,26 y 1,9) para otras especies en plantaciones (Álvarez, 2008; Avendaño, 2008; Fonseca 2009).

El bajo FEB obtenido para *A. acuminata*, probablemente se debe a que es un árbol de porte inferior y de copa más pequeña. Además, los sitios donde se encuentran las plantaciones son suelos volcánicos de buena fertilidad. Esto hace que no requieran un sistema radical grande para absorber recursos y, por consiguiente, poseen una mayor concentración de biomasa en el fuste, lo que reduce la participación de otros componentes como las hojas y las ramas.

Son pocos los estudios que estiman los FEB incluyendo la biomasa radicular, debido a la dificultad y a los altos costos que genera la cuantificación de esta (Sierra et al., 2001; Husch, 2001; Schlegel, 2001; Fonseca, 2009). En *A. acuminata* el FEB, incluyendo la biomasa radical, es de 1,43, valor que coincide con los valores reportados por FAO (2003) y Fonseca (2009). Actualmente, el IPCC recomienda utilizar un FEB de 1,75 para todas las especies (IPCC, 2005), cifra muy superior a la estimada para *A. acuminata*. El valor obtenido viene a mejorar la precisión de los inventarios de carbono, al utilizarse información para la especie y para el país.

Contenido de carbono en la biomasa

En este estudio se analizó la fracción de carbono por componente de biomasa en plantaciones de *A. acuminata*. Pocos estudios han estimado los valores precisos de contenido de carbono en la biomasa de especies forestales, ya que generalmente se recurre a un factor de conversión de biomasa a carbono de 0,5 (Brown, Lugo y Chapman, 1986; Goudriaan, 1992; Hoen y Solberg, 1994; Ortiz, 1997; Husch, 2001). La estimación precisa de la fracción de carbono en la biomasa es necesaria para la correcta investigación del ciclo del carbono y para determinar con exactitud la retribución de los certificados de carbono.

Para *A. acuminata* entre 1 y 14 años de edad, las fracciones de carbono de la biomasa vegetal más bajas corresponden a los componentes que poseen menos lignina, como la necromasa fina, el follaje del árbol y las hierbas, mientras que la necromasa gruesa, el fuste, las raíces y las ramas presentaron las mayores concentraciones de carbono; situación similar reportan Gifford (2000), Gayoso y Guerra (2005), etc. En otros estudios, sin embargo, no se han encontrado diferencias en el contenido de carbono entre componentes del árbol (Segura, 1997) e incluso concentraciones más altas en hojas (Gifford, 2000).

El contenido de carbono obtenido para *A. acuminata* se encuentra entre de los límites reportados por otros estudios. Así, Montero y Kanninen (2006) encontraron fracciones de carbono que oscilan entre el 41,6 % y el 49,6 % para *Tectona grandis*, *Terminalia amazonia* y *Bombacopsis quinata*. Cubero y Rojas (1999), en plantaciones jóvenes (entre 4 y 15 años), reportan cifras entre 0,32 y 0,4 para *Gmelina arborea*, de 0,32 a 0,38 para *Tectona grandis* y de 0,33 a 0,36 en *Bombacopsis quinata*.

Referencias

- Álvarez, E. y Marín, M. A. (2011) *Manual de procedimientos analíticos para suelos y plantas*. México: Universidad Autónoma de Chapingo.
- Álvarez, G. (2008). *Modelos alométricos para la estimación de biomasa aérea de dos especies nativas en plantaciones forestales del trópico de Cochabamba, Bolivia*. (Tesis de maestría). CATIE, Turrialba, Costa Rica.
- Arguedas, M. y Espinoza, D. (2007). Problemas fitosanitarios del jaúl (*Alnus acuminata* Kunth) en Costa Rica. *Revista Forestal Kurú* 4 (10), 1-10.
- Avendaño, J. (2008). *Modelos genéricos de biomasa aérea para especies forestales en función de la arquitectura y la ocupación del rodal, Costa Rica*. (Tesis de maestría). CATIE, Turrialba, Costa Rica.
- Balmaceda, P. (2012). Los servicios ecosistémicos que ofrecen los bosques tropicales. *Ecosistemas* 21 (1). Disponible en <http://www.revistaecosistemas.net/articulo.asp?Id=709>
- Basu, P. (2009). A green investment. If growing forests in India can generate lucrative carbon credits, then why isn't everyone planting trees? News Feature. *Nature* 457 (8), 144-146.

- Bonan, G. B. (2008). Forests and climate change: Forcings, feedbacks, and the climate benefits of forests. *Science* 320 (5882), 1444-1449.
- Brown, S., Lugo, A. y Chapman, J. (1986). Biomass of tropical tree plantations and its implications for the global carbon budget. *Canadian Journal of Forestry Research* 16, 390-394.
- Brown, S., Gillespie, A. y Lugo, A. (1989). Biomass estimation methods for tropical forests with applications to forest inventory data. *Forest Science* 35 (4), 881-902.
- Carpio, I. (1992) *Maderas de Costa Rica: 150 especies forestales*. San José, C. R.: Editorial de la Universidad de Costa Rica.
- Chave, J., Andalo, C., Brown, S., Cairns, M., Chambers, J., Eamus, D., Folster, H., Fromard, F., Higuchi, N., Kira, T., Lescure, J., Ogawa, H., Puig, H., Riéra, B. y Yamakura, T. (2005). Tree allometry and improved estimation of carbon stocks and balance in tropical forests. *Oecología* 145 (1), 87-99.
- Cole, T. y Ewel, J. (2006). Allometric equations for four valuable tropical tree species. *Forest Ecology and Management* 229, 351-360.
- Coley, P. y Aide, T. (1991) *Comparison of herbivory and plant defenses in temperate and tropical broad-leaved forests*. Disponible en <http://biologylabs.utah.edu/coley/ColeyPubs/18-herbdef.pdf>
- Ministerio de Ambiente, Energía y Telecomunicaciones-Instituto Meteorológico Nacional. (2009) *Segunda comunicación a la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre Cambio Climático*. San José, Costa Rica.
- MINAET-FONAFIFO. (2010). *Propuesta para la Preparación de Readiness R-PP Costa Rica*. Disponible en http://www.ing-agronomos.or.cr/archivos/RPP_Costa_Rica_6-9-10.pdf
- Cubero, J. y Rojas, S. (1999) *Fijación de carbono en plantaciones de melina (Gmelina arborea Roxb.), teca (Tectona grandis L.f.) y pochote (Bombacopsis quinata Jacq.) en los cantones de Hojancha y Nicoya, Guanacaste, Costa Rica*. Disponible en <http://docs.google.com/viewer?a=v&q=cache:taRWtUkKV4QJ:cglobal.imn.ac.cr/Pdf/mitigacion/Estudio%2520sobre%2520Fijacion%2520de%2520Carbono%2520en%2520Plantaciones.pdf>
- FAO (Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación, It). (1992) *Estimating biomass and biomass change of tropical forests: a primer sp*. Disponible en http://openlibrary.org/.../Estimating_biomass_and_biomass_change_of_tropical_forests
- FAO (Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación, It). (2003) *Factores de expansión según FAO*. Disponible en <http://www.fao.org/docrep/W4095E/w4095e06.htm>
- FAO (Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación, It). (2006) *Datos mundiales sobre los recursos de plantaciones forestales*. Disponible en <http://www.fao.org/docrep/004/y2316s/y2316s0b.htm>
- FAO (Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación, It). (2010) *Evaluación de los recursos forestales mundiales 2010: Informe principal*. Disponible en <http://www.fao.org/docrep/013/i1757s/i1757s.pdf>
- Feldpausch, T., Rondon, M., Fernandes, E., Riha, S. y Wandelli, E. (2004). Carbon and nutrient accumulation in secondary forest regenerating from degraded pastures in Central Amazonia, Brazil. *Ecological Applications* 14 (4), 164-176.
- Ferrere, P., Lupi, A., Boca, R., Nakama, V. y Alfieri, A. (2008) Biomasa en plantaciones de Eucalyptus viminalis de la provincia de Buenos Aires, Argentina. *Ciencia Forestal* 18, 293-307.
- Fonseca, W., Alice, F. y Rey-Venayas, J. (2009). Modelos para estimar la biomasa de especies nativas en plantaciones y bosques secundarios en la zona Caribe de Costa Rica. *Bosque* 30 (1), 36-47.
- Fonseca, W. (2009). *Restauración forestal y almacenamiento de carbono en el trópico húmedo*. (Tesis de doctorado). Universidad de Alcalá, España.
- Fonseca, W. (2009b) *Informe sobre práctica de campo de estudiantes del curso de Inventarios Forestales*. Escuela de Ciencias Ambientales, Universidad Nacional de Costa Rica.
- Fonseca, W., Navarro, G., Alice, F. y Rey-Benayas, J. M. (2012, enero). Impacto económico de los pagos por carbono y servicios ambientales en las inversiones forestales en la región Caribe de Costa Rica. *Ecosistemas* 21 (1). Disponible en <http://www.revistaecosistemas.net/articulo.asp?Id=711>
- Furnival, G. (1961.) An index for comparing equations used in constructing volume tables. *Forest Science* 7 (4), 337-341.
- González, M. (2008). *Estimación de la biomasa aérea y la captura de carbono en regeneración natural de Pinus maximinoi H. E. Moore, Pinus oocarpa var. ochoterenai Mtz. y Quercus sp en el norte del Estado de Chiapas, México*. (Tesis de maestría). CATIE, Turrialba, Costa Rica.
- Holdridge, L. (1967) *Life Zone Ecology*. San José, Costa Rica: Centro Científico Tropical.
- Huntly, N. (1991). Herbivores and the dynamics of communities and ecosystems. *Ecología y Sistemática* 22, 477-503.
- Husch, B. (2001). *Estimación del contenido de carbono en los bosques*. [Simposio Internacional Medición y Monitoreo de la Captura de Carbono en Ecosistemas Forestales, Valdivia, Chile, del 18 al 20 de octubre de 2001].

- IPCC (Grupo Intergubernamental de expertos sobre el Cambio Climático). (2007) *Cambio Climático: Resumen del Informe de Evaluación 2007 del IPCC*. Disponible en <http://www.ipcc.ch/pdf/assessment-report/.../ar4-wg2-frontmatter-sp.pdf>.
- ITCR (Instituto Tecnológico de Costa Rica). (2004) *Atlas Digital de Costa Rica*. Laboratorio de Sistemas de Información Geográfica, Escuela de Ingeniería Forestal. Cartago, Costa Rica.
- Liu, H., Zhao Lu, P., Si Wang, L., Biao Lin, Y. y Quan Rao, X. (2008). Greenhouse gas fluxes from soils of different land-use types in a hilly area of South China. *Agriculture, Ecosystems and Environment* 124 (1-2),125-135.
- MacDicken, K. (1997) *A guide to monitoring carbon storage in forestry and agroforestry projects*. Forest carbon Monitoring Program. Winrock International Institute for Agricultural Development (WRI). Disponible en <http://www.winrock.org/REEP/PUBSS.html>
- Montero, M., Kanninen, M. (2006). Carbono fijado a diferentes edades en plantaciones de *Terminalia amazonia*, *Tectona grandis* y *Bombacopsis quinata* en Costa Rica. *Revista Recursos Naturales y Ambiente*. En prensa.
- Návar, J., González, N. y Graciano, J. (2001). *Ecuaciones para estimar componentes de biomasa en plantaciones forestales de Durango, México*. [Simposio Internacional Medición y Monitoreo de la Captura de Carbono en Ecosistemas Forestales, Valdivia, Chile, del 18 al 20 de octubre de 2001].
- Ortíz, E. (1997) *Costa Rican secondary forest: an economic option for joint implementation initiatives to reduce atmospheric CO₂*. [Draff paper presented for inclusion in the beiger Seminar in Punta Leona, Costa Rica].
- Overman, J., Witte, H. y Saldarriaga, J. (1994). Evaluation of regression models for above – ground biomass determination in Amazon rainforest. *Journal of Tropical Ecology* 10, 218-297.
- Prodan, M., Peters, R., Cox, F. y Real, P. (1997). *Mensura Forestal*. [Serie de investigación y evaluación en desarrollo sostenible]. San José, Costa Rica: IICA.
- Ramírez, P. (1998). Gases de efecto invernadero y venta de carbono una visión de conjunto. *Ambientico* 15,1-77.
- Ravindranath, N. y Ostwald, M. (2008) *Carbon Inventory Methods: Handbook for greehouse gas inventory, carbon mitigation and Roundwood Production Proyect*. Disponible en <http://link.springer.com/content/pdf/bfm%3A978-1-4020-6547-7%2F1.pdf>
- Ruíz, L. (2011). *Modelos alométricos para la estimación de biomasa en Alnus acuminata (Kunth) en Costa Rica*. (Tesis de licenciatura). Universidad Nacional, Heredia, Costa Rica.
- Salinas, Z. y Hernández, P. (Eds.). (2008) *Guía para el diseño de Proyectos MDL forestales y de bioenergía*. [Serie Técnica, Manual Técnico/CATIE, n.º 83]. Turrialba, Costa Rica: CATIE.
- Schlegel, B. (2001). *Estimaciones de biomasa y carbono en bosques del tipo forestal siempre verde*. [Simposio Internacional Medición y Monitoreo de la Captura de Carbono en Ecosistemas Forestales, Valdivia, Chile, del 18 al 20 de octubre de 2001].
- Schlegel, B., Gayoso, J. y Guerra, J. (2001) *Manual de procedimientos para inventarios de carbono en ecosistemas forestales*. Disponible en www.bmi.gob.sv/pls/portal/url/
- Segura, M. y Andrade, H. (2008). Cómo construir modelos alométricos de volumen, biomasa o carbono de especies leñosas perennes. *Agroforestería en las Américas* 46, 89-96.
- Segura, M. (1997). *Almacenamiento y fijación de carbono en Quercus costaricensis, en un bosque de altura en la cordillera de Talamanca, Costa Rica*. (Tesis de licenciatura). Universidad Nacional, Heredia, Costa Rica.
- Segura, M. y Kanninen, M. (2002). Inventario para estimar carbono en ecosistemas forestales. En Orozco, L. y Brumér, C. (Eds.) *Inventarios forestales para bosques latifoliados en América Central* (pp. 173-213). [Manual Técnico n.º 50]. Turrialba, Costa Rica: CATIE.
- Segura, M., Kanninen, M. y Suarez, D. (2008). Estimación de la biomasa aérea total en árboles de sombra y plantas de café en sistemas agroforestales en Matagalpa, Nicaragua, usando modelos alométricos. *Agroforestería en las Américas* 41, 112-119.
- Sierra, A., Del Valle, J. y Orrego, S. (2001). *Ecuaciones de biomasa de raíces y sus tasas de acumulación en bosques sucesionales y maduros tropicales de Colombia*. [Simposio Internacional Medición y Monitoreo de la Captura de Carbono en Ecosistemas Forestales, Valdivia, Chile, del 18 al 20 de octubre de 2001].
- SIREFOR (Sistema de Información de los Recursos Forestales). (2011) *Algunas de las especies más utilizadas para plantaciones en Costa Rica*. Disponible en [://www.sirefor.go.cr/index.php?option=com_content&view=article&id=13&Itemid=54](http://www.sirefor.go.cr/index.php?option=com_content&view=article&id=13&Itemid=54)
- Streck, Ch., Sullivan, R., Janson, T. y Tarasofsky, R. (2008) *Climate Change and Forests. Emerging Policy and Market Opportunities*. Disponible en http://www.climatefocus.com/documents/climate_change_and_forests_emerging_policy_and_market_opportunities

Apéndice

Figura 1. Biomasa observada (kg/árbol) vs. biomasa estimada (kg/árbol) en los modelos seleccionados. a) biomasa de fuste, b) biomasa de hojas, c) biomasa de ramas, d) biomasa de raíz, e) biomasa del árbol

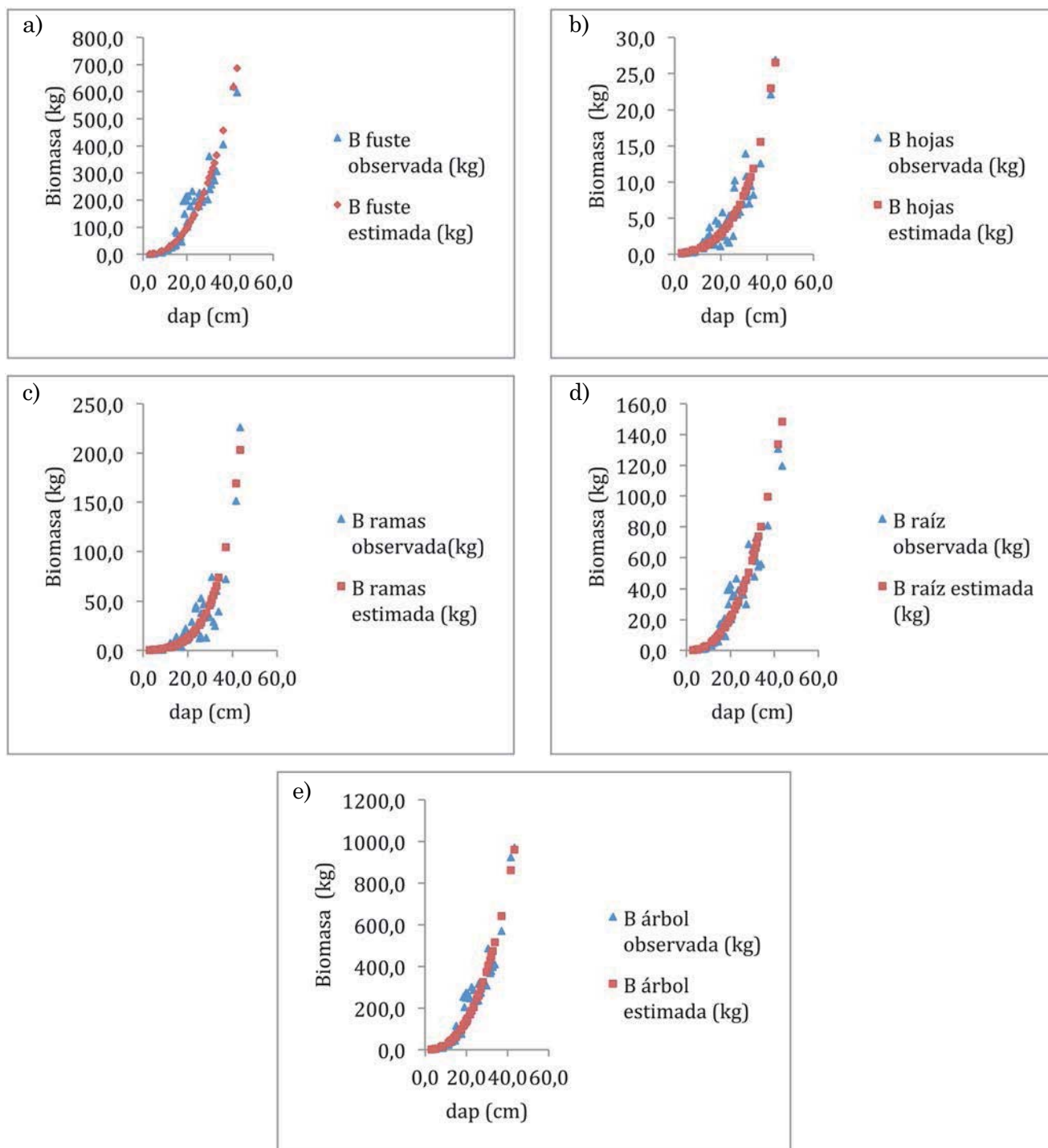


Figura 2. Estimación de biomasa y carbono a partir del área basal.
 a) biomasa en árboles, b) carbono en árboles, c) biomasa total, d) carbono total

