

**Ecuaciones alométricas para estimar volumen
y biomasa aérea de *Enterolobium cyclocarpum*
y *Ceiba pentandra* en la Escuela Agrícola
Panamericana Zamorano, Honduras**

Kevin Fernando Jauregui Valarezo

**Escuela Agrícola Panamericana, Zamorano
Honduras**

Noviembre, 2016

ZAMORANO
CARRERA DE AMBIENTE Y DESARROLLO

**Ecuaciones alométricas para estimar volumen
y biomasa aérea de *Enterolobium cyclocarpum*
y *Ceiba pentandra* en la Escuela Agrícola
Panamericana Zamorano, Honduras**

Proyecto especial de graduación presentado como requisito parcial para optar
al título de Ingeniero en Ambiente y Desarrollo en el
Grado Académico de Licenciatura

Presentado por

Kevin Fernando Jauregui Valarezo

Zamorano, Honduras

Noviembre, 2016

Ecuaciones alométricas para estimar volumen y biomasa aérea de *Enterolobium cyclocarpum* y *Ceiba pentandra* en el campus de la Escuela Agrícola Panamericana Zamorano, Honduras

Kevin Fernando Jauregui Valarezo

Resumen: Los árboles ayudan a reducir los niveles de CO₂ atmosférico, un bosque tropical puede capturar de 60 a 115 ton de carbono por hectárea. El principio de autosemejanza es un método indirecto para la estimación del volumen de árboles. El objetivo general del estudio fue determinar ecuaciones alométricas para estimar volumen y biomasa aérea en las especies *Enterolobium cyclocarpum* y *Ceiba pentandra* en el campus de la Escuela Agrícola Panamericana Zamorano en Honduras. Se utilizó el método de autosemejanza que indica que el crecimiento de un árbol tiene un patrón de comportamiento, donde las ramas del árbol se pueden entender como una representación a escala de todo el árbol. Se determinó el Índice de Valor de Importancia de ambas especies. Se midieron características dasométricas para cubicar los árboles y determinar su volumen. Se utilizaron el diámetro a la altura del pecho y altura total en los modelos alométricos. Se probaron 41 modelos alométricos de regresiones no lineales y los criterios de selección fueron el coeficiente de determinación y el error cuadrático medio. La ecuación alométrica ajustada para *Enterolobium cyclocarpum* fue $\ln(V) = 14.194 - 0.016 \times \ln(DAP^2) \wedge \ln(h) - 5.654 \times \ln(h^2 \times \ln(DAP)) + 1.943 \times h + 0.032 \times DAP$ con un R² de 0.624 y un ECM de 0.381. Para *Ceiba pentandra* la ecuación ajustada fue $\ln(V) = -94.377 + 0.111 \times \ln(DAP^2) \wedge \ln(h) + 34.336 \times \ln(h^2 \times \ln(DAP)) - 10.726 \times h - 0.282 \times DAP$ con un R² de 0.946 y un ECM de 0.052.

Palabras clave: Alometría, autosemejanza, captura de carbono, IVI, método indirecto.

Abstract: Trees help to reduce the atmospheric CO₂ levels, a tropical forest can sequester from 60 to 115 ton of carbon per hectare. The self-similarity principle is an indirect method to estimate the volume of trees. The general objective was to determine allometric equations to estimate volume and tree biomass in the species *Enterolobium cyclocarpum* and *Ceiba pentandra* in the campus of Escuela Agrícola Panamericana Zamorano in Honduras. It was used the self-similarity method which indicates that the growing of a tree has a behavior pattern, where the branches of the tree can be considered as a scale representation of the whole tree. It was determined the Important Value Index for both species. Dasometric features were measured to cube the trees and determine their volume. The variables diameter at the breast height and total height were used in the allometric models. The tested models were 41 nonlinear regressions and the selection criteria were the determination coefficient and the mean square error. The adjusted allometric equation for *Enterolobium cyclocarpum* was $\ln(V) = 14.194 - 0.016 \times \ln(DAP^2) \wedge \ln(h) - 5.654 \times \ln(h^2 \times \ln(DAP)) + 1.943 \times h + 0.032 \times DAP$ with a R² of 0.624 and a MSE of 0.381. For *Ceiba pentandra* the adjusted allometric equation was $\ln(V) = -94.377 + 0.111 \times \ln(DAP^2) \wedge \ln(h) + 34.336 \times \ln(h^2 \times \ln(DAP)) - 10.726 \times h - 0.282 \times DAP$ with a R² of 0.946 and a MSE of 0.052.

Key words: Allometry, carbon sequestration, indirect method, IVI, self-similarity.

CONTENIDO

Portadilla	i
Página de firmas	ii
Resumen	iii
Contenido	iv
Índice de Cuadros, Figuras y Anexos.....	v
1. INTRODUCCIÓN.....	1
2. MATERIALES Y MÉTODOS.....	3
3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	12
4. CONCLUSIONES.....	22
5. RECOMENDACIONES.....	23
6. LITERATURA CITADA.....	24

ÍNDICE DE CUADROS, FIGURAS Y ANEXOS

	Cuadros	Página
1.	Índice de valor de importancia de las especies de árboles latifoliados del campus de Zamorano.....	12
2.	Características dasométricas y valores calculados a partir de autosemejanza de <i>Enterolobium cyclocarpum</i>	13
3.	Características dasométricas y valores calculados a partir de autosemejanza de <i>Ceiba pentandra</i>	14
4.	Coefficiente de determinación (R^2) de los modelos alométricos ejecutados en IBM SPSS Statistics 19.	15
5.	Rango de validación de la ecuación seleccionada para <i>Enterolobium cyclocarpum</i> con respecto a la proporción DAP/Altura.....	17
6.	Ajuste de ecuaciones alométricas para el cálculo de biomasa aérea de <i>Enterolobium cyclocarpum</i> , coeficientes y criterios estadísticos.....	18
7.	Ajuste de ecuaciones alométricas para el cálculo de biomasa aérea de <i>Ceiba pentandra</i> , coeficientes y criterios estadísticos.	19
8.	Demostración de uso de la ecuación de <i>Enterolobium cyclocarpum</i> para medir CO ₂ capturado.....	20
9.	Demostración de uso de la ecuación de <i>Ceiba pentandra</i> para determinar CO ₂ capturado.	21
	Figuras	Página
1.	Ubicación del campus de la Escuela Agrícola Panamericana Zamorano. ..	3
2.	Área de estudio con parcelas de muestreo numeradas en el campus de la Escuela Agrícola Panamericana.	5
3.	Ilustración del DAP del tronco principal a 1.30 m y cuando se ramifica antes de 1.30 m.....	6
4.	Esquema de auto-semejanza en el árbol, donde a diferentes niveles de auto-semejanza (1, 2,3), se observa una estructura análoga al árbol total pero a una escala cada vez menor.	8
5.	Demostración de la analogía de la semejanza entre triángulos rectángulos en comparación de un árbol con sus ramas. La escala en que se da la	

	semejanza se determina por el cociente de cualquier par de medidas correspondientes.....	9
6.	Formación de conos truncados para la reconstrucción del volumen del árbol, donde las secciones 1, 2, 3,...n, corresponden a los conos regulares; $d_1, d_2, d_3, \dots, d_n$, corresponden a los diámetros y $h_1, h_2, h_3, \dots, h_n$, a las alturas de cada cono respectivamente.	10

1. INTRODUCCIÓN

En los últimos años la tierra ha experimentado un cambio en la temperatura promedio. En el periodo de 1880 a 2004, la temperatura global promedio fue 13.9 °C. Del año 1880 al 2005 hubo un incremento de 0.62 °C. Este aumento en la temperatura se debe al efecto invernadero producido por gases como dióxido de carbono (CO₂), metano (CH₄), clorofluorocarbonos (CFCs) y óxido nitroso (N₂O) (Delgado y Romero, 2007). El CO₂ se libera a la atmósfera diariamente en grandes cantidades, en el año 2011 fue de 34.65 kt (Banco Mundial, 2016).

Los árboles almacenan anualmente grandes cantidades de biomasa, que ayudan a reducir los niveles de CO₂ en la atmósfera (Alberto, 2005). Un bosque tropical puede llegar a almacenar de 60 a 115 toneladas de carbono por hectárea (Kanninen, 2000). Los bosques urbanos son la interacción y relaciones entre árboles, organismos relacionados, construcciones y gente (Grey, 1996). Pueden jugar un rol importante en mitigar los impactos del cambio climático reduciendo el CO₂ en la atmósfera (Liu y Li, 2012). Otro aporte de los árboles es la regulación del clima, ya que generan sombra y crean microclimas (Escobedo, Clerici, Staudhammer, Tovar, 2015).

Para conocer las cantidades de CO₂ almacenado en los bosques es necesario implementar sistemas de monitoreo, reporte y verificación. Estos medios de control y verificación son demandados para la implementación de proyectos que reciben financiamiento por aumentar la reserva de carbono en el paisaje o reducir la tasa de emisiones de CO₂. Las organizaciones no gubernamentales (ONG) y gobiernos desarrollan proyectos de pagos por servicios ambientales por captura de carbono, promoviendo el desarrollo sostenible de los bosques (Honorio y Baker, 2010).

La alometría es una de las metodologías más usadas para la estimación de la biomasa arbórea, más aun cuando se trata de estimar carbono en rodales forestales. Esta metodología nos permite hacer estimaciones indirectas de la biomasa. El diámetro del árbol es una variable relativamente fácil de medir en campo, es decir el error es bajo en la toma de datos y estima muy bien la biomasa (Chave et al., 2005). Sin embargo, debemos considerar que la variable que mejor estima el volumen o biomasa de un árbol no siempre es la misma en todas las especies. Es necesario considerar otras variables como la altura total del individuo y la densidad de la madera (Honorio y Baker, 2010).

Existen dos métodos comunes usados para determinar ecuaciones alométricas: el método directo y el indirecto. El directo se caracteriza por ser destructivo. Consiste en cortar el árbol, cubicar y pesar todos sus componentes (Araujo, Higuchi y de Carvalho, 1999). El método indirecto no requiere cortar el árbol, sino que se cubica en pie. Con este método se

suman los volúmenes de madera, se toman muestras de ésta y se pesan en el laboratorio para determinar su peso en seco (Segura, 1997). A partir de los valores de biomasa obtenidos y utilizando variables de características dasométricas, se pueden obtener las ecuaciones. Generando una regresión entre variables tomadas en la zona de estudio o valores reportados en inventarios forestales (Schlegel, 2001).

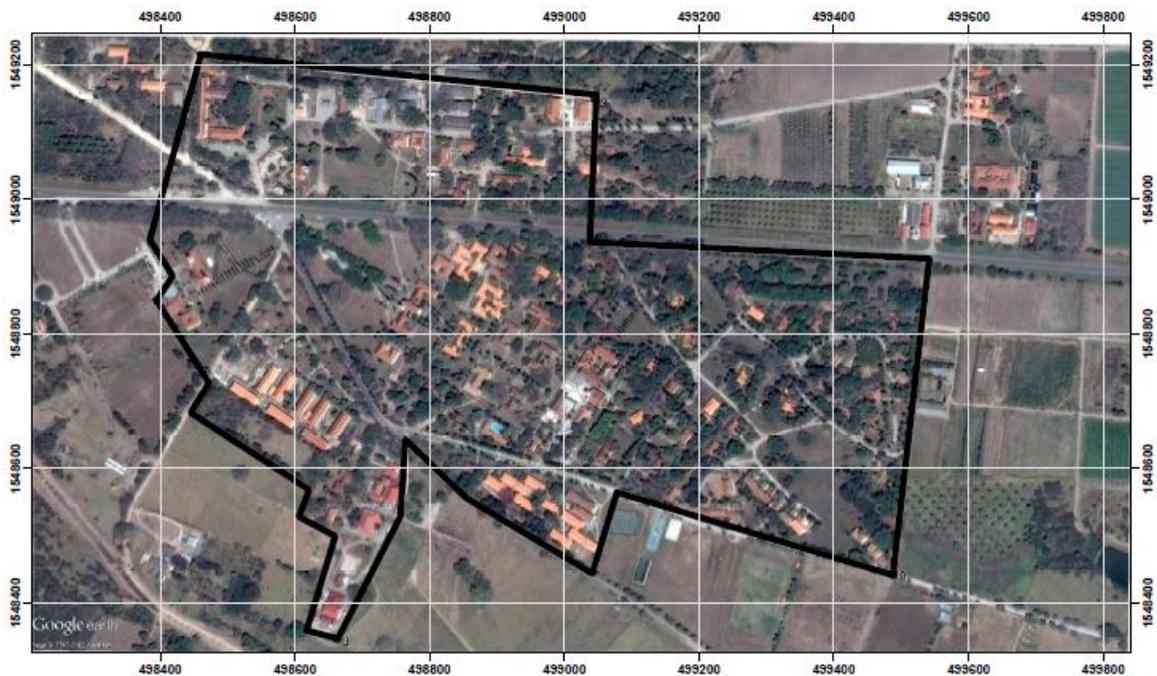
Dentro del grupo de metodologías de método indirecto se encuentra el principio de autosemejanza, propuesta en un estudio en Colombia. Ésta metodología indica que el crecimiento del árbol tiene un patrón de comportamiento, donde las ramas se pueden entender como una representación a escala de todo el árbol. Este método no ha sido muy utilizado y tampoco se ha realizado un estudio igual en un campus para calcular biomasa. En el estudio realizado en Colombia, se midió biomasa en las reservas Encenillo y Cachalú. Este estudio fue largo y completo debido a que se consideró la estimación de la biomasa en el fuste, en hierbas, en hojarasca, ramas, raíces, latizales y necromasa (Pérez y Díaz, 2010).

El único estudio de ecuaciones alométricas realizado en Zamorano fue por Gudiel (2015), quien determinó ecuaciones alométricas para estimar biomasa aérea en *Pinus oocarpa*. Otro estudio similar de ecuaciones alométricas es el de González (2008) en las especies *Pinus maximinoi*, *Pinus oocarpa* y *Quercus sp* en México.

El objetivo general de este estudio fue determinar ecuaciones alométricas para estimar volumen y biomasa aérea en las especies *Enterolobium cyclocarpum* (Guanacaste) y *Ceiba pentandra* (Ceiba) en el campus de la Escuela Agrícola Panamericana Zamorano. Los objetivos específicos fueron determinar las especies de mayor importancia para determinar ecuaciones alométricas en el campus de la Escuela Agrícola Panamericana y validar la metodología de autosemejanza como herramienta para estimar volumen en árboles.

2. MATERIALES Y MÉTODOS

Área de estudio. La Escuela Agrícola Panamericana está localizada en San Antonio de Oriente, Francisco Morazán en el km 30 hacia Danlí, en Honduras. Se encuentra a una altitud de 800 msnm, con una precipitación promedio anual de 1,100 mm y una temperatura promedio de 24°C (Ligña, 2014). En la Figura 1 se muestra delimitado el campus central de Zamorano donde se realizó el estudio.



Autor: Kevin Jauregui

Fecha: 22/09/2016

Fuente: Google Earth

Proyección: WGS 1984 UTM Zona 16 N

Figura 1. Ubicación del campus de la Escuela Agrícola Panamericana Zamorano.

Se dividió el área de estudio mediante una cuadrícula de 50×50 m para realizar un inventario exploratorio y calcular el Índice de Valor de Importancia (IVI) de los árboles latifoliados del campus. Se identificaron los cuadrados con presencia arbórea para ser utilizados como parcelas de muestreo y se eliminaron los que no mostraban árboles. Se obtuvieron 93 parcelas de muestreo del área de estudio (Figura 2), lo que corresponde a 23.25 ha. Para

hallar el número de parcelas a muestrear basado en Ferreira (2005) se utilizaron las ecuaciones 1 y 2.

$$\begin{aligned}Am &= I \times AT & [1] \\Am &= 0.20 \times 23.25 \text{ ha} \\Am &= 4.65 \text{ ha}\end{aligned}$$

Donde:

Am= área muestreada

I= intensidad de muestreo

AT= área total

$$\begin{aligned}n &= Am/Tp & [2] \\n &= 4.65 \text{ ha}/0.25 \text{ ha} \\n &= 19\end{aligned}$$

Donde:

n= número de parcelas

Tp= tamaño de la parcela

Además, se estratificó el área de estudio en cuatro zonas A, B, C y D. Se calculó el número de parcelas a muestrear de cada zona de forma proporcional. De acuerdo al número de parcelas por zona se seleccionaron al azar. Se muestrearon las parcelas A2, A6, A11, A13, B5, B18, B27, B28, C6, D6, D9, D20, D22, D26, D28, D36, D43.

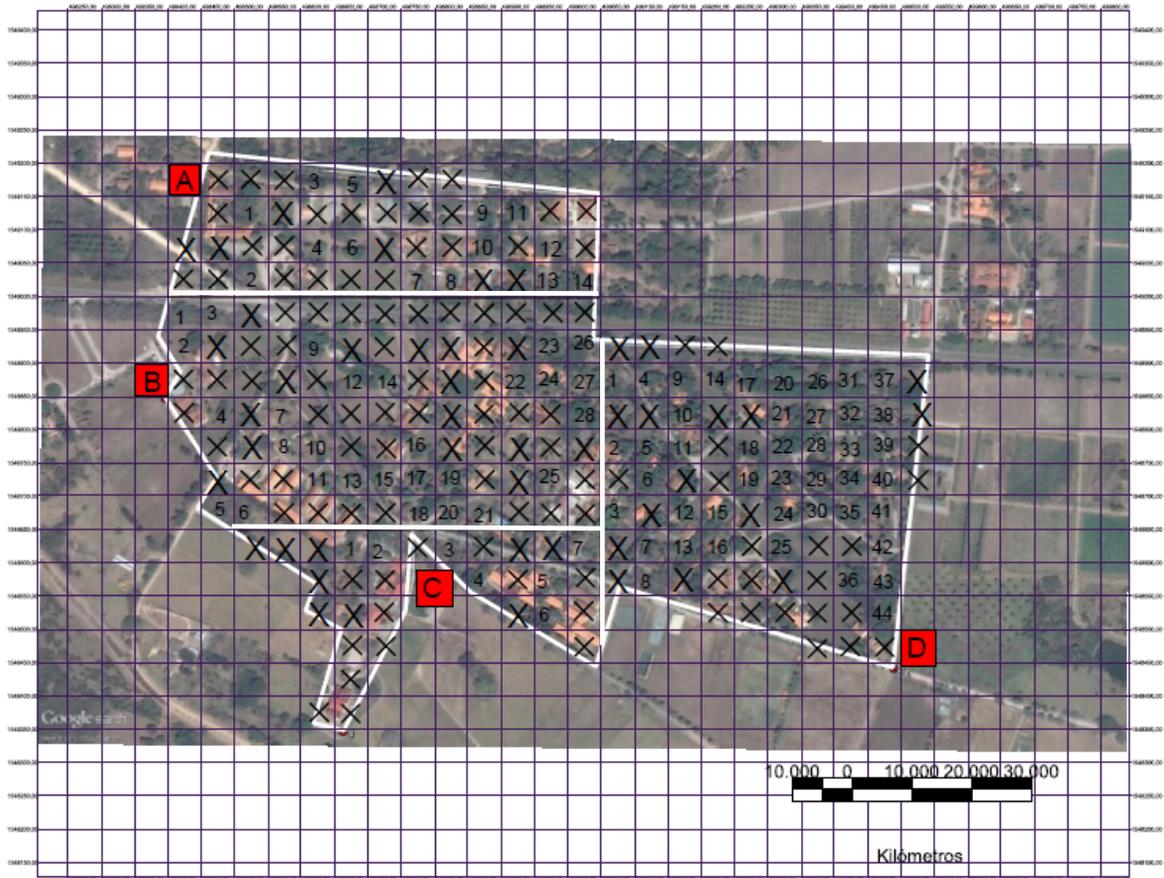


Figura 2. Área de estudio con parcelas de muestreo numeradas en el campus de la Escuela Agrícola Panamericana.

Fase de Campo. Se identificaron las especies de árboles latifoliados dentro del área de estudio (Figura 2), por observación de características botánicas. Se determinó abundancia, frecuencia y dominancia de cada especie. Solo se inventariaron los árboles con diámetro a la altura del pecho (DAP) mayor a 10 cm. No se tomaron en cuenta cultivos o plantaciones que se encontraban dentro del área de estudio porque no pertenecen a la categoría de urbanismo.

Medición de características. Consistió en la toma de datos de las características dasométricas de los árboles a estudiar. Se midió altura del árbol, altura comercial y DAP.

Altura del árbol. Se utilizó un hipsómetro láser Trupulse 200 Rangefinder, el cual mostraba el valor de la altura directamente en la pantalla digital del dispositivo. Al mismo tiempo se determinó la altura comercial.

DAP. Se tomó a 1.30 m del suelo midiendo el diámetro del tronco con una cinta diamétrica. Cuando el tronco principal se ramificó antes de 1.30 m, cada rama se consideró como un árbol diferente y se midió el DAP en cada una (Figura 3).

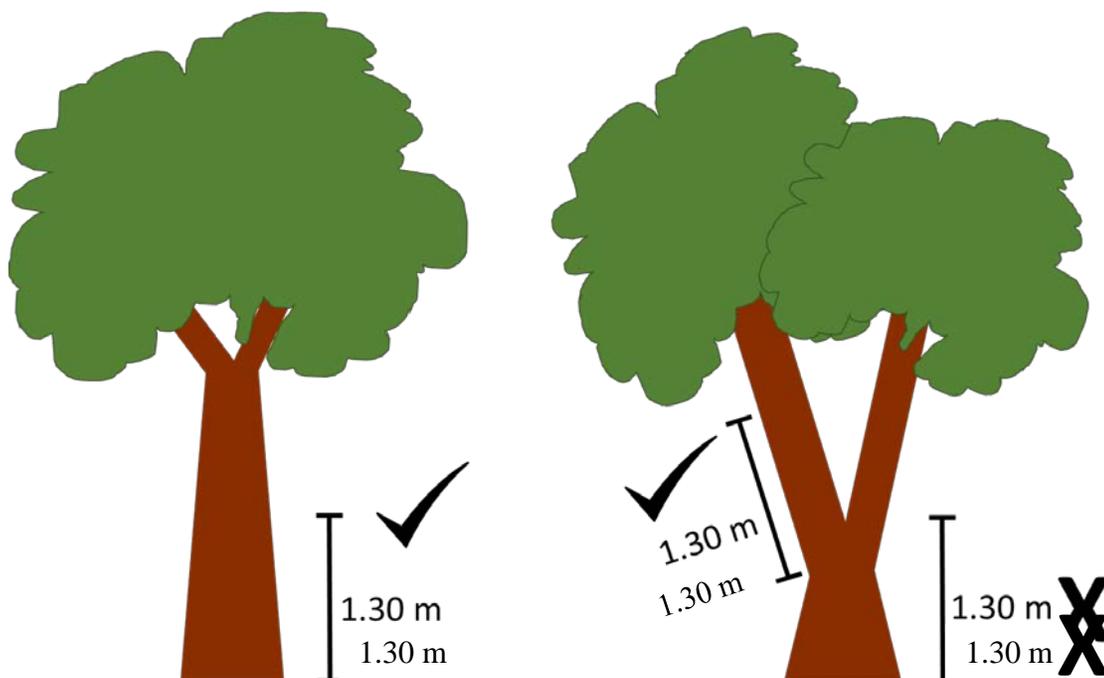


Figura 3. Ilustración del DAP del tronco principal a 1.30 m y cuando se ramifica antes de 1.30 m.

Para determinar las especies de mayor importancia en el campus se usó el IVI. El IVI es la sumatoria de la dominancia relativa, la abundancia relativa y la frecuencia relativa. Es un índice que permite jerarquizar la importancia ecológica de cada especie en rodales mezclados (Ecuación 3) (Zarco, Valdez, Ángeles, y Castillo, 2010).

$$IVI(\%) = AR(\%) + FR(\%) + DR(\%) \quad [3]$$

Abundancia. La abundancia es el número de individuos existentes en el área de la muestra y por especie en relación con el número total de individuos. La abundancia absoluta es el número de individuos por especie con respecto al número total de individuos. La abundancia relativa es la proporción de los individuos de cada especie en el total de los individuos del área muestreada (Ecuación 4) (Gordo, 2009).

$$AR(\%) = (n_i/N) \times 100 \quad [4]$$

Donde:

AR(%)= abundancia relativa expresada en porcentaje

n_i = número de individuos de la i ésima especie

N = número total de individuos en la muestra.

Frecuencia. Determina en cuantas parcelas se encuentra presente una especie, en relación al total de parcelas muestreadas. La frecuencia absoluta es el porcentaje de parcelas en las

que aparece una especie. La frecuencia relativa es la proporción del número de parcelas en que aparece una especie entre la cantidad total de parcelas (Ecuación 5) (Gordo, 2009).

$$FR (\%)= (f_i/F_n) \times 100 \quad [5]$$

Donde:

FR(%)= frecuencia relativa expresada en porcentaje

f_i = número de parcelas en las que aparece la especie

F_n = número total de parcelas

Dominancia. Se determina por el porcentaje del espacio total que cubre cada especie. La dominancia absoluta es la sumatoria de las áreas basales de los individuos de una especie. La dominancia relativa de una especie es la proporción de su dominancia absoluta entre la sumatoria total de las dominancias absolutas del inventario (Ecuación 6) (Gordo, 2009).

$$DR(\%)= (d_i/d_t) \times 100 \quad [6]$$

Donde:

DR(%)= dominancia relativa expresada en porcentaje

d_i = dominancia absoluta de la especie

d_t = sumatoria total de dominancias absolutas

Las especies que mostraron un mayor IVI fueron seleccionadas para su análisis en la determinación de ecuaciones alométricas. A estas especies se les tomaron más medidas para poder calcular el volumen por autosemejanza. Además, de las características anteriores se midió diámetro a la altura del tocón (DAT), diámetro a la altura comercial (DAC), diámetro de las ramas y se estimó volumen y biomasa.

DAT. Se midió el diámetro a la altura de corta del árbol. No se tomó esta medida a una altura específica debido a que de acuerdo a la edad del árbol, la altura de corte del árbol varía por el crecimiento de las raíces.

DAC. Se midió el diámetro a la altura comercial del árbol.

Para determinar el volumen se utilizó el método de autosemejanza. Los árboles latifoliados presentan un fuste central definido solo en su parte inferior y hasta el comienzo de la copa, esa uniformidad se pierde debido a las grandes ramificaciones que presentan (Prodan, Peters, Cox, y Real, 1997). De este modo la estructura de los árboles varía obedeciendo a múltiples factores y en múltiples niveles, esta se encuentra influenciada por el tipo de especie y por las condiciones bióticas - abióticas a la que está sometido el individuo en su crecimiento. Planteando formas complejas difícilmente modeladas mediante la geometría euclidiana (Talanquer, 1996). Sin embargo, existe un patrón de comportamiento que puede permitir su modelamiento. A este patrón y eje central del presente modelo se le denomina auto-semejanza. Consiste en que las ramas del árbol se pueden entender como una representación a escala de todo el árbol, la escala es menor a medida que aumentamos el nivel de ramificación (Figura 4).

El modelo a emplear se fundamenta en tres principios (Pérez y Díaz, 2010), los cuales son:

1. Cualquier par de medidas correspondientes del árbol representan la escala en la que se da la autosemejanza.
2. La autosemejanza se repite de manera constante, es decir, el número de ramas aumenta y la escala disminuye de manera exponencial.
3. La escala del volumen puede calcularse a partir de las escalas de los diámetros.

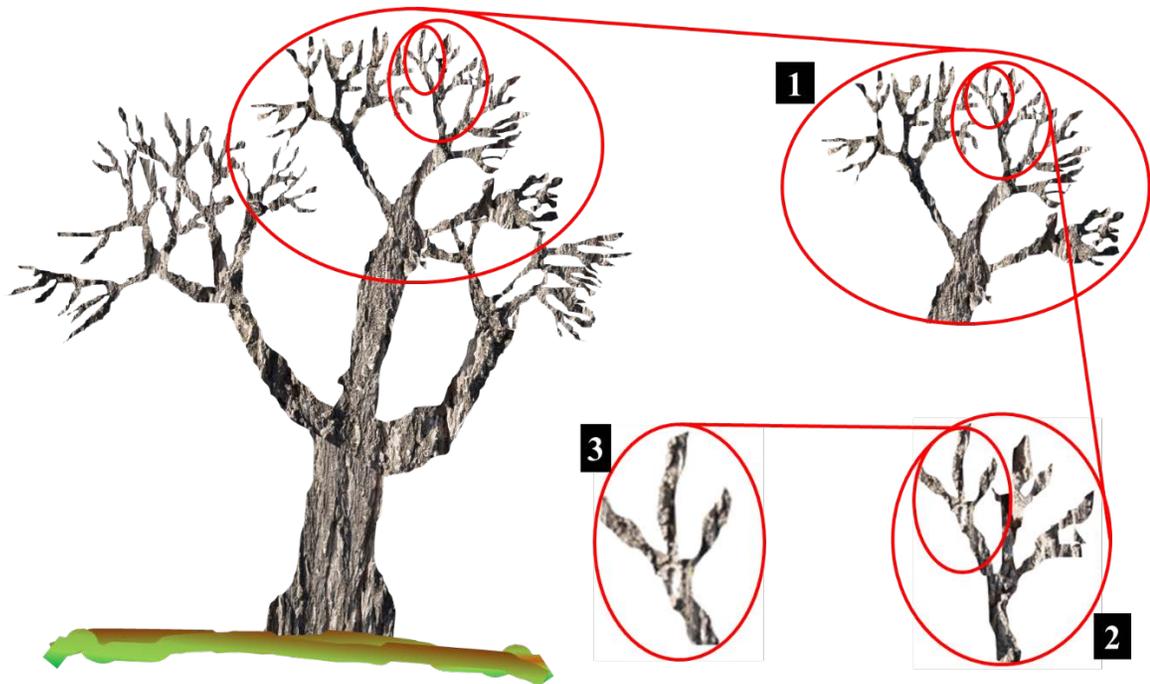


Figura 4. Esquema de auto-semejanza en el árbol, donde a diferentes niveles de auto-semejanza (1, 2,3), se observa una estructura análoga al árbol total pero a una escala cada vez menor.

Esta auto-semejanza se da en la estructura del árbol y por tanto en todas sus características derivadas, como por ejemplo el volumen o la biomasa, de este modo se puede explorar la lógica aparente de los árboles del mundo real y utilizar las propiedades observables de forma no destructiva para reconstruir las ecuaciones (Van Noordwijk. y Mulia, 2002).

El principio de autosemejanza indica que si conocemos el volumen de una parte considerable del árbol que contenga las ramas principales, podremos inferir el volumen restante asumiendo una autosemejanza modelada (Van Noordwijk. y Mulia, 2002). Para esto, se debe encontrar la escala que determina el tamaño de las ramas a modelar. Se asume que la escala se aplica de manera uniforme en todas las posibles dimensiones del árbol. Bastará con tomar cualquier par de medidas correspondientes, cuyo cociente establecerá la escala operando igual que en la semejanza de figuras euclidianas como los triángulos (Figura 5).

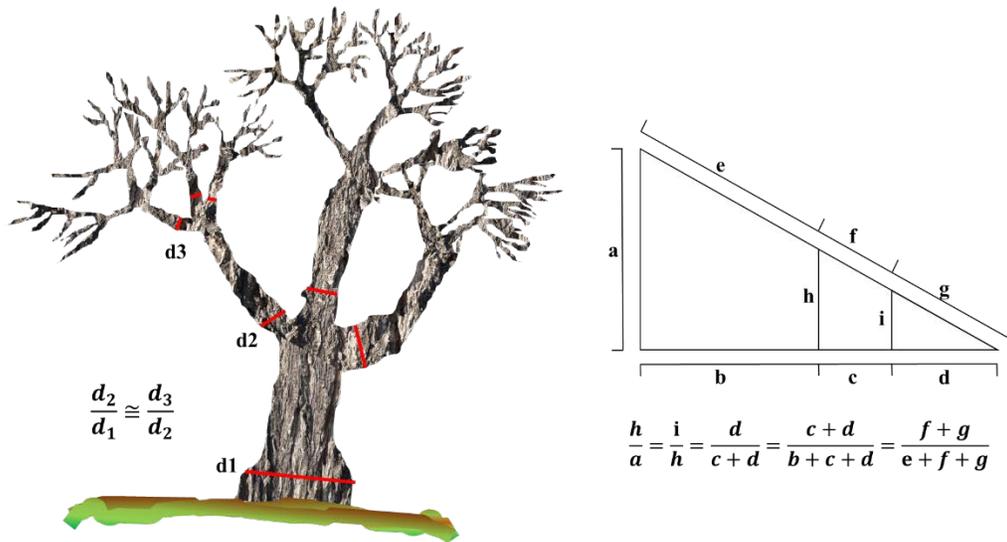


Figura 5. Demostración de la analogía de la semejanza entre triángulos rectángulos en comparación de un árbol con sus ramas. La escala en que se da la semejanza se determina por el cociente de cualquier par de medidas correspondientes.

Determinación de volumen. Se tomaron diámetros a diferentes alturas, a partir de la base del ras del suelo, del tronco central y de las ramas principales (Figura 6). Esto se realizó con la ayuda de un arnés de ascenso y una soga, estos datos permitieron reconstruir el volumen entendiendo cada sección medida como un cono truncado (Ecuación 7). En la primera bifurcación del árbol, se escogió la ramificación más larga y gruesa y se midió el diámetro en la base de esa ramificación. En la siguiente bifurcación se midieron los diámetros en la base de cada ramificación y así sucesivamente con las demás ramificaciones hasta alcanzar ramificaciones de 3 cm de diámetro. Para los árboles bifurcados antes del DAP, se tomó los datos asumiendo cada bifurcación como un árbol individual, siempre y cuando su DAP fuese mayor a 10 cm basado en Cruz de León, G. y Cruz de León, J., (2006). Los diámetros del fuste se midieron con cinta diamétrica, mientras que los diámetros de las ramas con forcípula.

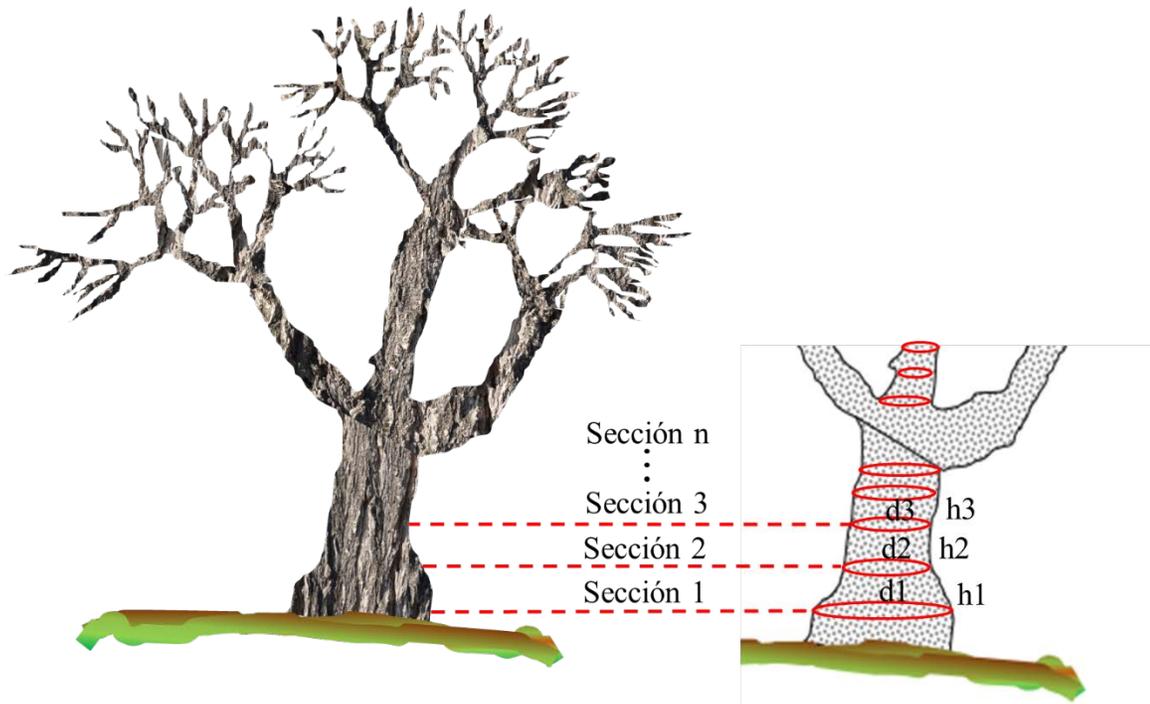


Figura 6. Formación de conos truncados para la reconstrucción del volumen del árbol, donde las secciones 1, 2, 3,...n, corresponden a los conos regulares; d1, d2, d3,...,dn, corresponden a los diámetros y h1, h2, h3,...,hn, a las alturas de cada cono respectivamente.

Para la determinación del volumen en ramas secundarias o de cada sección se usó el mismo principio (Ecuación 7). El volumen total inicial (V1) fue la sumatoria de todos los volúmenes i. Como medida para la asignación de la escala, se seleccionó el diámetro basal de las estructuras (base del árbol y base de ramas), ya que es una medida que ofrece ventajas prácticas en muchos casos (Prodan et al., 1997).

$$V_i = \frac{\pi \times h_i}{3} \left[\left(\frac{d_i^2}{4} + \frac{d_{i+1}^2}{4} \right) + \left(\frac{d_i^2}{4} \times \frac{d_{i+1}^2}{4} \right) \right] \quad [7]$$

Donde:

V_i = Volumen sección i

h_i = Altura sección i

d_i = diámetro inicial de la sección i

d_{i+1} = diámetro final de la sección i.

Se trabajó con una escala obtenida del promedio de los diámetros hasta donde se midieron las ramas, sobre el diámetro de la base del árbol. Asumir una escala promedio permite determinar un nivel de ramificación promedio para el árbol hasta un diámetro deseado, en este caso tres centímetros (Pearson, Walker y Brown, 2005).

Como cada nivel de ramificación determinó un volumen semejante, repetido el número de veces que de ramas se esperaron, también, se determinó dicho número de ramas en cada

nivel. Al final, el volumen total fustal fue igual a la sumatoria de los sub-volúmenes en todos los niveles de ramificación.

Nivel de repetición de la autosemejanza y nivel de ramificación. Para la determinación del nivel de repetición de la autosemejanza (x), hasta que las ramas alcanzaron tres centímetros, se analizó el comportamiento de los diámetros de cierre de las ramas en cada nivel de ramificación (Ecuación 8). El volumen total (V_t) fue la sumatoria de los volúmenes en cada nivel de ramificación hasta el nivel truncado x (Ecuación 9).

$$x = \frac{-\log d_1}{\log C} \quad [8]$$

Donde:

d_1 = diámetro basal del árbol

C = la escala resultado del promedio de los diámetros hasta donde se midieron las ramas dividido en el diámetro basal

x = igual al nivel de ramificación.

$$V_t = \sum_{i=1}^x (C^{i-1}) \times V_1 \times (R_{\text{inicial}}^{i-1}) \quad [9]$$

Densidad de la madera. Se revisó literatura para obtener los valores de la densidad de la madera de las dos especies estudiadas. Para *E. cyclocarpum* se utilizó el valor de 440 kg/m³ (Govaere, Carpio, Cruz, y Rodríguez, 2015) y para *C. pentandra* se utilizó el valor de 240 kg/m³ (Brown, 1997).

Fase estadística. Se probaron 41 modelos de regresiones no lineales en el programa “IBM SPSS Statistics 19” tanto para *E. cyclocarpum* como para *C. pentandra*. Para evaluar los modelos alométricos a primera vista se usó el R^2 . Este índice es mucho mayor cuanto mejor es la calidad de ajuste del modelo. Sin embargo, se debe tomar en cuenta que el R^2 aumenta automáticamente al aumentar las variables explicativas y el número de parámetros. Es decir, no es el mejor criterio para seleccionar un modelo. Pero funciona como punto de referencia inicial. Los dos criterios que se consideraron para escoger la ecuación alométrica que más se ajusta, fueron el coeficiente de determinación (R^2) y el Error Cuadrático Medio (ECM). El ECM se escogió como criterio de validación porque incluye otros como el sesgo, la suma de los cuadrados de los residuos y la varianza residual (Picard, Saint-André, y Henry, 2012).

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Se ordenaron los valores del IVI, producto del inventario exploratorio donde se encontró que *Enterolobium cyclocarpum* y *Ceiba pentandra* se encuentran dentro de los seis primeros lugares en la importancia de árboles latifoliados del campus (Cuadro 1). Se seleccionaron estas dos especies para su análisis porque poseen un IVI representativo y son latifoliados que su arquitectura y crecimiento se inclinan hacia la metodología propuesta. Además, se encontró que *Mangifera indica* es la especie de mayor importancia en el campus, sin embargo es una especie considerada comúnmente como cultivo. Seguido de un grupo de 10 especies denominadas desconocidas. Estas especies no se identificaron debido a que no son representativas considerando un 54.8% de IVI repartido entre 10 especies, los valores individuales serían inferiores comparado a las otras especies mostradas en el Cuadro 1. Es decir, no son especies de importancia en el campus y no afectan la selección de especies para la determinación de ecuaciones alométricas. La especie *Casuarina equisetifolia* a pesar de ser latifoliada (Rodd y Stackhouse, 2008), posee una estructura muy parecida a las coníferas por lo cual la metodología de autosemejanza no se adaptaría muy bien. De la misma manera el eucalipto no se adapta muy bien porque posee un fuste largo y ancho con respecto a las ramas que salen de manera consecutiva del tronco.

Cuadro 1. Índice de valor de importancia de las especies de árboles latifoliados del campus de Zamorano.

Nombre científico	Abundancia (%)	Frecuencia (%)	Dominancia (%)	IVI (%)
<i>Mangifera indica</i>	22.39	29.41	21.19	72.99
Desconocidos	3.48	47.06	4.26	54.80
<i>Casuarina equisetifolia</i>	13.27	11.76	19.33	44.36
<i>Enterolobium cyclocarpum</i>	1.33	23.53	3.66	28.52
<i>Eucalyptus sp.</i>	2.99	17.65	7.29	27.92
<i>Ceiba pentandra</i>	2.49	17.65	6.28	26.41

En ambas especies los valores de volumen y biomasa se puede observar tienen crecimientos relacionados entre las variables DAP y altura (Cuadro 2 y 3). Sin embargo, son afectados por el nivel de ramificación del árbol y el número de ramas iniciales. Para *E. cyclocarpum* se evaluaron 14 árboles, mientras que para *C. pentandra* fueron ocho. Pérez y Díaz (2010), estimaron biomasa en las reservas biológicas Cachalú y Encenillo. En la Reserva Biológica Encenillo se cubicaron 100 árboles en pie, con una muestra de 10 árboles por especie. En la Reserva Biológica Cachalú se cubicaron 152 árboles, con muestras diferentes en 10 especies. En promedio 12 árboles por especie para determinar las ecuaciones. Al final se obtuvieron 20 ecuaciones alométricas, usando el diámetro a la altura del pecho (DAP) como variable independiente. Se infiere una baja cantidad de árboles para el modelamiento debido al detalle en las mediciones que incluye el diámetro de cada rama. El aumento en el tamaño de la muestra ayuda a mejorar la predicción en un rango de clases diamétricas más amplio.

Cuadro 2. Características dasométricas y valores calculados a partir de autosemejanza de *Enterolobium cyclocarpum*.

No.	DAP (cm)	Altura (m)	DpromR (cm)	#Ram. inic.	C	X	V1 (m ³)	VR (m ³)	Vtotal (m ³)	Biomasa (kg)
1	59.4	13.0	17.1	3	0.4	3	0.73	2.92	3.66	1608.43
2	46.5	12.0	17.5	2	0.5	4	0.68	2.52	3.19	1405.11
3	19.6	7.0	8.9	2	0.7	5	0.04	0.49	0.53	234.63
4	13.0	5.2	8.8	2	0.8	7	0.03	1.67	1.70	748.14
5	47.8	11.4	20.4	3	0.5	4	0.20	2.25	2.45	1079.42
6	53.8	12.0	19.3	2	0.5	4	0.28	0.87	1.16	509.23
7	66.8	7.9	21.6	2	0.5	4	0.12	0.43	0.56	244.32
8	82.6	10.6	29.3	2	0.4	4	0.16	0.42	0.58	255.62
9	64.8	11.6	22.6	2	0.5	4	0.09	0.27	0.36	157.89
10	133.6	16.6	40.8	2	0.4	4	0.39	0.78	1.17	513.68
11	81.5	13.0	30.7	2	0.4	4	0.22	0.50	0.72	317.18
12	51.3	8.4	18.6	2	0.5	4	0.05	0.18	0.23	99.04
13	69.9	10.6	26.5	3	0.4	4	0.12	0.86	0.98	429.40
14	46.2	7.6	12.4	3	0.4	4	0.05	0.40	0.45	196.59

Dónde: DpromR= diámetro promedio de las ramas; #Ram.inic.= número de ramas iniciales; C: escala resultado del promedio de los diámetros hasta donde se midieron las ramas dividido en el diámetro basal; X= nivel de ramificación; V1= volumen del fuste; VR= volumen de ramas; Vtotal= volumen total del árbol.

En *E. cyclocarpum* se eliminó un árbol dado que sus características dasométricas con respecto a un volumen de 11.75 m³ no generaban una relación lógica. En *C. pentandra* se eliminaron dos árboles debido a que presentaban valores muy altos de volumen que biológicamente no se consideran posibles. Los volúmenes estimados fueron 20 y 28 m³ para cada árbol. Estos errores se pudieron haber presentado debido a algún problema en la toma

de datos. Especialmente en el caso de *C. pentandra* la medición de las ramas se dificultó más por las espinas que presenta a lo largo del fuste.

Cuadro 3. Características dasométricas y valores calculados a partir de autosemejanza de *Ceiba pentandra*.

No.	DAP (cm)	Altura (m)	DpromR (cm)	#Ram. inic.	C	X	V1 (m ³)	VR (m ³)	Vtotal (m ³)	Biomasa (kg)
1	45.5	5.4	11.6	2	0.4	3	0.21	0.48	0.68	164.34
2	76.5	11.4	16.9	3	0.3	3	0.39	1.28	1.68	402.33
3	59.7	9.2	20.1	4	0.4	4	0.69	12.29	12.98	3115.91
4	43.9	10.2	17.3	3	0.5	4	0.30	3.13	3.43	822.15
5	75.7	8.2	24.0	4	0.4	4	0.48	6.04	6.52	1564.20
6	31.8	5.2	12.9	3	0.5	3	0.12	0.69	0.80	193.14
7	50.0	9.8	16.3	4	0.4	4	0.46	8.93	9.39	2253.94
8	126.0	15.6	52.7	2	0.4	5	2.52	7.76	10.27	2465.94

Dónde: DpromR= diámetro promedio de las ramas; #Ram.inic.= número de ramas iniciales; C: escala resultado del promedio de los diámetros hasta donde se midieron las ramas dividido en el diámetro basal; X= nivel de ramificación; V1= volumen del fuste; VR= volumen de ramas; Vtotal= volumen total del árbol.

De los 41 modelos probados, 28 incluían como variables independientes el DAP y altura. De los cuales 17 (61%) resultaban con un R² significativo con al menos una especie. Los modelos probados solo con DAP fueron 12 y no mostraron R² significativos mayores a 0.5. Mientras que usando altura solo se probó uno que no generó un resultado significativo (Cuadro 4). Usar el DAP y altura mostró un mejor ajuste de las ecuaciones, debido a que se aumenta el número de variables explicativas para la predicción. Las variables explicativas en este caso DAP y altura proporcionan mayor información del árbol, de esta manera los datos de campo de las variables se ajustan estadísticamente agregando parámetros para generar la ecuación de predicción (Picard et al., 2012).

Cuadro 4. Coeficiente de determinación (R²) de los modelos alométricos ejecutados en IBM SPSS Statistics 19.

No.	Modelo alométrico	<i>Enterolobium cyclocarpum</i>	<i>Ceiba pentandra</i>
1	$\text{LnB} = a + b \times \text{LnDAP}$ (Husch)	0.011	0.321
2	$\text{LnB} = a + b \times \text{DAP}^2$	0.000	0.208
3	$B = a + b \times \text{LnDAP}$	0.012	0.251
4	$\text{LnB} = a + b \times \text{LnDAP} + c \times \text{LnDAP} \times h$	0.412	0.364
5	$B = a + b \times \text{DAP}$ (Berkhout)	0.020	0.214
6	$B = a + b \times \text{DAP}^2$ (Kopezky)	0.017	0.183
7	$B = a + b \times \text{DAP} + c \times \text{DAP}^2$ (Hohenadl)	0.020	0.236
8	$V = a + b \times \text{DAP}^2 \times h$ (Spurr)	0.003	0.171
9	$V = a + b \times \text{DAP}^2 + c \times \text{DAP}^2 \times h + d \times h$ (Stoate)	0.492	0.295
10	$V = a + b \times \text{DAP}^2 + c \times \text{DAP} \times h + d \times \text{DAP}^2 \times h$ (Meyer)	0.453	0.264
11	$\text{LnV} = a + b \times \text{LnDAP} + c \times \text{Lnh}$ (Schumacher)	0.473	0.489
12	$\text{LnB} = a + b \times \text{LnDAP} + c \times (\text{LnDAP})^2$	0.016	0.372
13	$\text{LnB} = a + b \times \text{LnDAP} + c \times h$	0.492	0.403
14	$B = a + b \times \text{DAP}^2 + c \times h$	0.388	0.272
15	$\text{LnB} = a + b \times (\text{LnDap})^2 \times h$	0.027	0.321
16	$\text{Log}_{10}B = a + b \times \text{Log}_{10}DAP$	0.011	0.321
17	$\text{Log}_{10}B = a + b \times \text{DAP} + c \times \text{DAP}^2$	0.024	0.320
18	$B = a + b \times h$	0.099	0.272
19	$B = a + b \times \text{DAP}^3$	0.011	0.164
20	$B = (a + b \times \text{DAP} + c \times \text{Lnh})^2$	0.500	0.289
21	$V = (a + b \times \text{DAP} + c \times \text{Lnh})^2$	0.500	0.289
22	$B = (a + b \times \text{DAP} + c \times h)^2$	0.608	0.247
23	$B = (a + b \times \text{DAP})^2$	0.020	0.202
24	$B = a + b \times \text{DAP}^2 + c \times (\text{DAP}^2) \times h$	0.189	0.187

No.	Modelo alométrico	<i>Enterolobium cyclocarpum</i>	<i>Ceiba pentandra</i>
25	$B = a + b \times DAP + c \times h$	0.516	0.274
26	$\text{Log}_{10}B = a + b \times \text{Log}_{10}((DAP)^2 \times h)$	0.000	0.402
27	$V = a + b \times (DAP^2) \times h + (c \times DAP^2 \times h)^2$	0.007	0.204
28	$V = a \times (b + (c \times DAP^2)) \times h$	0.226	0.171
29	$\text{Log}_{10}B = a + b \times \text{Log}_{10}(DAP^2) + c \times \text{Log}_{10}(DAP)$	0.011	0.321
30	$\text{Ln}B = a + b \times \text{Ln}(DAP^2) \times \text{Ln}(h) + c \times \text{Ln}(h^2) \times \text{Ln}(DAP)$	0.013	0.432
31	$B = a \times h + b \times DAP + c \times DAP \times h^2 + d \times (DAP^2) \times h + e \times (DAP \times h)^2$	0.526	0.347
32	$B = a \times h + b \times (DAP^2) \times h^2 + c \times (DAP^3) \times (h^2)$	0.223	0.279
33	$\text{Ln}B = a + b \times \text{Ln}(DAP^2) \times \text{Ln}h + c \times \text{Ln}(h^2 \times \text{Ln}DAP)$	0.288	0.508
34	$\text{Ln}V = a + b \times \text{Ln}(DAP^2) \times \text{Ln}h + c \times \text{Ln}(h^2 \times \text{Ln}DAP)$	0.288	0.508
35	$\text{Ln}V = a + b \times \text{Ln}(DAP^2 \times \text{Ln}h) + c \times \text{Ln}(h^2 \times \text{Ln}DAP)$	0.470	0.491
36	$\text{Ln}V = a + b \times \text{Ln}(DAP^2) \times \text{Ln}h + c \times \text{Ln}(h^2 \times \text{Ln}DAP)$	0.051	0.541
37	$\text{Ln}V = a + b \times (DAP^2) \times \text{Ln}h + c \times \text{Ln}(h^2 \times \text{Ln}DAP)$	0.026	0.509
38	$\text{Ln}V = a + b \times DAP^2 \times h + c \times \text{Ln}(h^2 \times \text{Ln}DAP)$	0.015	0.510
39	$\text{Ln}V = a + b \times \text{Ln}(DAP^2) \times \text{Ln}h + c \times \text{Ln}(h^2 \times \text{Ln}DAP) + d \times h$	0.596	0.602
40	$\text{Ln}V = a + b \times \text{Ln}(DAP^2) \times \text{Ln}h + c \times \text{Ln}(h^2 \times \text{Ln}DAP) + d \times h + e \times DAP$	0.624	0.946
41	$V = (a + b \times DAP + c \times h)^2$	0.608	0.247

Una vez determinadas las ecuaciones con mejor ajuste de R^2 , se seleccionaron las más significativas y se compararon por ECM. Gudiel (2015) usó como criterios de validación de los modelos alométricos el R^2 , el ECM y el error estándar de estimación (S_{xy}). Mientras Pérez y Díaz (2010) usaron R^2 , error absoluto medio y prueba de Durbin y Watson. El manual de la FAO de Picard et al. (2012) mencionan seis criterios de validación el sesgo, la suma de cuadrados de los residuales (SCE), la varianza residual (s^2), el error residual ajustado (ECM), el R^2 y el criterio de información de Akaike (AIC). González (2008) consideró tres de ellos el R^2 , ECM y AIC. En este estudio, se consideraron el R^2 y ECM como criterios de validación para seleccionar los modelos de mejor ajuste.

El modelo de ecuación que mejor se ajustó y seleccionó para *E. cyclocarpum* y *C. pentandra* fue el siguiente $\ln(V) = a + b \times \ln(DAP^2) + c \times \ln(h) + d \times \ln(h^2 \times \ln(DAP)) + e \times DAP$ con el mayor R^2 y menor ECM de los probados (Cuadro 6) (Cuadro 7). La ecuación de *E. cyclocarpum* tiene aplicación en un rango de árboles con DAP de 13 a 133 cm y con proporción DAP/altura de 2.5 a 8.5 (Cuadro 5). Para *E. cyclocarpum* se determinó un rango de proporciones de aplicabilidad de la ecuación debido a la biología de crecimiento del árbol, estos crecen más en DAP que en altura. Mientras que la de *C. pentandra* es aplicable en un rango de árboles con DAP de 31 a 126 cm. No se consideró un rango de proporción DAP/altura para esta especie porque mostró un mejor ajuste de la ecuación y el crecimiento DAP-altura es proporcional (Cuadro 7).

Cuadro 5. Rango de validación de la ecuación seleccionada para *Enterolobium cyclocarpum* con respecto a la proporción DAP/Altura

No.	DAP (cm)	Altura (m)	DAP/Altura
1	59.4	13.0	4.6
2	46.5	12.0	3.9
3	19.6	7.0	2.8
4	12.9	5.2	2.5
5	47.8	11.4	4.2
6	53.9	12.0	4.5
7	66.8	7.9	8.5
8	82.6	10.6	7.8
9	64.8	11.6	5.6
10	133.6	16.6	8.0
11	81.5	13.0	6.3
12	51.3	8.4	6.1
13	69.9	10.6	6.6
14	46.2	7.6	6.1

Dónde: No.= número de árbol; DAP= diámetro a la altura del pecho.

Cuadro 6. Ajuste de ecuaciones alométricas para el cálculo de biomasa aérea de *Enterolobium cyclocarpum*, coeficientes y criterios estadísticos.

Modelo de ecuación	Coeficientes	Criterios Estadísticos	
		R ²	ECM
$\ln(V) = a + b \times \ln(DAP^2) + c \times \ln(h) + d \times \ln(h^2 \times \ln(DAP)) + e \times DAP$	a= 14.194 b= -0.016 c= -5.654 d= 1.943 e= 0.032	0.624	0.381
$V = (a + b \times DAP + c \times h)^2$	a= 0.177 b= 0.022 c= -0.240	0.608	0.554
$\ln(V) = a + b \times \ln(DAP^2) + c \times \ln(h^2 \times \ln(DAP)) + d \times h$	a= 7.949 b= -0.007 c= -3.273 d= 1.219	0.596	0.410

Dónde: R²= coeficiente de determinación, ECM= error cuadrático medio.

Cuadro 7. Ajuste de ecuaciones alométricas para el cálculo de biomasa aérea de *Ceiba pentandra*, coeficientes y criterios estadísticos.

Modelo de ecuación	Coeficientes	Criterios Estadísticos	
		R ²	ECM
$\text{Ln}(V) = a + b \times \text{Ln}(\text{DAP}^2) \wedge \text{Ln}(h) + c \times \text{Ln}(h^2 \times \text{Ln}(\text{DAP})) + d \times h + e \times \text{DAP}$	a= -94.377 b= 0.111 c= 34.336 d= -10.726 e= -0.282	0.946	0.052
$\text{Ln}(V) = a + b \times \text{Ln}(\text{DAP}^2) \wedge \text{Ln}(h) + c \times \text{Ln}(h^2 \times \text{Ln}(\text{DAP})) + d \times h$	a= -15.228 b= 0.003 c= 4.340 d= -0.952	0.602	0.348
$\text{Ln}(V) = a + b \times \text{Ln}(\text{DAP}^2) \wedge \text{Ln}(h) + c \times \text{Ln}(h^2 \times \text{Ln}(\text{DAP}))$	a= -6.989 b= -0.003 c= 1.516	0.541	0.367
$\text{Ln}(V) = a + b \times \text{DAP}^2 \times h + c \times \text{Ln}(h^2 \wedge \text{Ln}(\text{DAP}))$	a= -3.385 b= -8.18E-06 c= 0.285	0.510	0.392
$\text{Ln}(V) = a + b \times \text{Ln}(\text{DAP}^2) \times \text{Ln}(h) + c \times \text{Ln}(h^2 \times \text{Ln}(\text{DAP}))$	a= -6.740 b= -0.161 c= 1.891	0.508	0.394

Dónde: R²= coeficiente de determinación, ECM= error cuadrático medio.

En un bosque tropical se pueden capturar en promedio 321.13 ton. de CO₂ por hectárea (Kanninen, 2000). Según el inventario del IVI, se determinó que se pueden encontrar dos Guanacastes y dos Ceibas por hectárea. De acuerdo a los datos del Cuadro 8 el promedio de CO₂ capturado por un Guanacaste es de 0.9542 ton de CO₂.

Cuadro 8. Demostración de uso de la ecuación de *Enterolobium cyclocarpum* para medir CO₂ capturado.

No.	DAP (cm)	Altura (m)	Volumen (m ³)	Biomasa (kg)	C (ton)	CO ₂ (ton)
1	59.44	13.00	2.447	1076.86	0.54	1.98
2	46.48	12.00	2.133	938.63	0.47	1.72
3	19.56	7.00	0.772	339.78	0.17	0.62
4	12.95	5.20	1.673	736.17	0.37	1.35
5	47.75	11.40	1.470	646.86	0.32	1.19
6	53.85	12.00	1.703	749.43	0.37	1.38
7	66.80	7.90	0.330	145.04	0.07	0.27
8	82.55	10.60	0.674	296.49	0.15	0.54
9	64.77	11.60	1.124	494.50	0.25	0.91
10	133.60	16.60	1.292	568.55	0.28	1.04
11	81.53	13.00	1.558	685.66	0.34	1.26
12	51.31	8.40	0.386	169.89	0.08	0.31
13	69.85	10.60	0.708	311.68	0.16	0.57
14	46.23	7.60	0.337	148.21	0.07	0.27

Dónde: No.=número de árbol; DAP= diámetro a la altura del pecho; C= carbono; CO₂= dióxido de carbono.

De acuerdo al Cuadro 9 una Ceiba puede capturar 2.31 ton de CO₂. Considerando los dos árboles de cada especie por hectárea en el campus, se puede determinar que se han capturado 6.53 ton de CO₂ por hectárea. Comparado con el CO₂ total promedio capturado por hectárea en un bosque tropical, este valor representaría el 2.03%. Si consideramos todos los árboles de ambas especies (14 Guanacastes y 8 Ceibas) se calculan 32 ton de CO₂ capturado por hectárea, lo que representaría el 9.97% de un bosque tropical.

Cuadro 9. Demostración de uso de la ecuación de *Ceiba pentandra* para determinar CO₂ capturado.

No.	DAP (cm)	Altura (m)	Volumen (m³)	Biomasa (kg)	C (ton)	CO₂ (ton)
1	45.47	5.40	1.11	265.46	0.13	0.49
2	76.45	11.40	1.80	432.45	0.22	0.79
3	59.69	9.20	13.92	3340.99	1.67	6.13
4	43.94	10.20	3.30	790.91	0.40	1.45
5	75.69	8.20	4.58	1098.53	0.55	2.02
6	31.75	5.20	0.55	131.90	0.07	0.24
7	50.04	9.80	8.40	2016.84	1.01	3.70
8	125.98	15.60	8.60	2063.28	1.03	3.79

Dónde: No.=número de árbol; DAP= diámetro a la altura del pecho; C= carbono; CO₂= dióxido de carbono.

4. CONCLUSIONES

- Las especies de importancia en el campus de la Escuela Agrícola Panamericana son *Mangifera indica*, *Casuarina equisetifolia*, *Enterolobium cyclocarpum*, *Eucalyptus* sp. y *Ceiba pentandra*. Las ecuaciones alométricas se determinaron para *Enterolobium cyclocarpum* y *Ceiba pentandra*.
- La ecuación alométrica ajustada que mejor estima el volumen en la especie *Enterolobium cyclocarpum* en el campus de la Escuela Agrícola Panamericana Zamorano es $\ln(V) = 14.194 - 0.016 \times \ln(DAP^2) + \ln(h) - 5.654 \times \ln(h^2 \times \ln(DAP)) + 1.943 \times h + 0.032 \times DAP$ con un R^2 de 0.624 y un ECM de 0.381.
- La ecuación alométrica ajustada que mejor estima el volumen en la especie *Ceiba pentandra* en el campus de la Escuela Agrícola Panamericana Zamorano es $\ln(V) = -94.377 + 0.111 \times \ln(DAP^2) + \ln(h) + 34.336 \times \ln(h^2 \times \ln(DAP)) - 10.726 \times h - 0.282 \times DAP$ con un R^2 de 0.946 y un ECM de 0.052.
- Para la ecuación de *Enterolobium cyclocarpum* se aseguran resultados adecuados de estimación para clases diamétricas en un rango de 13 a 133 cm y con valores de 2.5 a 8.5 en proporción DAP/altura. Mientras que para la ecuación de *Ceiba pentandra*, se aseguran resultados adecuados de estimación para clases diamétricas en un rango de 31 a 126 cm.
- La metodología de autosemejanza funciona como herramienta para estimar biomasa y es ventajosa para medir el volumen cuando se quiere evitar la corta de árboles. El tiempo empleado para las mediciones en campo es de mínimo una hora según el tamaño del árbol.
- No se logró determinar una ecuación alométrica que estime biomasa debido a que los R^2 encontrados fueron menores a 0.5 con ECM altos.

5. RECOMENDACIONES

- Se recomienda realizar un estudio similar, con mayor tamaño de muestra y variedad de diámetros, para obtener una mejor distribución diamétrica de la ecuación.
- Elaborar ecuaciones alométricas para otras especies del campus para obtener más información del CO₂ capturado a nivel del paisaje del campus.
- La metodología de autosemejanza sería muy útil en zonas donde no se permite el aprovechamiento y se podría estudiar el carbono almacenado en la Reserva Biológica Uyuca.
- Para obtener una ecuación de biomasa con un mayor R² y un ECM más cercano a cero, se recomienda determinar la densidad de la madera de las dos especies con muestras de árboles del campus.

6. LITERATURA CITADA

- Alberto, D. (2005). Acumulación y Fijación de Carbono en Biomasa Aérea de *Pinus oocarpa* en Bosques Naturales de Cabañas, La Paz. Siguatepeque, Comayagua, Honduras.
- Araujo, T. M., Higuchi, N. y de Carvalho, J. A. (1999). Comparison of formula for biomass content determination in a tropical rainforest site in the state of Par. Brasil. *Forest Ecology and Management*, 117: 43-52.
- Banco Mundial, (2016). *Emisiones de CO2 (kt) | Data*. [en línea] Disponible en: <http://datos.bancomundial.org/indicador/EN.ATM.CO2E.KT> [Accesado 11 Sep. 2016].
- Brown, S., (1997). Estimating biomass and biomass change of tropical forests: a primer (Vol. 134). *FAO Forestry Paper*, 134(1), 42-45.
- Chave, J., Andalo, C., Brown, S., Cairns, M., Chambers, J., Eamus, D. y Fromard, F. (2005). Tree allometry and improved estimation of carbon stocks and balance in tropical forests. *Oecología*, 145, 87-99.
- Cruz de León, G. y Cruz de León, J. (2006). The segmental conic model for forest measurements. *Maderas y bosques*, 12, 3-13.
- Delgado, J. I. y Romero, D. C. (2007). Cambio Climático. Glaciaciones y calentamiento global, Bogotá: Fundación Universidad de Bogotá Jorge Tadeo Lozano.
- Escobedo, F., Clerici, N., Staudhammer, C. y Tovar, G. (2015). Socio-ecological dynamics and inequality in Bogotá, Colombia's. *Urban Forestry & Urban Greening*, 1040-1053.
- Ferreira, O. (2005). Herramientas para el manejo de bosques: Manual de inventarios forestales. *Siguatepeque, Honduras*. 141 p.
- González, M. (2008). Estimación de la biomasa aérea y la captura de carbono en regeneración natural de *Pinus maximinoi* HE Moore, *Pinus oocarpa* var. *ochoterenai* Mtz. y *Quercus* sp. en el norte del Estado de Chiapas, México.

- Gordo, J. (2009). Análisis estructural de un bosque natural localizado en zona rural del municipio de Popayan. *Biotecnología en el Sector Agropecuario y Agroindustrial*, 7(1).
- Govaere, G., Carpio, I., Cruz, L. y Rodríguez, R. (2008). Caracterización tecnológica de la madera de Guanacaste y Cenízaro provenientes de una plantación de 12 años de edad. *Informe Final, Universidad de Costa Rica, Laboratorio de Productos Forestales, San José, Costa Rica*.
- Grey, G. W. (1996). *The Urban Forest: Comprehensive Management*. John Wiley and Sons, New York
- Honorio, E. y Baker, T. (2010). Manual para el monitoreo del ciclo del carbono en bosques amazónicos. Lima: Instituto de Investigaciones de la Amazonia Peruana.
- Kanninen, M. (2000). Secuestro de carbono en bosques, su papel en el ciclo global. In 2. *Conferencia Electrónica de la FAO Sobre Agroforestería para la Producción Animal en América Latina (Agrofor), Roma (Italia)(Ago 2000-Mar 2001)*.
- Ligña, M. (2014). Efecto de cultivos de cobertura en el control de malezas y aporte de materia seca y nutrientes al suelo.
- Liu, C. y Li, X. (2012). Carbon storage and sequestration by urban forests in Shenyang, China. *Urban Forestry & Urban Greening*, 121-128.
- Pearson, Walker, T. y Brown, S. (2005). Sourcebook for land use, land-use change and forestry projects. Winrock International and the BioCarbon Fund of the World Bank. 57 p.
- Pérez Lara, M. C. y Díaz Timoté, J. J. (2010). Estimación del Carbono Contenido en la Biomasa Forestal Aérea de dos Bosques Andinos en los Departamentos de Santander Y Cundinamarca. *Master's Thesis, Universidad Distrital Francisco José de Caldas, Bogotá, Colombia*.
- Picard, N., Saint-André, L. y Henry, M. (2012). Manual de construcción de ecuaciones alométricas para estimar el volumen y la biomasa de los árboles: del trabajo de campo a la predicción. 223 p.
- Prodan, M., Peters, R., Cox, F. y Real, P. (1997). *Mensura Forestal. GTZ/IICA. Serie Investigación y Educación en Desarrollo Sostenible. San José, Costa Rica*. 586 p.
- Rodd, T. y Stackhouse, J. (2008). *Trees: A visual guide*. California, Estados Unidos. University of California Press.
- Schlegel, B. (2001). Estimación de la biomasa y carbono en bosques del tipo forestal siempreverde. Valdivia, Chile.

- Segura, M. (1997). Almacenamiento y fijación de carbono en *Quercus costarricensis*, en un bosque de altura en la cordillera de Talamanca, Costa Rica. Tesis de Licenciatura, Universidad Nacional. Heredia, Costa Rica. Escuela de Ciencias Ambientales. 126 p.
- Talanquer, V. (1996). *Fractus, fracta, fractal. Fractales, de laberintos y espejos*. Mexico: FCE.
- Van Noordwijk., M. y Mulia, R. (2002). Functional branch analysis as tool for fractal scaling above-and belowground trees for their additive and non-additive properties. *Ecological Modelling*, 149, 41-51.
- Zarco, V., Valdez, J., Ángeles, G. y Castillo, O. (2010). Estructura y diversidad de la vegetación arbórea del parque estatal Agua Blanca, Macuspana, Tabasco. *Universidad y ciencia*, 26(1), 1-17.