



<https://revistaagrociencia.wordpress.com/>



Artículo de investigación

DOI:10.5281/zenodo.10709162

Desarrollo de ecuación alométrica para estimar carbono en café (*Coffea arabica* L.) de media altura en el Municipio de Comasagua, Cordillera del Bálsamo, El Salvador

Development of an allometric equation to estimate carbon in coffee (*Coffea arabica* L.) of medium height in the Municipality of Comasagua, Cordillera del Bálsamo, El Salvador

Marroquín-Castro R.A.¹, Sánchez-Hernández J.A.¹, Urías-Fernández R.A.¹, Quintanilla-Quintanilla J.R.², Arias de Linares A.Y.³ Palacios-Hernández D.J.⁴

Correspondencia:
mc11134@ues.edu.sv
uf12001@ues.edu.sv
arnher16@gmail.com

Presentado:
26 de octubre de 2020
Aceptado:
14 de noviembre de 2020

- 1 Universidad de El Salvador, Facultad de Ciencias Agronómicas, Departamento de Recursos Naturales y Medio Ambiente.
- 2 Universidad de El Salvador, Facultad de Ciencias Agronómicas, Departamento de Fitotecnia, Docente asesor.
- 3 Universidad de El Salvador, Facultad de Ciencias Agronómicas, Departamento de Química Agrícola, Docente asesor.
- 4 Universidad de El Salvador, Facultad de Ciencias Agronómicas, Departamento de Recursos Naturales y Medio Ambiente, Docente asesor.

RESUMEN

La investigación se realizó en cuatro fincas del municipio de Comasagua, departamento de La Libertad, El Salvador, ubicadas entre 800 a 1,200 metros sobre el nivel del mar; durante agosto de 2018 a febrero 2020. El objetivo principal fue desarrollar una ecuación alométrica que permita estimar la biomasa y el carbono de las plantas de café. El método aplicado para realizar el levantamiento de información de campo fue el destructivo; este consistió en seccionar cada uno de los 72 arbustos en sus partes principales: raíz, tocón, rebrotes, bandolas, hojas, flores y frutos, según su fenología. Los análisis de humedad parcial y densidad específica de madera se realizaron en el Laboratorio de Química Agrícola y el Laboratorio de Suelos de la Facultad de Ciencias Agronómicas de la Universidad de El Salvador. El registro y manejo de datos dasométricos y de laboratorio, se desarrollaron con la aplicación Open Data Kit® (ODK®), diseñando un formulario para registrar las variables: altura total de la planta, altura de rebrotes, altura de tocón, diámetro a 15 centímetros del tocón, diámetro a la base de los rebrotes, peso húmedo y peso seco de las secciones. El análisis de laboratorio implicó tomar una sub muestra de cada sección para determinar la humedad parcial y densidad específica de madera en tocón y rebrotes. El análisis estadístico se realizó utilizando el software IBM SPSS® Statistics 23 y Excel® con el complemento estadístico XLSTAT® 2019. Se realizaron diferentes pruebas con el fin de comprobar la normalidad de las variables. Mediante análisis de regresión se desarrollaron diferentes modelos combinando la variable dependiente e independiente, hasta lograr uno apropiado al fenómeno estudiado. La biomasa seca arriba del suelo está compuesta por el tocón más rebrotes, bandolas, hojas, flores y frutos. La variable dependiente en el modelo para tocón fue la biomasa seca en kilogramos y las variables independientes comprendieron el diámetro a 15 centímetros de la base y la altura en metros; para el modelo de rebrotes se relacionaron las variables biomasa seca de rebrotes más bandolas, hojas en kilogramos y el diámetro de la base en centímetro. Se obtuvieron como resultado dos modelos de regresión de potencia el de tocón con un R²

= 0.692 ($p < 0.01$). El de rebrotes con un $R^2 = 0.914$ ($p < 0.01$). Esto mediante la verificación del gráfico de regresiones y el resumen de ajuste de los modelos

Palabras claves: Ecuación alométrica, café, biomasa, carbono, densidad gravimétrica, modelo alométrico, factor de forma, carbono fijado, CO_2 fijado.

ABSTRACT.

The research was conducted during August 2018 to February 2020 in four farms in the municipality of Comasagua, department of La Libertad, El Salvador, located between 800 to 1,200 meters above sea level. The main objective was to develop an allometric equation to estimate the biomass and carbon content of coffee plants. A destructive method was used to collect the field information. It consisted of sectioning each of 72 coffee shrubs into their main parts: root, stump, sprouts, branches, leaves, flowers and fruits, according to their phenology. Analyses of partial moisture and specific density of wood were carried out in the Agricultural Chemistry Laboratory and the Soil Laboratory of the Faculty of Agronomic Sciences of the University of El Salvador. Registration and management of dasometric and laboratory data were carried out using an Open Data Kit® (ODK®) application. A form was designed to record: v total height of the plant, height of sprouts, stump height, diameter at 15 centimeters from the stump, diameter at the base of the shoots, wet weight and dry weight of the sections. The laboratory analysis involved taking a subsample from each section to determine partial moisture and specific wood density in stumps and sprouts. The statistical analysis was carried out using the IBM SPSS® Statistics 23 and Excel® software, with the statistical complement XLSTAT® 2019. Different tests were conducted in order to check the normality of the variables. Through regression analysis, different models were developed combining the dependent and independent variable, until achieving an appropriate regression equation related to the phenomenon being studied. The above-ground dry biomass was composed of the stump plus sprouts, branches, leaves, flowers and fruits. The dependent variable in the model for stump was the dry biomass in kilograms and the independent variables included the diameter at 15 centimeters from the base and the height in meters. For the regrowth model, the variables were related to the dry biomass of regrowths plus branches, leaves in kilograms and the diameter of the base in centimeters. After validation of the regressions in the graph and considering the best fit of the curves, two power regression models were obtained: the stump with an $R^2 = 0.692$ ($p < 0.01$) and the regrowth with an $R^2 = 0.914$ ($p < 0.01$).

Key words: Allometric equation, coffee, biomass, carbon, gravimetric density, allometric model, form factor, fixed carbon, fixed CO_2 .

INTRODUCCIÓN

El café en El Salvador se clasifica de acuerdo a su altura sobre el nivel del mar: café de bajo, media altura y estricta altura (Arévalo y Méndez 2011). La zonificación por regiones, se encuentra dividida en seis cordilleras: Apaneca-Ilamatepec, Alotepec-Metapán, Bálsamo-Quezaltepec, Chinchontepec, Tecapa-Chinameca y Cacahuatique (CSC 2017). Con un área cultivada de 174,833.51 ha en total, que representa el 8.29% de la cobertura de bosque de café a nivel nacional (MARN 2018).

Según la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático, este se define como “cambio de clima atribuido directa o indirectamente a la actividad humana, que altera la composición de la atmósfera global y que se suma a la variabilidad

natural del clima observada durante períodos de tiempo” (Benavides y León 2007).

De 2005 a 2010, en la biomasa forestal el carbono ha disminuido, debido a la pérdida de bosques (Ruiz *et al.* 2014). La biomasa es la capacidad existente en los diferentes componentes de los ecosistemas para acumular o almacenar materia orgánica en diferentes periodos de tiempo (Cuenca *et al.* 2014). Los inventarios de carbono en cafetales son estimaciones que permiten ilustrar el potencial de los cafetales arbolados como sumideros de Carbono (Filho y Abarca 2008). Fisiológicamente la asimilación fotosintética de CO_2 , es el primer paso para la producción de nueva biomasa (Azcón-Bieto y Talón 2000).

Los modelos alométricos ayudan al cálculo de la biomasa de grandes áreas forestales (Solano *et al.*

2014). El método más accesible para obtener una estimación de la biomasa de un árbol consiste en utilizar la relación existente entre el diámetro del árbol y de la biomasa. En este nivel las ecuaciones entran en juego. La alometría estudia las relaciones de las características dimensionales de los individuos en una población (Sola *et al.* 2012). En este contexto, existen dos métodos para medir y estimar la biomasa arbórea sobre el suelo: el método directo y el indirecto (Rügnitz *et al.* 2009).

El objetivo del estudio fue desarrollar una ecuación alométrica para estimar el carbono almacenado en plantaciones de café de la zona de media altura 800 a 1200 msnm del municipio de Comasagua, departamento de La Libertad, en El Salvador. Se aplicaron principios de dasometría y alometría como herramientas para el desarrollo de modelos utilizados para estimar biomasa y carbono en plantaciones de bosques de café bajo sombra.

MATERIALES Y METODOS

Ubicación espacial

Se realizó en cuatro fincas, ubicadas en el municipio de Comasagua, departamento de La Libertad, El Salvador, sobre la Cordillera del Bálsamo. Comasagua cuenta con un área de 3,141.07 hectáreas cultivadas de café bajo sombra de media altura de 800 - 1200 msnm, que equivale a 42.7% del área total; punto de referencia geográfica 13° 38' 16.3" N y -89° 22' 38.2" W, con pendiente promedio de 55%. Ubicada a 21 kilómetros de la ciudad de San Salvador. Delimita al norte con Talnique, este con Santa Tecla, sur con La Libertad y al oeste con Tamanique.

Caracterización Climática

Temperatura máxima de 22°C, la mínima de 19°C, una precipitación anual de 1800 mm, y humedad relativa del 80%.

Metodología de campo

Se adaptó de Castellanos *et al.* (2010), Andrade y Segura (2008) y Picard *et al.* (2012). Se utilizó el método

destrutivo; consistió en seccionar cada individuo en sus partes principales, en este caso raíz, tocón, rebrotes, bandola y hojas. El procedimiento fue el siguiente:

- Visitas de campo con los coordinadores de la zona de estudio, personal de unidad ambiental de la alcaldía y personal del Consejo Salvadoreño del Café (CSC).
- Se desarrolló una planificación de los posibles lugares de muestreo con ArcGis® versión 10.3, según la cartografía oficial del Centro Nacional de Registro (CNR). Los puntos de muestreo fueron distribuidos aleatoriamente.
- Con las coordenadas de los diferentes puntos se realizó otra visita para establecer día de trabajo en cada una de las fincas cafetaleras.
- Con los puntos cargados en un GPS Garmin® Modelo 78 se localizaron uno a uno los sitios de muestreo, previamente se codificaron.
- Mediante un análisis visual de la zona en el punto de muestreo, se seleccionaron individuos que no tuviera rasgos atípicos que generan errores en las mediciones.
- Se realizó una descripción general del lugar como: manejo de la finca, topografía, pendiente y orientación topográfica.
- Las variables medidas en campo se registraron en un formulario digital diseñado en la plataforma ODK® Build.
- Los individuos se ubicaron por medio de la coordenada GPS, determinada al azar en el software ArcGis®, además se utilizó un mapa cartográfico de la zona donde se realizó el muestreo y el registro de datos.
- Se midieron (con una cinta diamétrica, una métrica y un vernier) las siguientes variables: altura total, altura de tocón, altura de rebrotes, diámetro a 15 cm de altura y diámetro a la base

de rebrotes.

- Luego de registrar las variables dasométricas, se continuó con el seccionamiento de cada individuo sus partes: raíz, tocón, tallo, bandolas, hojas, flores y frutos. Estas dos últimas variables se tomaron de acuerdo al estado fenológico de los cafetos.
- Se extrajo la raíz de los individuos con un palín y biello.
- Luego se pesó en balanza analítica, cada uno de los elementos seccionados y se registraron estos pesos en el formulario Open Data Kit®.
- Se tomaron muestras de cada elemento, para el respectivo análisis de laboratorio, cada muestra fue etiquetada con el número correlativo, código, fecha, tipo de sección y lugar.
- Las muestras tomadas se colocaron en sobres de papel manila debidamente etiquetados y se transportaron en una caja para evitar pérdidas o deterioro.

Definición de ecosistemas

El ecosistema seleccionado fue café bajo sombra; se sitúa entre los 800 y 1200 msnm, ahí se cultiva el café de media altura, en sus variedades: Borbón, Pacamara, Pacas, Catuai, entre otras de la especie arábica. Por ser plantaciones permanentes, las edades varían y se realizan diferentes manejos agronómicos.

Determinación del tamaño de muestra

El muestreo se basó en la metodología del manual de construcción de ecuaciones alométricas para estimar el volumen y la biomasa de los árboles de Picard *et al.* (2012), que indica el procedimiento del método destructivo, para la recolección de datos y muestras; en el estudio de línea base de carbono en cafetales de Castellanos *et al.* (2010), se muestreo el 10% del área total cultivada con café, para ello se utilizaron 72 individuos, y se desarrolló el modelo alométrico. Por lo tanto, se consideró el criterio técnico de los autores antes mencionados y se determinó un total de 72

individuos de distintas variedades, distribuidos en la zona de media altura del municipio de Comasagua.

Selección de individuos por muestreo

Se seleccionaron arbustos de café de 5 años en adelante, plantas recepadas (con tocón), distribuidas por rango de elevaciones a cada 100 msnm, distribuidas en cuatro diferentes zonas.

Medición, corte y estimación de biomasa por árbol

Una vez seleccionada la planta por cortar; se midió la altura de tocón a 15 cm de la base, altura total de la planta, altura total de los rebrotes, diámetro de la base de los rebrotes y el diámetro a $\frac{2}{3}$ de altura. Los diámetros se midieron con una cinta diamétrica y la altura con cinta métrica. Se cortaron todas las secciones en el siguiente orden: frutos, flores, hojas, bandolas, rebrotes, tocón y raíz, con el cuidado de recuperar en su totalidad cada sección.

Luego se pesó la raíz, tocón, rebrotes, bandolas y hojas, para registrar la biomasa húmeda en una balanza digital de una precisión ± 1 g. También, se procedió a tomar una sub muestra de aproximadamente 100 g de cada sección, adicionalmente se tomaron muestras para determinar la densidad específica de la madera de tocón y rebrotes; para almacenarse en bolsas de papel Kraft. Cada una de estas sub muestras se les asignó un código para su identificación y manejo en laboratorio.

Estas sub muestras se utilizaron para estimar la biomasa seca de cada sección de la planta (ecuación 1).

$$B = \frac{P_f \times M_s}{100} \quad (1)$$

Donde:

B : biomasa

P_f : peso fresco (Kg)

M_s : materia seca %

Cuadro 1. Codificación de muestras.

Código	Sección
	HOJA
H_FSA_A02A	BANDOLA
B_FSA_A02A	FRUTO
FR_FSA_A02A	FLOR
FL_FSA_A02A	TOCÓN
To_FSA_A02A	TOCON
top_FSA_A02A	DENSIDAD
T_FSA_A02A	TALLO
Tp_FSA_A02A	TALLO
R_FSA_A02A	DENSIDAD
	RAIZ

Metodología de laboratorio

Se determinó el contenido de humedad de la biomasa para poder estimar el peso seco; se requirió 100 g de muestra. Esto se hizo mediante el secado en horno de convección de todas las muestras de biomasa viva colectadas. El secado según Andrade y Segura (2008) a una temperatura media de 60°C hasta llegar a un peso constante.

Estas muestras pasaron por el siguiente proceso:

- Se tomaron 9 sub muestras de biomasa verde por planta.
- Se pesaron las muestras para obtener peso húmedo (PH). Aproximadamente 100 g en balanza semi-analítica.
- Se calentó el horno a 60 °C y se colocaron las muestras por 72 horas hasta obtener un peso constante mediante pesajes periódicos, así evitar dejar residuos de humedad y no provocar oxidación de las muestras.
- Las sub muestras se colocaron en bolsas de papel Kraft etiquetadas en el horno.
- Se retiraron las muestras del horno y se colocaron en desecador por 30 minutos y posteriormente se pesaron en una balanza semi-analítica. Para

así conocer la pérdida de peso (ecuación 2).

- Con el peso inicial de madera y el de madera más parafina por diferencia, se determina el peso únicamente de la parafina.
- Finalmente, la gravedad específica es el peso de un bloque de madera secado al horno dividido entre el peso de un volumen de agua desplazada (Panshin y Zeeuw 1970).

Cálculo de humedad:

$$H\% = \frac{PH - PS}{PS} \times 100 \quad (2)$$

Donde:

PH: Porcentaje de humedad.

PH: Peso humedad de la muestra.

PS: Peso seco de la muestra

Densidad de madera

Para la determinación de la densidad específica de madera se realizaron los siguientes pasos: se seleccionaron muestras de tallo y de tocón, se determinó la humedad parcial, se parafinó cada trozo de tocón y rebrote sin corteza, se sumergía en un vaso de eureka que contenía agua a temperatura ambiente, con la ayuda de una pesa, ya que la madera tiende a flotar y el vaso de eureka se utilizó para medir el volumen desplazado de un cuerpo sumergido.

Cálculo de la densidad:

$$V_p = \rho_p * m_p \quad (3)$$

$$V_m = V_{m+p} - V_p \quad (4)$$

$$\rho_m = \frac{M_m}{V_m} \quad (5)$$

Donde:

V_p : Volumen desplazado por la parafina

ρ_p : Densidad de la parafina

m_p : Masa de la parafina

V_m : Volumen de madera

V_{m+p} : Volumen de madera + parafina

ρ_m : densidad de la madera ($g \cdot cm^{-3}$)

M_m : Masa de madera

Factor de forma de rebrotes

Este factor permite estimar volúmenes de madera con más precisión. El volumen total se define como la cantidad de madera estimada en metros cúbicos a partir del tocón hasta el ápice de un árbol. Para determinar el factor de forma se utilizó la ecuación de volumen de Smalian para un paraboloides (CARDER 2013) (ecuación 6).

$$V = \left(\frac{\pi}{4}\right) \times \left(\frac{D_1^2 + D_2^2}{2}\right) \times h \times F_f \quad (6)$$

Para determinar el factor de forma de un fuste cualquiera se realiza a través del volumen real del fuste y el de un sólido de igual base o diámetro (ecuación 7) (CARDER 2013), para el caso del café se determinó de la siguiente manera:

$$F_f = \frac{\text{Volumen real del rebrote}}{\text{Volumen del cilindro}} \quad (7)$$

$$F_f = \frac{\pi/4 \times \left(\frac{Dm^2 + dm^2}{2}\right) \times h + \pi/4 \times \left(\frac{Dm^2 + dm^2}{2}\right) \times h}{\pi/4 \times DAB^2 \times h}$$

Donde:

Dm^2 : Diámetro mayor al cuadrado

dm^2 : Diámetro menor al cuadrado

h : Altura

DAB : Diámetro a la altura de base.

Metodología estadística

Para el análisis e interpretación estadística de las variables cuantitativas se consideró la media, el coeficiente de variación, el P-Valor o significancia,

ANVA, R^2 y error. La interpretación del coeficiente de variación se hizo según Bonilla (1993). Las variables analizadas e interpretadas con el coeficiente de variación fueron el porcentaje de humedad de las secciones, factor de forma de los rebrotes y densidad específica de madera determinada a tocones y rebrotes.

Los análisis estadísticos de regresión se realizaron con el programa estadístico IBM SPSS® versión 23 y Excel® con el complemento estadístico XLSTAT® 2019, las variables analizadas fueron el diámetro de la base a 15 cm (DAB a 15 cm), altura de tocones (h_{to}), biomasa seca de tocones, altura total de rebrotes (h), biomasa seca de rebrotes (Incluyendo biomasa seca de hojas y bandolas) y diámetro de la base de los rebrotes (DAB).

La interpretación de los modelos de regresión se realizó mediante el coeficiente de correlación de Pearson en los que explica en una escala de 0 - 1, tanto en dirección positiva como negativa (Bonilla 1992). Un valor de 0 significa que no hay relación lineal entre las variables. Un valor de 1 o -1 indica una correlación positiva o negativa perfecta entre los valores, normalmente el valor se ubica entre 0 y 1 o entre -1 y 0 (Pacheco 1994).

Para verificar que las variables cumplan con una distribución normal o ideal teórica se utilizó el gráfico P-P normal. Es un método gráfico para el diagnóstico de diferencias entre la distribución de probabilidad de una población de la que se ha extraído una muestra aleatoria y una distribución usada para la comparación. Una forma básica de gráfico surge cuando la distribución para la comparación es una distribución teórica. Se grafican las funciones cuantiles muestrales versus los teóricos de la distribución normal, si el conjunto de datos es razonablemente normal los puntos del gráfico estarán sobre una recta.

Para los coeficientes de los modelos, se tomaron como significativos aquellos que su P-valor es mayor a 0.05 y la hipótesis alterna lo más cercano a 1×10^{-5} . Se realizó un análisis general de las variables para

todos los modelos de regresión, se combinaron variables y se hizo un análisis gráfico para identificar datos extremos y observar cual curva presenta un coeficiente “r” de Pearson y un R^2 mayor. Se dividió la variable de biomasa en dos (tocón y rebrotes), ya que no fue posible realizar en conjunto el análisis preciso para un solo modelo y obtener un R^2 significativo. Por lo tanto, se desarrollaron dos modelos alométricos de biomasa para las diferentes secciones.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Resumen de datos obtenidos por finca en estudio

En el cuadro 2, se detallan los resultados obtenidos en el muestreo de campo organizado por fincas. En total fueron 72 plantas: 26 en Finca San Antonio, 28 Finca Germania, 12 Finca Las nubes y 6 Finca el

Faro. También, se muestran los valores máximos y mínimos de las variables altura total promedio, altura promedio de tocón, promedio del diámetro a 15 cm de la base, altura promedio de rebrotes, promedio del diámetro de la base de rebrotes, toneladas de carbono y CO_2 fijado por hectárea, promedio de biomasa seca total y área por fincas.

Porcentaje de humedad por sección

Las hojas 64.51% de humedad, en ellas se produce el intercambio gaseoso y diferentes procesos bioquímicos y representa la parte turgente de la planta. Seguido de las bandolas con 45.98%, aquí desarrolla la floración y fructificación. Tallo con 43.19% en el que se presentan los tejidos conductores floema y xilema, tocón con 39.81 % y finalmente la raíz 39.08 % estos últimos tejidos leñosos (Figura 1).

Cuadro 2. Resultados obtenidos por finca.

Fincas	Código	n	Promedio de altura (m)	Altura promedio de tocón (m)	Promedio de diámetro de la base de tocón. (cm)	Promedio de altura rebrotes (m)	Diámetro de la base del rebrote (cm)	Biomasa Total (Kg)	Área (ha)
SAN ANTONIO	FSA	26	2.16	0.34	6.2	1.28	2.21	2.50	209
GERMANIA	FG	28	1.63	0.16	6.6	1.32	2.87	2.11	209
IAS NUBES	LN	12	2.25	0.33	6.0	1.21	1.89	1.73	419
EL FARO	FF	6	2.57	0.36	4.9	1.21	1.91	2.03	61.5
TOTAL		72							898.5

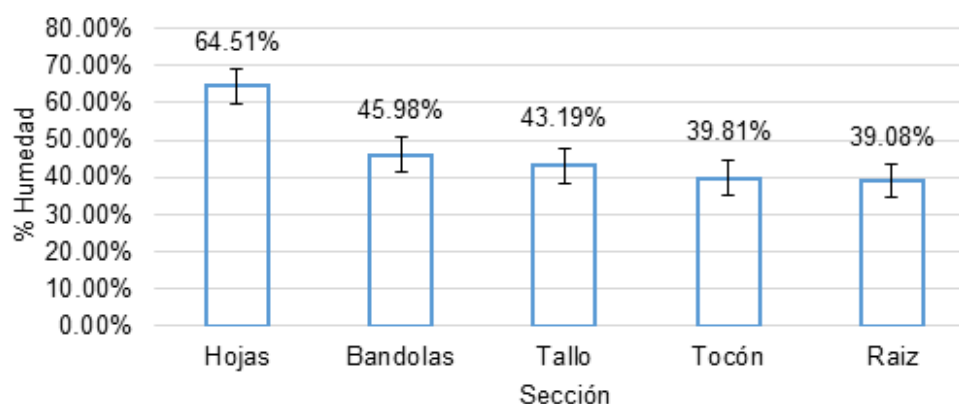


Figura 1. Porcentaje de humedad por sección.

El coeficiente de variación de la humedad por secciones se analizó según Bonilla (1993), para interpretar el grado de representatividad de la media aritmética para distintos coeficientes de variabilidad (cuadro 3), lo que indica que las medias son representativas de los datos y existe homogeneidad. Con estos porcentajes de humedad se estimó la biomasa seca total de cada sección de las plantas de café.

Biomasa seca por sección

Se determinó que la raíz representa un 32.93% de la biomasa seca total (figura 2). Castellanos *et al.* (2010) en el estudio de línea base de Carbono en cafetales realizado en Guatemala, registra que un 26.6% de la biomasa seca total lo representa la raíz. Esto representa una diferencia de 6.33%, con respecto a los datos obtenidos.

Cuadro 3. Medidas resumen para la humedad por sección.

Variable	n	Media	D. E.	CV	Mín.	Máx.
%H_Hojas	72	64.51	5.97	9.25*	41.50	75.40
%H_Bandolas	72	45.98	7.38	16.05**	23.90	57.95
%H_Tallo	72	43.19	5.90	13.67**	29.20	51.21
%H_Tocón	72	39.81	4.25	10.67**	25.26	55.09
%H_Raíz	72	39.08	10.20	26.11***	18.00	63.40

*Media altamente representativa (entre 0% y 10%).

**Media bastante representativa (entre 10% y 20%).

***Media tiene representatividad (entre 20% y 30%).

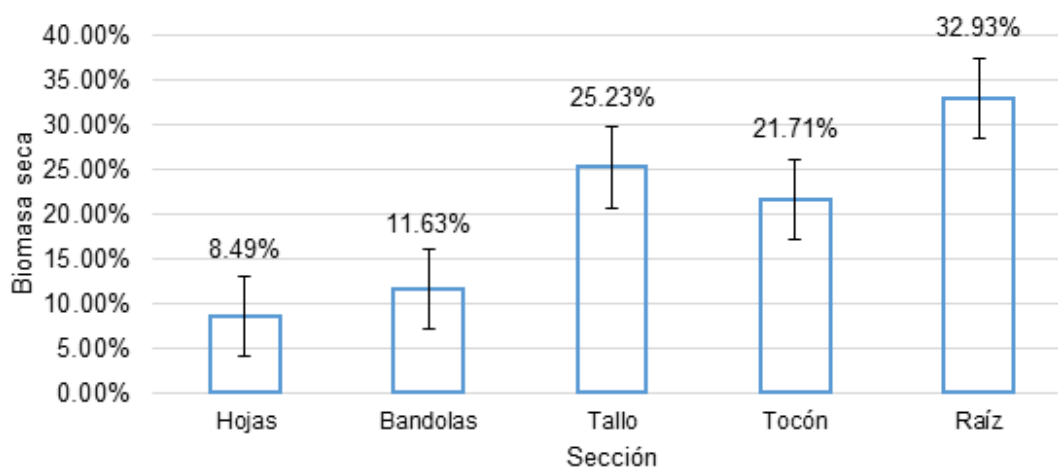


Figura 2. Porcentaje promedio de peso de biomasa por sección.

Carbono y dióxido de carbono fijado por sección.

El contenido promedio de carbono y dióxido de carbono fijado en las diferentes secciones de una planta de café expresado en porcentaje (Figura 3). Castellanos *et al.* 2010 reportan que el 21% de Carbono se fija en la raíz; mientras que en el presente estudio

se encontró un porcentaje de 33.11%, representando una diferencia de 12.10%, para carbono y dióxido de carbono. El carbono y el CO₂ se estimaron según el IPCC 2006. Las principales diferencias de contenido de carbono y CO₂ fijado se dan por el manejo agronómico, estado fenológico y la edad de las plantas.

Con el procesamiento total de las muestras de cada una de las plantas con sus diferentes resultados con base seca, se utiliza un factor de conversión que ha desarrollado el Panel Intergubernamental de expertos sobre el Cambio Climático (IPCC 2006) el cual afirma que la fracción de Carbono en la biomasa seca total es del 47 %. El resultado final se expresa en .

$$Kg/planta \text{ o } Tn \text{ ha}^{-1}.$$

Densidad de madera

El coeficiente de variación del factor de forma de rebrotes y de la densidad de específica de madera se analizó según Bonilla (1993) para interpretar el grado

de representatividad de la media aritmética para distintos coeficientes de variabilidad (cuadro A 1), lo que indica que las medias son representativas de los datos y existe homogeneidad. El factor de forma para rebrotes fue de 0.50, CARDER (2013) reporta que el factor de forma para un tallo con forma de paraboloide puede ser $0.74 \geq f \geq 0.40$, por tanto, el factor encontrado está dentro de este rango. En cuanto a la densidad específica de madera para café, MARN (2018) reporta un valor de 0.62 g cm^{-3} , el valor promedio determinado para rebrotes y tocón (cuadro 4) fue de 0.795 g cm^{-3} , existiendo una diferencia de 0.175 g cm^{-3} .

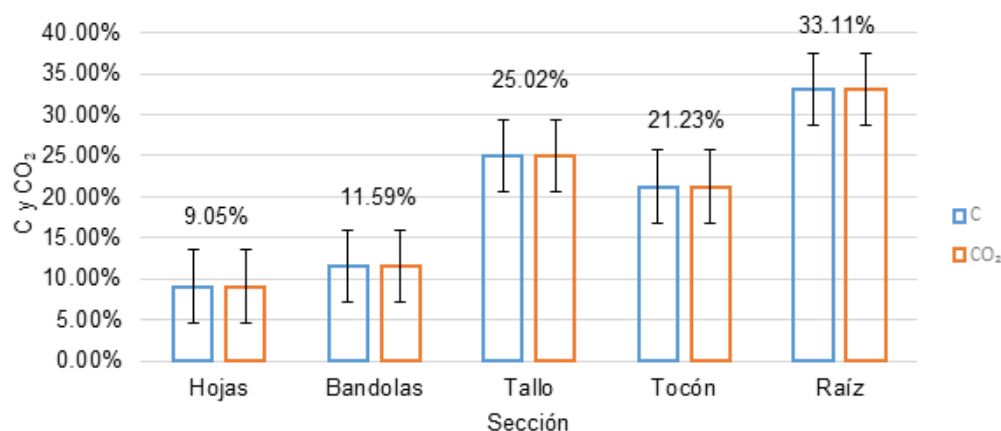


Figura 3. Porcentaje promedio de carbono y dióxido de carbono fijado por sección.

Cuadro 4. Resumen densidad de madera.

Variable	N	Media	D.E	E.R	CV	Mínimo	Máximo
Factor de forma	197	0.50	0.09	0.01	17.81**	0.34	0.81
$\rho_{\text{tallo}} \text{ g cm}^{-3}$	75	0.80	0.04	4.6E^{-03}	5.00*	0.70	0.88
$\rho_{\text{tocón}} \text{ g cm}^{-3}$	75	0.79	0.04	4.6E^{-03}	4.84*	0.63	0.90

*Media altamente representativa (entre 0% y 10%).

**Media bastante representativa (entre 10% y 20%).

Modelo alométrico para plantas de café de media altura

Se colectaron un total de 72 plantas de café, distribuidas en cuatro fincas cafetaleras de media altura. Todas las plantas evaluadas se encontraron en diferentes estados fenológicos, por lo que en el

análisis de regresión solo se incluyó la biomasa seca arriba del suelo en kilogramos del tocón, rebrotes, bandolas y hojas. La biomasa seca de raíz se incluyó como porcentaje de la biomasa seca total arriba del suelo. Por ser plantas recepadas no fue posible realizar un solo modelo alométrico. Razón por la

que se desarrollaron dos modelos; uno para tocón y otro para rebrotes, ambos incluyen la biomasa de bandolas y hojas.

Modelo alométrico para tocón

El modelo alométrico desarrollado para tocón, se realizó con la variable dependiente biomasa seca en kilogramos de 72 tocones y el producto de las variables regresoras: diámetro de la base a 15 cm elevado al cuadrado multiplicado por la altura de los tocones en metros. Gould (1979) citado por Picard *et al.* (2012) enfatiza en que los modelos utilizados que permiten hacer mejores estimaciones de biomasa seca son los modelos de potencia. Esto será el punto de partida para la exploración gráfica de los datos y selección del modelo que mejor se ajuste.

Con el software IBM SPSS® Statistics versión 23.0 2014 se realizó la exploración gráfica de los modelos de regresión. Se observó, que el modelo que mejor se ajustó es el de potencia. Por lo antes expuesto y los resultados obtenidos se eligió este modelo, ya que se conoce como una relación alométrica y es el que mayor R^2 presentó en la evaluación gráfica.

Castellanos *et al.* (2010) en el estudio de línea base de carbono en cafetales realizado en Guatemala, desarrolló un modelo de potencia con un coeficiente de determinación (R^2) de 0.70, que relaciona la biomasa seca en kilogramos con el producto del diámetro de la base a 15 cm elevado al cuadrado multiplicado por la altura de tocón en metros (figura 4) (ecuación 9).

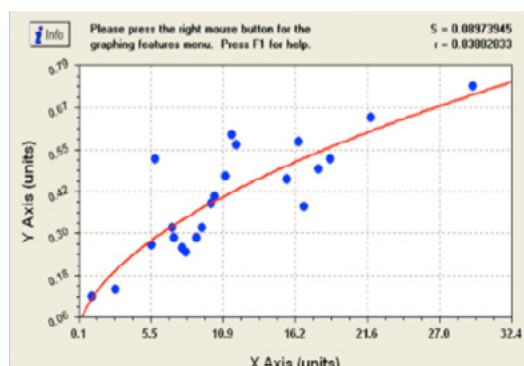


Figura 4. Análisis gráfico del modelo de potencia de Castellanos *et al.* (2010) para tocones.

Ecuación del modelo:

$$y = 0.1124X^{0.5435} \quad R^2 = 0.70 \quad (9)$$

El modelo alométrico de potencia desarrollado (figura 5) (ecuación 10), obtuvo un coeficiente de determinación (R^2) de 0.692, lo que significa que el modelo describe una proporción del 69.2% de la variación total observada de la variable dependiente explicada por el modelo, existiendo una diferencia de 0.008 %, con un nivel de significancia de 95%.

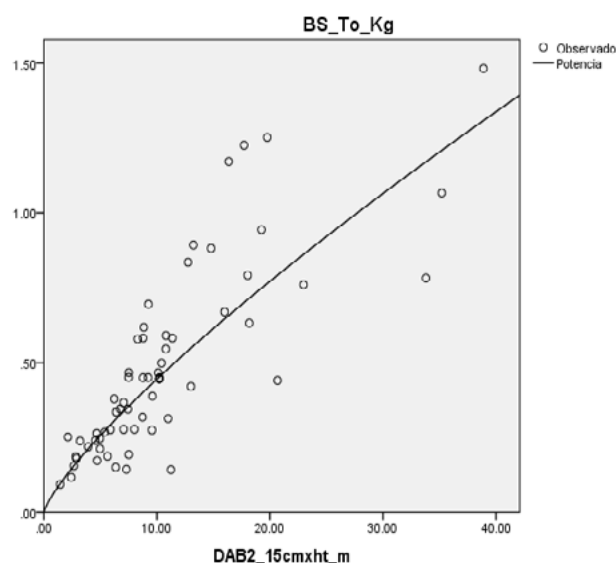


Figura 5. Relación de la biomasa seca de los tocones (eje Y) y el DAB2 a 15 cm * ht_m (eje X).

$$B_{tocón} = 0.071X^{0.794} \quad (10)$$

Donde:

$B_{tocón}$ = biomasa seca (Kg)

a: 0.071 (Constante)

X: $DAB^2_{15\text{ cm}} * ht_m$

b: 0.794 (Coeficiente de regresión)

El análisis de varianza indica que estadísticamente las constantes del modelo son significativas con un intervalo de confianza del 95%. Así mismo, se comprobó mediante la gráfica P-P normal que los datos de la variable independiente biomasa seca en kilogramos, cumplen con una distribución normal (figura 6).

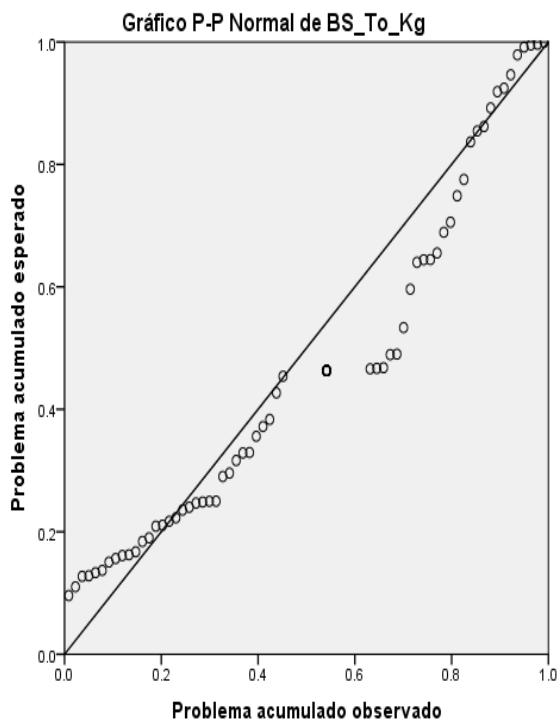


Figura 6. Prueba de normalidad de la variable independiente biomasa seca de tocones en kilogramos Gráfico P-P Normal.

Modelo alométrico para rebrotes

Para desarrollarlo, se utilizaron 196 datos de biomasa seca incluyendo la biomasa seca de bandolas y hojas en kilogramos como variable dependiente y el diámetro de la base de los rebrotes en centímetro como variable regresoras.

Se utilizó el software IBM SPSS® Statistics 23.0 versión 2014 para realizar la exploración gráfica de las pruebas de regresión con diferentes modelos. Se observó, que el modelo de potencia tiene mejor ajuste. Por lo antes expuesto y los resultados obtenidos, se eligió este modelo, ya que se conoce como una relación alométrica y es el que mayor R^2 presentó en la evaluación gráfica.

Castellanos *et al.* (2010) en el estudio de línea base de carbono en cafetales realizado en Guatemala, reporta un modelo de potencia para rebrotes con un coeficiente de determinación (R^2) de 0.63, que relaciona la biomasa seca de rebrotes en kilogramos con el diámetro a la base de los rebrotes (figura 7)

(ecuación 11).

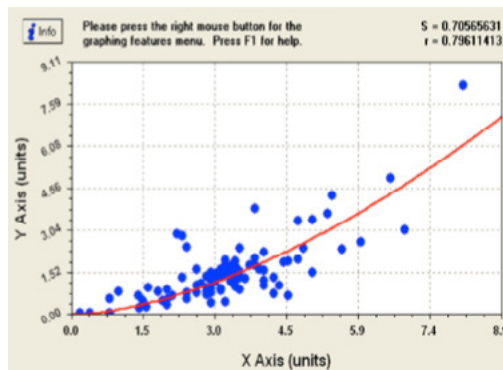


Figura 7. Análisis gráfico del modelo de potencia de castellanos et al (2010) para rebrotes.

Ecuación del modelo:

$$0.1955x^{1.648} \quad R^2 = 0.63 \quad (11)$$

El modelo alométrico de potencia desarrollado (figura 8) (ecuación 12), obtuvo un coeficiente de determinación (R^2) de 0.914. Significa que el modelo describe una proporción del 91.4% de la variación total observada en la variable dependiente explicada por el modelo, existiendo una diferencia de 0.284 con respecto al modelo para rebrotes de Castellanos *et al.* (2010). Con un nivel de significancia de 95%.

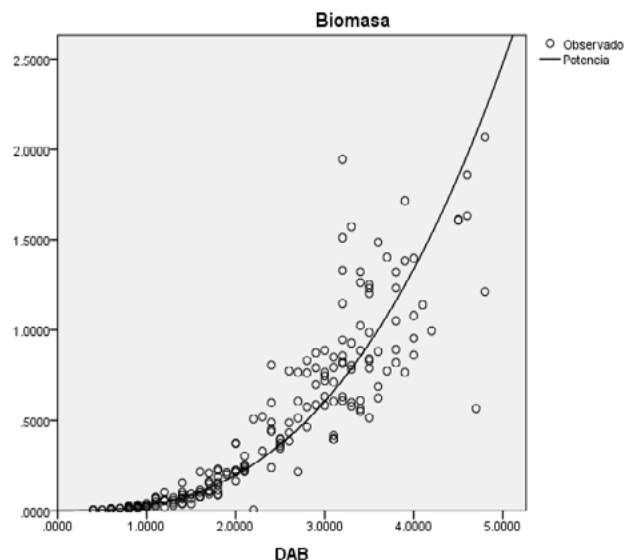


Figura 8. Relación de la biomasa seca de los rebrotes (eje Y) y el DAB en cm (eje X).

$$B_{\text{rebrotes}} = 0.029X^{2.758} \quad (12)$$

Donde:

$B_{rebotes}$ = biomasa seca (Kg)

a : 0.029 (Constante)

X : DAB_{cm}

b : 2.758 (Coeficiente de regresión)

El análisis de varianza indica que estadísticamente las constantes del modelo son significativas. Asimismo, se comprobó que los datos de la variable independiente biomasa seca de rebotes en kilogramos, tienen una distribución normal mediante la gráfica P-P normal (figura 9).

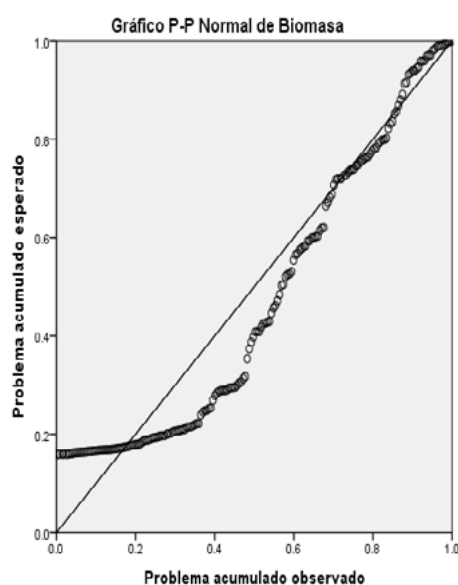


Figura 9. Prueba de normalidad de la variable independiente biomasa seca de rebotes en kilogramos
Gráfico P-P Normal.

Ecuación alométrica desarrollada para la estimación de biomasa y carbono en plantas de café

Para obtener la biomasa total de una planta de café (ecuación 13), se debe usar la ecuación (10) para tocón y la ecuación (12) para rebotes. El resultado de la combinación de los dos modelos anteriores se debe multiplicar por el porcentaje de biomasa seca correspondiente a raíz. Así mismo se determina el carbono y el CO_2 fijado como se muestra en las ecuaciones 14 y 15.

$$B_{total} = (0.071X^{0.794} + 0.029X^{2.758}) * 1.3293 \quad (13)$$

$$C_{ton/ha} = Biomasa_{total} * 0.47 \quad IPCC \ 2006 \quad (14)$$

$$CO_2_{ton/ha} = C * \left(\frac{44}{12}\right) \quad IPCC \ 2006 \quad (15)$$

Donde:

$$Biomasa_{total} = \left(\sum_{i=1}^n Biomasa_{tocón} + \sum_{i=1}^n Biomasa_{rebotes} \right) * \% \text{ de raíz}$$

0.47 = factor de conversión para pasar de biomasa a carbono.

$\frac{44}{12}$ = factor de conversión de carbono a dióxido de carbono.

La fracción de carbono de la materia seca (CF) se estima en un 47%. La conversión de carbono en bióxido de carbono se basa en la relación del peso de ratio de la molécula de (CO_2) (44/12) (IPCC 2006).

Estimación de carbono y CO_2 almacenado en las plantaciones de café de cuatro fincas de media altura de Comasagua

Con los valores promedio de las variables altura de tocón, diámetro a 15 centímetros de la base de tocón y diámetro de la base de rebotes (resumidos en el cuadro 2), se proyectaron las estimaciones de biomasa seca, carbono y CO_2 total fijado por finca. Se aplicó una densidad de siembra de 3,906 cafetos por hectárea, ya que durante la fase de campo se comprobó que el distanciamiento de siembra predominante fue de 1.60 m * 1.60 m. Con ello se obtuvo el resultado de los cuadros 5 y 6.

En cuanto al carbono y CO_2 fijado, el mayor promedio lo registró la Finca Las Nubes con 1,114.61/4,086.91 toneladas de C y CO_2 , y el menor la Finca el Faro con 155.30/569.45 toneladas de C y CO_2 fijado.

CONCLUSIONES

Se comprobó que las fincas cafetaleras de la zona de media altura de Comasagua, son de mucha variabilidad, en cuanto a las edades, variedades, el manejo y la producción. Por lo tanto, se mantuvo la disciplina del muestreo para reducir al máximo el error de las mediciones dasométricas, pesaje de las

Cuadro 5. Estimaciones de biomasa seca, carbono y CO₂ fijado arriba del suelo, por finca.

Finca	Densidad de siembra. (Plantas ha ⁻¹)	Biomasa tocón. (ton ha ⁻¹)	Carbono y CO ₂ fijado en tocón. (ton ha ⁻¹)	Biomasa rebrotes. (ton ha ⁻¹)	Carbono y CO ₂ fijado en rebrotes. (ton ha ⁻¹)
San Antonio	3,906	2.13	1.00/3.67	2.72	1.28/4.68
Germania	3,906	1.30	0.61/2.25	4.79	2.25/8.25
Las Nubes	3,906	1.98	0.93/3.41	2.28	1.07/3.93
El Faro	3,906	1.53	0.72/2.64	2.51	1.18/4.33

Cuadro 6. Estimaciones totales de biomasa seca, carbono y CO₂ fijado por finca.

Finca	Densidad de siembra. (Plantas ha ⁻¹)	Biomasa total. (ton ha ⁻¹)	Carbono y CO ₂ total fijado. (ton ha ⁻¹)	Área total por finca.	Biomasa total por finca. (ton)	Carbono y CO ₂ total fijado por finca. (ton)
San Antonio	3,906	6.44	3.03/11.10	209	1,346.52	632.86/2,320.50
Germania	3,906	8.10	3.81/13.95	209	1,692.10	795.29/2,916.05
Las Nubes	3,906	5.66	2.66/9.75	419	2,371.51	1,114.61/4,086.91
El Faro	3,906	5.37	2.53/9.26	61.5	330.44	155.30/569.45

secciones y en el procedimiento de preparación de muestras para el análisis de laboratorio.

Las metodologías de modelos alométricos desarrolladas por otros autores, sirvieron como base para la adaptación de la metodología del estudio. Esto permitió obtener resultados satisfactorios en el desarrollo de los modelos alométricos que estiman la biomasa seca y carbono de las plantas de café.

Con la información recolectada en campo, fue posible determinar otras variables relevantes que se relacionan con el estudio. Estos resultados son la determinación del contenido de carbono y CO₂ de las plantas a través de los modelos desarrollados, el factor de forma para rebrotes y la densidad específica de madera determinada para tocones y rebrotes.

Para la determinación de la biomasa de tocones, se utilizó la relación del diámetro de la base a 15 centímetros elevado al cuadrado, multiplicado por la altura en metros. Los resultados son más certeros, si

los valores calculados son menores a 20 unidades. Y en el caso de los rebrotes si los diámetros de las bases son menores a 3.5 cm.

AGRADECIMIENTOS

Agradecemos a la Facultad de Ciencias Agronómicas de la Universidad de El Salvador, al Consejo Salvadoreño del Café y a la Unidad Ambiental de la Alcaldía de Comasagua, por haber desempeñado un papel fundamental en el desarrollo y ejecución de la investigación.

BIBLIOGRAFÍAS

- Andrade, HJ; Segura, M. 2008. ¿Cómo construir modelos alométricos de volumen, biomasa o Carbono de especies leñosas perennes?: determinación del tamaño de la muestra. Costa Rica, CATIE. 8 p.
- Arévalo Beltrán, MA; Méndez Alfaro, DC. 2011. Análisis multitemporal de las zonas cafetaleras de El Salvador y su impacto en el desarrollo

- socioeconómico. Tesis Ing. Agro. San Salvador, El Salvador. UES. 165 p.
- Azcón-Bieto, J; Talón, M. 2000. Fundamentos de fisiología vegetal. Barcelona, España. McGraw-Hill. 522 p.
- Benavides Ballesteros, HO; León Aristizábal, GE. 2007. Información técnica sobre gases de efecto invernadero y el cambio climático. Bogotá, Colombia. Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales-IDEAM. 102 p.
- Bonilla, G. 1992. Estadística II: métodos prácticos de inferencia estadística. 2ª. Ed. San Salvador. El Salvador. UCA editores 90-92 p.
- Bonilla, G. 1993. Estadística I Elementos de estadística descriptiva y probabilidad: coeficiente de variación, UCA editores, El Salvador. 215 p.
- CARDER (Corporación Autónoma Regional del Risaralda, Colombia). 2013. Guía de cubicación de madera (en línea). Consultado feb. 2020. Disponible en http://www.rivasdaniel.com/pdf/GUIA_DE_CUBICACION_MADERA.pdf
- Castellanos, E; Quilo, A; Pons, D. 2010. Estudio de línea base de carbono en cafetales: resumen. Guatemala. UVG. 48 p.
- CSC (Consejo Salvadoreño del Café). 2017. Variedades cultivadas en El Salvador (en línea, sitio web). Consultado 12 may. 2015. Disponible en <http://www.csc.gob.sv/variedades/>
- Cuenca, ME; Jadán, O; Cueva, K; Aguirre, C. 2014. Carbono y ecuaciones alométricas para grupos de especies y bosque de tierras bajas, Amazonía Ecuatoriana. Revista CEDAMAZ. 4(1):21-31 p.
- Filho, EMV; Abarca Monge, S. 2008. Cafetales para servicios ecosistémicos, con énfasis en el potencial de sumideros de Carbono: El caso de cooperativas cafetaleras afiliadas a COOCAFE. Informe final. Costa Rica. 61 p. CATIE-FUNCAFOR-COOCAFE-OIKOCREDIT.
- IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change). 2006. Guidelines for National Inventories of Greenhouse Gases Agriculture, forestry and other land uses (en línea). Consultado 10 ene. 2020. Disponible en <https://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2006gl/spanish/vol4.html>
- MARN (Ministerio de Medio Ambiente y Recursos Naturales, El Salvador). 2018. Inventario Nacional de Bosques de El Salvador. San Salvador, El Salvador. 426 p.
- Pacheco, RG. 1994. Estadística II: aplicada. San Salvador, El Salvador. 2 ed. Star Print. 269 p.
- Panshin, AJ; De Zeeuw, C. 1970. Textbook of wood technology. Structure, Identification, Defects, and uses of the commercial woods of the United States. New York, US, McGraw-Hill. V 1. 705 p.
- Picard, N; Saint-André, L; 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. Las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura y el Centre de Coopération Internationale en Recherche Agronomique pour le Développement, Rome, Montpellier, 213 p.
- Rügnitz, MT; Chacón, ML; Porro R. 2009. Guía para la Determinación de Carbono en Pequeñas Propiedades Rurales. Lima, Perú. ICRAF-Consorcio Iniciativa Amazónica. 79 p.
- Ruiz Díaz, C; Rodríguez Ortiz, G; Leyva López, JC; Enríquez del Valle, JR. 2014. Metodologías para estimar biomasa y Carbono en especies forestales de México. Revista Naturaleza y desarrollo. 12(1):28-44 p.
- Sola, G; Picard, N; Saint-André, L; Henry, M. 2012. Resumen del manual de construcción de ecuaciones alométricas para estimar el volumen y la biomasa de los árboles: del trabajo de campo a la predicción. Las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura y el Centre de Coopération Internationale en Recherche Agronomique pour le Développement, Rome, Montpellier, 17 p.
- Solano, D; Vega, C; Eras, VH; Cueva, K. 2014. Generación de modelos alométricos para determinar biomasa aérea a nivel de especies, mediante el método destructivo de baja intensidad para el estrato de bosque seco pluviestacional del Ecuador. Revista CEDAMAZ. 4(1):32-44 p.