

UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR  
FACULTAD DE CIENCIAS AGRONÓMICAS



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.

Por:

Br. Marroquín Castro, Rafael Arturo  
Br. Sánchez Hernández, José Arnoldo  
Br. Urías Fernández, Rigoberto Antonio

Ciudad Universitaria, septiembre de 2020.



UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR  
FACULTAD DE CIENCIAS AGRONÓMICAS



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.

Por:

Br. Marroquín Castro, Rafael Arturo  
Br. Sánchez Hernández, José Arnoldo  
Br. Urías Fernández, Rigoberto Antonio

Ciudad Universitaria, septiembre de 2020.

**UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR**  
**FACULTAD DE CIENCIAS AGRONÓMICAS**  
**DEPARTAMENTO DE RECURSOS NATURALES Y MEDIO AMBIENTE**



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.

Por:

Br. Marroquín Castro, Rafael Arturo  
Br. Sánchez Hernández, José Arnoldo  
Br. Urías Fernández, Rigoberto Antonio

Requisito para optar al título de:  
Ingeniero Agrónomo

Ciudad Universitaria, septiembre de 2020.

**UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR**

**Rector:**

Lic. M. Sc. Roger Armando Arias Alvarado

**Secretario general:**

M. Sc. Francisco Antonio Alarcón Sandoval

**FACULTAD DE CIENCIAS AGRONOMICAS**

**Decano:**

Dr. Francisco Lara Ascencio

**Secretario:**

Ing. Agr. Balmore Martínez Sierra

**Jefe del Departamento de Recursos Naturales y Medio Ambiente**

---

Ing. Agr. M. Sc. José Mauricio Tejada Ascencio

**Docentes directores**

---

Ing. Agr. M. Sc. Juan Rosa Quintanilla Quintanilla

---

Licda. M. Sc. Ada Yanira Arias de Linares.

---

Lic. Daniel de Jesús Palacios Hernández

**Coordinador general de procesos de graduación**

---

Ing. Agr. MAECE. Nelson Bernabé Granados Alvarado

## Resumen

La investigación, se realizó en cuatro fincas del municipio de Comasagua, departamento de La Libertad, en la zona de media altura de los 800 a 1,200 metros sobre el nivel del mar; durante el periodo de agosto de 2018 a febrero 2020. El objetivo principal fue desarrollar una ecuación alométrica para estimar la biomasa y el carbono de las plantas de café. El método aplicado fue el destructivo para realizar el levantamiento de información de campo; 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, Universidad de El Salvador.

El registro y manejo de datos dasométricos y de laboratorio, se realizó en la aplicación Open Data Kit® (ODK®), en esta se diseñó 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. Para el análisis de laboratorio se tomó una sub muestra de cada sección para determinar la humedad parcial, y densidad específica de madera para tocón y rebrotes.

El análisis estadístico se realizó en el software IBM SPSS® Statistics 23 y Excel® con el complemento estadístico XLSTAT® 2019. Se realizaron diferentes pruebas para comprobar la normalidad de las variables. Mediante análisis de regresión se desarrollaron diferentes análisis combinando la variable dependiente e independiente, hasta lograr un modelo que se ajuste o describa el 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 fueron 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 y 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  $R^2 = 0.692$  y un P-valor igual a  $10 \times 10^{-5}$ . El de rebrotes con un  $R^2 = 0.914$  y un P-Valor igual a  $10 \times 10^{-5}$  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<sub>2</sub> fijado.

## Summary

The investigation was carried out in four farms in the municipality of Comasagua, department of La Libertad, in the mid-altitude area of 800 to 1,200 meters above sea level; during the period from august 2018 to february 2020. The main objective was to develop an allometric equation to estimate the biomass and carbon of coffee plants. The applied method was the destructive one to carry out the field information survey; this consisted of sectioning each of the 72 shrubs into their main parts: root, stump, sprouts, bandolas, leaves, flowers and fruits, according to their phenology. The analyzes of partial humidity and specific wood density were carried out in the Agricultural Chemistry Laboratory and the Soil Laboratory of the Faculty of Agronomic Sciences, University of El Salvador.

The registration and management of dasometric and laboratory data was carried out in the Open Data Kit® (ODK®) application, in which a form was designed to record the variables: total height of the plant, height of sprouts, stump height, diameter a 15 centimeters from the stump, diameter at the base of the shoots, wet weight and dry weight of the sections. For the laboratory analysis, a sub-sample was taken from each section to determine the partial humidity, and specific wood density for stumps and sprouts.

The statistical analysis was performed in the IBM SPSS® Statistics 23 software and Excel® with the statistical complement XLSTAT® 2019. Different tests were performed to verify the normality of the variables. Through regression analysis, different analyzes were developed combining the dependent and independent variable, until a model was achieved that fits or describes the phenomenon studied.

The above-ground dry biomass is composed of the stump plus sprouts, bandolas, leaves, flowers and fruits. The dependent variable in the model for stump was the dry biomass in kilograms and the independent variables were the diameter at 15 centimeters from the base and the height in meters; for the sprout model, the variables of sprout dry biomass plus bandolas and leaves were related in kilograms and the diameter of the base in centimeter.

As a result, two power regression models were obtained: the stump one with  $R^2 = 0.692$  and a P-value equal to  $10 \times 10^{-5}$ . The one of regrowth with an  $R^2 = 0.914$  and a P-Value equal to  $10 \times 10^{-5}$ . This by verifying the regression graph and the summary of fit of the models.

Key words: Allometric equation, coffee, biomass, carbon, gravimetric density, allometric model, form factor, fixed carbon, fixed CO<sub>2</sub>.



## Agradecimientos

Todo se lo agradezco a Dios y a Mi Madre Luz María Castro, por toda la sabiduría y bendiciones recibidas a lo largo de mi vida que me han permitido llegar hasta el cierre de mi carrera, aconsejándome y siendo un apoyo fundamental que ha hecho desarrollarme en el ámbito personal y profesional.

Agradecer encarecidamente a mis asesores Lic. Daniel de Jesús Palacios Hernández, Licda. M. Sc. Ada Yanira Arias de Linares e Ing. Agr. M. Sc. Juan Rosa Quintanilla Quintanilla, por apoyar y comprometerse con este proceso de enseñanza, dando aportes y consejos invaluable que servirán para toda mi vida.

Al personal docente del departamento de Recursos Naturales y Medio Ambiente y al de Química Agrícola, de la Facultad de Ciencias Agronómicas, en especial a el Ing. Agr. M. Sc. José Mauricio Tejada Ascencio, Ing. Agr. Sabas Alberto Argueta Palacios, Ing. Agr. Juan Gerardo Marroquín Reina, los cuales nos han ayudado en el proceso facilitando los recursos necesarios para llevar acabo los procesos.

Personal que labora en el Consejo Salvadoreño del Café, ya que son ellos los facilitaron el recurso de transporte y la entrada a las diferentes fincas cafetales de la zona de Comasagua, en especial al Ing. Agr. Rigoberto Martínez, Ing. Agr. Vanesa García e Ing. Agr. Sara Cortez, ya que sin ellos esto no sería posible.

A mis amigos dentro de la Universidad, Lidia Maribel, Ing. Agr. Gabriela Emily, Ing. Agr. Patricia Judith, Ing. Agr. Rodd Alberto, Ing. Agr. Juan Carlos, Ing. Agr. Luis Miguel e Ing. Agr. Oscar Gracias y fuera de la Universidad Lic. Alexander Medina, Guillermo Hernández, Omar Benítez, Eduardo Avelar, Miguel Rolando, Lic. Lucrecia Figueroa Y Lic. Patricia Ramírez; que en alguna medida intervinieron y ayudaron a formar la persona que soy en el presente.

Personas que le tengo un gran cariño que forman parte de la Facultad Ing. Agr. Elizabeth De Sánchez y PhD. Miguel Hernández.

Las personas con las que inicie esta investigación que por diferentes motivos no pudieron continuar que aprecio mucho, ya que fueron los que nos ayudaron a formular la idea y los alcances de este estudio PhD. Reynaldo Landaverde e Ing. Agr. Rafael Paniagua los cuales tuvieron la paciencia de instruirnos y ser grandes consejeros en la carrera los cuales son

ejemplos de persona a seguir y algún día poder ser comparado con ellos. Y al Ministerio de Medio Ambiente y Recursos Naturales que con ellos iniciamos esta iniciativa.

A los productores de las diferentes fincas que visitamos, San Antonio, Germania, Las Nubes y El Faro. Ya que sin productores como ellos esta investigación no tendría razón de existir.

A la Universidad de El Salvador ya que nos dio todo lo necesario al abrimos las puertas y permitir desarrollarme y convertirme en un profesional de las Ciencias Agrícolas. Y por los diferentes programas de apoyo que posee como lo es el programa de Becas UESE del que fui parte y me ayudo económicamente.

Y finalmente a mis compañeros de tesis con los cuales presentamos esta investigación.

Marroquín Castro, Rafael Arturo.

## Agradecimientos

A Dios, por permitirme concluir una etapa más en mi vida.

A la Universidad de El Salvador a través de la Unidad de Estudios Socio Económicos (UESE) por darme la oportunidad de ser parte del programa de joven becarios.

A mi papá Omar Sánchez por estar siempre apoyándome incondicionalmente desde los inicios de mis estudios.

A mi esposa Gabriela Salazar por creer en mí y estar en todo momento.

Al Dr. Reynaldo López Landaverde por su ayuda invaluable como guía en cada una de las fases de este trabajo.

A los docentes directores por su tiempo y dedicación en cada asesoría para que esté trabajo realizara.

A la directora Lily Pacas del Consejo Salvadoreño del Café (CSC) por asignar al Ing. Agr. Rigoberto Martínez, Ing. Agr. Vanesa García e Ing. Agr. Sara Cortez, para la gestión de transporte institucional y acompañamiento a la zona de estudio para desarrollar la fase de campo en el municipio de Comasagua, La Libertad.

A los propietarios y las personas que laboran en la Cooperativa San Antonio, Cooperativa Santa Adelaida, Finca Las Nubes, Finca 3 de mayo y Cooperativa El Faro 2, para que la fase de campo se realizará.

A todos mis amigos que de alguna u otra forma estuvieron apoyándome, infinitas gracias.

Sánchez Hernández, José Arnoldo.

## Agradecimientos

Agradezco a Dios, pues es el hechor y consumidor de todas las cosas.

A mis padres Rigoberto Urías Rodríguez y María Lilian Fernández, por todo su apoyo brindado durante este proceso y por los consejos que han servido para hacer las cosas correctas. Siendo la base fundamental para mi preparación como persona.

Agradecer a mis hermanos, Mirna Urías, Yorlenis Urías, Ever Urías, Roberto Urías, Margarita Fernández, Héctor Urías y Kenia Urías, por su apoyo incondicional en este proceso de preparación. Así mismo agradezco de manera muy especial a mi tío Santos Rodríguez, por apoyarme durante la carrera.

A mi esposa Marcela Avalos, don Roni Madariaga e Irma Arely Avalos, por todo su apoyo y comprensión brindada durante este proceso.

Agradecer de una manera muy encarecida a mis asesores Ing. Agr. M. Sc. Juan Rosa Quintanilla Quintanilla, Lic. Daniel de Jesús Palacios Hernández y Licda. M. Sc. Ada Yanira Arias de Linares, por el compromiso que adquirieron durante el proceso de enseñanza, dando las orientaciones académicas oportunas para el buen desarrollo de las actividades de la investigación.

Al personal del Departamento de recursos Naturales Medio Ambiente Ing. Agr. M. Sc. José Mauricio Tejada Ascencio, Ing. Agr. Sabas Alberto Argueta Palacios y al de Química Agrícola, Lic. Fredy Carranza. Los cuales facilitaron los recursos necesarios para llevar a cabo los procesos de análisis y toma de datos.

Al Dr. Reynaldo Alberto López Landaverde, Ing. Agr. Nelson Bernabé Granados Alvarado, Ing. Agr. Carlos Armando Villalta, Ing. Agr. Alirio Sandoval, Ing. Agr. Luis Fernando Castaneda y al Dr. Miguel Hernández, por el apoyo que me han brindado durante todo mi proceso de formación profesional.

A la Sra. Luz María Castro, por todo su apoyo y consejos brindados durante el desarrollo de la investigación. Sin duda serán útiles para toda la vida.

A mis amigos dentro de la Universidad, Ing. Agr. Geovany Castillo, Ing. Agr. Edgar Reyes, Ing. Agr. Ever Martínez Ing. Agr. Rodd Alberto, Ing. Agr. Juan Carlos, Ing. Agr. Luis Miguel, Ing. Agr. Oscar Gracias y Jacky Serrano. Fuera de la Universidad Das. Amílcar López, Das. Héctor

Días e Ing. Constan Amurrio García, que de alguna manera apoyaron con sus conocimientos para la elaboración de la investigación.

A los productores cafetaleros de las fincas San Antonio, Germania, Santa Adelaida y el Faro. Por su valioso aporte en la investigación, otorgando los permisos para ingresar y las plantas de café.

A Lyli Pacas, Directora Consejo Salvadoreño del Café y al personal de la Unidad de Medio Ambiente del en especial al Ing. Agr. Rigoberto Martínez, Ing. Agr. Vanesa García e Ing. Agr. Sara Cortez, por el apoyo en la gestión de recursos y acompañamiento durante la ejecución de la fase de campo. Al coordinador de la Unidad Ambiental de la Alcaldía Municipal de Comasagua, Sr. Armando Monterrosa.

A las autoridades de la Facultad de Ciencias Agronómicas y a la Asociación de Estudiantes de Ciencias Agronómicas “Carlos Borromeo Najarro”, por su apoyo.

A mi Alma Mater, por abrir sus puertas y permitir desarrollarme en el área académica y política, haciendo de mí un profesional de las ciencias agropecuarias con ética y valores.

Y finalmente agradezco a mis compañeros de tesis José Arnoldo Sánchez Hernández y Rafael Arturo Marroquín Castro, con los cuales presentamos satisfactoriamente esta investigación.

Urías Fernández, Rigoberto Antonio.

## Dedicatoria.

A mí Madre Luz María Castro, a mí Abuelo Gonzalo Castro Sánchez y a Dios todo poderoso por mantenerme en el sendero del bien ya que han sido la guía para desarrollar el potencial que se me ha dado, la paciencia de enseñarme las cosas esenciales de la vida, por las cuales no estaría en este momento especial terminar mi carrera de ingeniería Agronómica.

Todos aquellos que me apoyaron en los momentos difíciles y me brindaron ánimos para continuar. Por hacer la lucha hasta el último instante de que yo pudiera culminar mis estudios y soportar malos momentos hasta obtener la meta.

A mi Hermana Karla Patricia Marroquín Castro por apoyarme hasta el final y siempre cuidarme.

A mis otros dos hermanos Francisco Orlando Guzmán Castro y Tania Vanesa Guzmán Castro.

A mis compañeros de toda la carrera con los cuales compartimos muchos buenos momentos en cada una de las salidas que realizamos en las diferentes materias. En este viaje para cumplir un sueño.

A la Universidad de El Salvador por darme la oportunidad de estudiar en tan prestigiosa institución y poder convertirme en un profesional de las Ciencias Agrícolas.

A mis asesores por la dedicación, tiempo, consejos y por compartir sus conocimientos, y sobre todo por el apoyo brindado durante el proceso del proyecto de investigación.

Marroquín Castro, Rafael Arturo.

## Dedicatoria

A Dios, por darme la vida y cuidarme siempre en todo momento.

A mi hija Sophia Sánchez y esposa Gabriela Salazar por su comprensión, apoyo moral, y económico.

A mi abuelita Gudelia Sánchez Salvador que desde el cielo siempre me guío.

A mis padres Omar Sánchez y Guadalupe Hernández que creyeron en mí.

A la Universidad de El Salvador por darme le dicha de estudiar y ser un profesional.

Sánchez Hernández, José Arnoldo.

## Dedicatoria

A mis padres Rigoberto Urías Rodríguez y María Lilian Fernández, por darme ánimo y seguridad para yo poder terminar esta etapa de mi vida.

A mi abuela Sara Urías (Q. E. P. D) y mi abuelo Francisco Rodríguez (Q. E. P. D), por enseñarme el significado de la humildad y ayudar a los demás.

A mi tío Santos Rodríguez con mucho cariño, por apoyarme en este sueño.

A mi hija Sara Belén Urías y a mi esposa Marcela Ivania Avalos.

A mi hermana Mirna Liliana, por siempre estar en todo momento conmigo y mostrarme un gran cariño.

A mis otros hermanos Yorlenis Urías, Ever Urías, Roberto Urías, Margarita Fernández, Héctor Urías y Kenia Urías, por su apoyo incondicional.

A mis asesores por compartir sus conocimientos y su dedicación durante el desarrollo de la investigación.

A los del Consejo Salvadoreño del Café (CSC) por todo el apoyo brindado, esperando esta sea una herramienta de mucha utilidad en sus proyectos.

A todos los que en algún momento contribuyeron con este sueño y dieron sus aportes para poder llegar a la meta.

A la Universidad de El Salvador por darme la oportunidad de estudiar en tan prestigiosa casa de estudio y poder convertirme en un profesional de las Ciencias Agronómicas.

Urías Fernández, Rigoberto Antonio.



## Índice General.

1.	Introducción .....	1
2.	Revisión Bibliográfica.....	2
2.1	Agenda 2030 sobre el desarrollo sostenible .....	2
2.2	El Café en El Salvador.....	3
2.2.1	Origen y distribución. ....	3
2.2.2	Zonificación del café en El Salvador. ....	3
2.2.3	Variedades de café cultivadas en El Salvador. ....	4
2.2.4	Descripción taxonómica.....	4
2.2.5	Descripción botánica. ....	4
2.2.6	Densidad específica de madera de plantas de café .....	5
2.2.7	Importancia del sistema de bosque de café.....	6
2.2.8	Importancia socioeconómica. ....	6
2.3	El sistema climático. ....	7
2.3.1	Efecto invernadero.....	7
2.3.2	Cambio climático y calentamiento global. ....	8
2.3.3	Ciclo de carbono.....	8
2.3.4	Flujo de carbono en las plantas. ....	9
2.3.5	Las plantas y el proceso de fotosíntesis. ....	9
2.4	Órgano vegetal especializado en realizar la fotosíntesis.....	10
2.4.1	El cloroplasto y el aparato fotosintético.....	11
2.5	Fotólisis del agua.....	12
2.6	Asimilación y fijación de CO <sub>2</sub> por las plantas. ....	12
2.7	La célula vegetal.....	13
2.7.1	Estructura de la pared celular. ....	13
2.7.2	Las hemicelulosas. ....	14
2.7.3	Las pectinas. ....	15

2.7.4	Proteínas estructurales y diversidad de enzimas asociadas a las paredes. ....	15
2.7.5	Síntesis y diferenciación de tejidos. ....	15
2.8	Inventarios de carbono en Cafetales. ....	16
2.9	Aplicaciones de principios de dasonomía, para el desarrollo de modelos alométricos. ....	16
2.10	Modelos alométricos. ....	16
2.10.1	Desarrollo de modelos alométricos de biomasa. ....	17
2.10.2	Determinación de muestras. ....	17
2.11	Regresión lineal. ....	18
2.11.1	Ajuste de la recta por mínimos cuadrados. ....	18
2.11.2	Coeficiente de correlación lineal de Pearson y coeficiente de determinación $R^2$ . ....	19
2.12	Sistemas de información geográfica (SIG), como herramienta para la planificación y elaboración de inventarios forestales. ....	21
3.	Materiales y métodos. ....	22
3.1	Ubicación espacial. ....	22
3.2	Caracterización climática. ....	22
3.3	Metodología de campo. ....	23
3.4	Desarrollo de modelos alométricos. ....	29
3.4.1	Definición de ecosistema. ....	29
3.4.2	Determinación del tamaño de muestra. ....	29
3.4.3	Selección de individuos por muestreo. ....	29
3.4.4	Medición, corte y estimación de biomasa por árbol. ....	29
3.5	Metodología de laboratorio. ....	30
3.5.1	Determinación de humedad parcial. ....	30
3.5.2	Densidad de madera. ....	32
3.6	Factor de forma de rebrotes. ....	33
3.7	Metodología estadística. ....	34

4.	Resultados y discusión. ....	36
4.1	Resumen de datos obtenidos por finca en estudio.....	36
4.2	Porcentaje de humedad por sección.....	36
4.3	Biomasa seca por sección. ....	38
4.4	Carbono y dióxido de carbono fijado por sección.....	38
4.5	Densidad de madera. ....	39
4.6	Modelo alométrico para plantas de café de media altura. ....	40
4.6.1	Modelo alométrico para tocón.....	40
4.6.2	Modelo alométrico para rebrotes. ....	43
4.7	Ecuación alométrica desarrollada para la estimación de biomasa y carbono en plantas de café.....	45
4.8	Estimación de carbono y CO <sub>2</sub> almacenado en las plantaciones de café de cuatro fincas de media altura de Comasagua. ....	46
5.	Conclusiones. ....	48
6.	Recomendaciones. ....	49
7.	Bibliografía.....	50
8.	Anexos ....	56
8.1	Figuras. ....	56
8.2	Cuadros.....	57

## Índice de Cuadros.

Cuadro 1. Objetivos de desarrollo sostenible relacionados con el estudio. ....	2
Cuadro 2. Ejemplo de codificación de árboles en finca. ....	24
Cuadro 3. Codificación de las sub muestras de un arbusto de café por sección. ....	30
Cuadro 4. Resumen de datos obtenidos por finca. ....	36
Cuadro 5. Medidas resumen para la humedad por sección. ....	37
Cuadro 6. Resumen densidad de madera.....	39
Cuadro 7. Estimaciones de biomasa seca, carbono y CO2 fijado arriba del suelo, por finca.	46
Cuadro 8. Estimaciones totales de biomasa seca, carbono y CO2 fijado por finca. ....	47

## Índice de Figuras.

Figura 1. Espectro de onda electromagnética indicando la escala de longitud de onda. <b>Fuente:</b> tomado de Gonzáles y Raisman 2000.....	10
Figura 2. Estructuras vegetales que contienen el aparato fotosintético: hojas, tejido foliar (corte de hoja), cloroplastos, y tilacoides. <b>Fuente:</b> tomado de, De las Rivas 2000. ....	11
Figura 3. Complejos fotosintéticos: antena II y fotosistema II, complejo citocromo b6f, antena I y fotosistema I, y ATPasa. <b>Fuente:</b> tomado de, De las Rivas 2000.....	12
Figura 4. Representación esquemática de la estructura de la pared celular primaria de una dicotiledónea. <b>Fuente:</b> tomado de Revilla y Zarra 2000.....	14
Figura 5. Mapa de localización de zona de estudio, Cordillera del Bálsamo, municipio de Comasagua, departamento de La Libertad. ....	22
Figura 6. Vista paisajística Finca San Antonio del municipio de Comasagua. ....	23
Figura 7. Descripción del terreno medición de pendiente.....	24
Figura 8. Registro de códigos, coordenadas y otros datos en la plataforma digital Open Data Kit (ODK) .....	25
Figura 9. Plantas de café seleccionadas como muestras.....	25
Figura 10. Medición y registro de variables dasométricas en plantas de café. ....	26
Figura 11. Seccionamiento y preparación de muestras.....	26

Figura 12. Preparación de área alrededor de la raíz de la planta de café .....	27
Figura 13. Seccionamiento y almacenamiento de muestras. ....	27
Figura 14. Almacenaje y transporte de muestras. ....	28
Figura 15. Muestras de cada una de las secciones. ....	28
Figura 16. Muestra para determinar porcentaje de humedad.....	31
Figura 17. Horno utilizado para determinación de humedad parcial.....	31
Figura 18. Materiales utilizados para determinar densidad de madera en rebrotes y tocones. .....	33
Figura 19. Porcentaje de humedad por sección. ....	37
Figura 20. Porcentaje promedio de peso de biomasa por sección. ....	38
Figura 21. Porcentaje promedio de carbono y dióxido de carbono fijado por sección. ....	39
Figura 22. Análisis grafico del modelo de potencia de Castellanos <i>et al.</i> (2010) para tocones. .....	41
Figura 23. Relación de la biomasa seca de los tocones (eje Y) y el $DAB^2 a 15\text{ cm} * ht_m$ (eje X).....	41
Figura 24. Prueba de normalidad de la variable independiente biomasa seca de tocones en kilogramos. Gráfico P-P Normal.....	42
Figura 25. Análisis grafico del modelo de potencia de Castellanos <i>et al.</i> (2010) para rebrotes. .....	43
Figura 26. Relación de la biomasa seca de los rebrotes (eje Y) y el DAB en cm (Eje X).....	44
Figura 27. Prueba de normalidad de la variable independiente biomasa seca de rebrotes en kilogramos. Grafico P-P Normal.....	45

## **Anexos.**

### **Figuras.**

Figura A 1. Secuencia de muestreo aplicando el método destructivo en plantas de café.....	56
Figura A 2. Análisis general de las regresiones que mejor se ajustan al modelo, relacionando biomasa seca de tocones y el producto del DAB2 a 15 cm multiplicado por la altura de tones. .....	56
Figura A 3. Análisis general de las regresiones que mejor se ajustan al modelo, relacionando biomasa seca de rebrotes y diámetro de la base. ....	56

### **Cuadros.**

Cuadro A 1. Grado de representación de la media aritmética, para distintos coeficientes de variabilidad. ....	57
Cuadro A 2. Interpretación del coeficiente correlación "r" de Pearson .....	57
Cuadro A 3. Resumen de ajuste de los modelos para tocones y la significancia. ....	57
Cuadro A 4. Resumen del modelo para la variable independiente $DAB^2$ a 15 cm * ht_m.....	57
Cuadro A 5. Análisis de varianza para la regresión de la variable independiente $DAB^2$ a 15 cm * ht_m. ....	58
Cuadro A 6. Significancia de los coeficientes del modelo de regresión para la variable independiente Ln (Biomasa). ....	58
Cuadro A 7. Resumen de ajuste de los modelos y la significancia.....	58
Cuadro A 8. Resumen del modelo para la variable independiente diámetro de la base de rebrotes. ....	58
Cuadro A 9. Análisis de varianza para la regresión de la variable independiente diámetro de la base de rebrotes. ....	59
Cuadro A 10. Significancia de los coeficientes del modelo de regresión para la variable independiente Ln (Biomasa). ....	59

## 1. Introducción.

El café en El Salvador se encuentra zonificado por elevación como café de bajo, media altura y estricta altura (Arévalo y Méndez 2011), la zonificación por regiones, se encuentra dividida en seis cordilleras: Apaneca-Illamatepec, Alotepec-Metapán, Bálsamo-Quezaltepec, Chinchontepec, Tecapa-Chinameca y Cacahuatique (CSC 2017). Con un área cultivada de 174,833.51 ha en total, lo cual representa el 8.29% de la cobertura de bosque de café a nivel nacional (MARN 2018).

El cambio climático, según la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático, se define como el “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<sub>2</sub>, 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 presente 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, El Salvador. Aplicando 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.



## 2. Revisión Bibliográfica.

### 2.1 Agenda 2030 sobre el desarrollo sostenible

En 2015, la ONU aprobó la Agenda 2030 sobre el Desarrollo Sostenible, una oportunidad para que los países y sus sociedades emprendan un nuevo camino con el que se pretende mejorar la vida de todos, sin dejar a nadie atrás. La Agenda cuenta con 17 Objetivos de Desarrollo Sostenible, que incluyen desde la eliminación de la pobreza hasta el combate al cambio climático, la educación, la igualdad de la mujer, la defensa del medio ambiente (Cuadro 1) o el diseño de nuestras ciudades (ONU 2018).

Los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS), también conocidos como Objetivos Mundiales, son un llamado universal a la adopción de medidas para poner fin a la pobreza, proteger el planeta y garantizar que todas las personas gocen de paz y prosperidad (PNUD 2017). Por ello para la investigación se consideró el enfoque de los objetivos 13 y 15.

Cuadro 1. Objetivos de desarrollo sostenible relacionados con el estudio.

Objetivo relacionados	Descripción
	<p>Adoptar medidas urgentes para combatir el cambio climático y sus efectos: El cambio climático afecta a todos los países. Los patrones climáticos están cambiando, los niveles del mar están aumentando, los eventos climáticos son cada vez más extremos y las emisiones del gas de efecto invernadero están ahora en los niveles más altos de la historia. La temperatura media de la superficie del mundo podría aumentar unos 3 grados centígrados este siglo.</p>
	<p>Gestionar sosteniblemente los bosques, luchar contra la desertificación, detener e invertir la degradación de las tierras y detener la pérdida de la biodiversidad: El 30.7% de la superficie terrestre está cubierta por bosques y estos, además de proporcionar seguridad alimentaria y refugio, son fundamentales para combatir el cambio climático, pues protegen la diversidad biológica. La deforestación y la desertificación, provocadas por las actividades humanas y el cambio climático, suponen grandes retos para el desarrollo sostenible y han afectado la vida y los medios de vida de millones de personas en la lucha contra la pobreza.</p>

Fuente: Tomado de ONU 2015.



## 2.2 El Café en El Salvador.

### 2.2.1 Origen y distribución.

El cafeto es originario de Etiopía en África. La especie arábica es originaria de la región que circunda el lago Tana, localizado en una latitud entre 12° y 16° norte (Alvarado *et al.* 2004). Algunos historiadores fijan el ingreso del café a El Salvador entre los años 1779 y 1796. A mediados del siguiente siglo se dictaron algunas medidas para favorecer la siembra del café, tal es el caso de un decreto puesto en vigencia en 1846. La intensificación del rubro fue la firma del primer tratado comercial con Estados Unidos en 1853, y la fundación del banco Internacional en 1880, además de la instalación del telégrafo para comunicar eficientemente a El Salvador con el mundo. Durante la gestión presidencial del Capitán General Gerardo Barrios se promulgaron los siguientes decretos: decreto del 05 de febrero de 1855 bajo el título de Distribución de terrenos a personas que se dediquen al cultivo del café (CSC 2017).

A partir de 1857 se expandió el cultivo por todo el territorio salvadoreño, la ruta se inició en Ahuachapán para luego pasar a Santa Ana y Sonsonate, posteriormente se introdujo en el Oeste de San Vicente, en las montañas de Berlín y en el Volcán Chaparrastique, San Miguel. Resultado de los logros alcanzados en materia de productividad, El Salvador se convirtió en el quinto productor mundial y cuarto exportador con cosechas cercanas a los 5 millones de quintales durante 1975 (CSC 2017).

Un siglo después del inicio del cultivo del café (*Coffea arabica* L.) y de la subdivisión de tierras ejidales y comunales (1881-1882) dio inicio la Reforma Agraria en El Salvador. Una necesidad histórica de modernización y reforma de la estructura de tenencia de tierra en El Salvador (Arévalo y Méndez 2011).

### 2.2.2 Zonificación del café en El Salvador.

El cultivo de café en El Salvador se encuentra zonificado por elevación y regiones. Dentro de la zonificación por elevación existe café de bajo desde 400 hasta 800 msnm (60% del total del país), media altura desde 800 hasta 1200 msnm (27% del total) y estricta altura desde 1200 hasta 1300 msnm (13% del total) (Arévalo y Méndez 2011), la zonificación por regiones, se encuentra dividida en seis cordilleras las cuales son Apaneca-Illamatepec, Alotepec-Metapán, Bálsamo-Quezaltepec, Chinchontepec, Tecapa-Chinameca y Cacahuatique (CSC 2017); (García 2016). El área cultivada es de 174,833.51 hectáreas, la cual representa el 8.29% de la cobertura de bosque de café a nivel nacional (MARN 2018).

### 2.2.3 Variedades de café cultivadas en El Salvador.

La especie del genero *Coffea* que se cultiva en El Salvador la arabica, en las variedades comerciales: Tekisic, Pacas, Pacamara, Catuai rojo, Catisic, Cuzcatleco, Hibrido F-1 e Icatú. De estas, el Bourbon y el Pacas le dan cobertura al 83% del área cafetalera. Dichas variedades poseen características muy peculiares, demandadas y preferidas por los compradores de café en el mercado nacional e internacional, aunque puede haber otras variedades de menor calidad (CSC 2017).

### 2.2.4 Descripción taxonómica.

A continuación, se presenta la clasificación taxonómica de la planta de café (*Coffea arabica* L.).

**Reino:** plantae

**División:** Magnoliophyta

**Sub-división:** *Angiospermae*

**Clase:** Magnoliata

**Sub clase:** *Asteridae*

**Orden:** Rubiales

**Familia:** *Rubiaceae*

**Género:** *Coffea*

**Especie:** *Arabica*

**Nombre binomial:** *Coffea arabica* L.

**Fuente:** Mora 2008.

### 2.2.5 Descripción botánica.

La planta de café es un arbusto que posee las siguientes características morfológicas:

**Raíz:** Sistema radicular superficial, encontrándose el 60% en los primeros 30 cm de profundidad y la raíz pivotante puede llegar a un metro de profundidad (CECAFÉ 2009).

**Tallo:** El arbusto de café está compuesto generalmente de un solo tallo o eje central. El tallo exhibe dos tipos de crecimiento. Uno que hace crecer al arbusto verticalmente (ortotrópico) y otro en forma horizontal o lateral (CECAFÉ 2009).

**Ramas:** Las ramas laterales primarias se originan de yemas en las axilas de las hojas en el tallo central. Estas ramas se alargan continuamente y son producidas a medida que el eje central se alarga y madura. El crecimiento de éstas y la emisión de nuevas laterales en forma

opuesta y decusada van dando lugar a una planta de forma cónica. Las ramas primarias plagiotrópicas dan origen a otras ramas que se conocen como secundarias y terciarias. En estas ramas se producen hojas, flores y frutos. A excepción de algunas especies, en el tronco o tallo del *C. arabica* normalmente se producen sólo yemas vegetativas, nunca flores ni fruto (Monroig s.f).

**Hojas:** Las hojas aparecen en las ramas laterales o plagiotrópicas en un mismo plano y en posición opuesta. Tiene un pecíolo corto, plano en la parte superior y convexo en la inferior. La lámina es de textura fina, fuerte y ondulada. Su forma varía de ovalada (elíptica) a lanceolada. El haz de la hoja es de color verde brillante y verde claro mate en el envés. En la parte superior de la hoja las venas son hundidas y prominentes en la cara inferior. Su tamaño puede variar de 0.07 a 0.15 m de largo. La vida de las hojas en la especie arábica es de 7 a 8 meses mientras que en la *canephora* es de siete a diez meses (Monroig s.f).

**Flores:** Las flores son pequeñas, de color blanco y de olor fragante. Los cinco pétalos de la corola se unen formando un tubo. El número de pétalos puede variar de 4 a 9 dependiendo de la especie y la variedad. El cáliz está dividido en 4 a 5 sépalos. La inflorescencia del café es una cima de eje muy corto que posee un número variado de flores. En los arábicos es de 2 a 9 y en los robustoides de 3 a 5. Como regla general se forman en la madera o tejido producida el año anterior. Las especies *canephora* y *liberica* son especies alógamas y los arábicos son autógamos. En las especies donde ocurre la polinización cruzada el elemento polinizador principal es el viento y luego los insectos. En los arábicos el 94% de la polinización es autopolinización y sólo en un 6% puede ocurrir polinización cruzada (CECAFÉ 2009).

**Frutos:** El fruto del cafeto es una drupa. Es de forma ovalada o elipsoidal ligeramente aplanada. Contiene normalmente dos semillas planoconvexas separadas por el tabique (surco) interno del ovario. Pueden presentarse tres semillas o más en casos de ovarios tricelulares o pluricelulares o por falsa poliembrionía (cuando ovarios bicelulares presentan más de un óvulo en cada célula). A causa del aborto de un óvulo se puede originar un fruto de una sola semilla (caracolillo). El fruto es de color verde al principio, luego se torna amarillo y finalmente rojo, aunque algunas variedades maduran color amarillo (CECAFÉ 2009).

## 2.2.6 Densidad específica de madera de plantas de café

La densidad específica o aparente de una muestra es calculada a partir del conocimiento de dos parámetros: la masa de la muestra y el volumen total, es decir el volumen de los sólidos y

el volumen ocupado por el espacio poroso (Hernández 2007). En el caso de la masa, esta se conoce pesando la muestra y en el caso del volumen, este es determinado de manera indirecta recubriendo la muestra con una capa de parafina, luego sumergiéndolo en agua para conocer el volumen desplazado (Honorato 2000).

Todo cuerpo sumergido en un fluido experimenta un empuje vertical y hacia arriba igual al peso del fluido que el cuerpo desaloja, si el empuje es mayor que el peso del cuerpo éste flota y se sumerge en caso contrario. Este principio se utilizó para determinar el volumen desplazado de un cuerpo (Martínez 2012).

### 2.2.7 Importancia del sistema de bosque de café.

Los cafetales tienen gran importancia en El Salvador por varias razones, tanto en la conservación de la biodiversidad como con los servicios ambientales que prestan principalmente en el manejo del agua (Monro *et al.* 2002). Este sistema de cultivo prevaeciente utiliza aproximadamente 11 millones de árboles de sombra, que sirven para proteger 626.5 millones de cafetos de una reserva de 33.2 millones de toneladas de carbono (Alvarado *et al.* 2004).

Prestan servicios ambientales como: Regulación de gases; regulación del clima; regulación hídrica (oferta de agua); control de erosión (retención de sedimentos); formación de suelos; reciclaje de nutrientes; polinización; control biológico; mantenimiento de biodiversidad; belleza escénica, paisaje, territorio (recreación, cultura), entre otros (Filho y Abarca 2008).

El Programa de Pago por Servicios Ambientales (no aplican en el país), se define como sistemas operacionales de reconocimiento económico a los propietarios de la tierra para que garanticen la provisión de servicios eco sistémicos en sus fincas de manera que beneficie a la sociedad (local, regional y/o global dependiendo de los servicios), actualmente, se destacan cuatro tipos de servicios ambientales: Secuestro y almacenamiento de carbono; protección de la biodiversidad; protección de cuencas hidrográficas y belleza escénica (Wunder 2005).

### 2.2.8 Importancia socioeconómica.

Según CSC (2019) para el periodo 2019 – 2020, se contabiliza una producción de 112,130 quintales oro uva de café, generando 1, 401,625 días/hombre y 5,606.50 empleos anuales, lo cual significa que un quintal oro uva genera 12.5 días/hombre y un empleo por año equivale a 250 jornales. Así mismo, dinamiza el mercado internacional ya que para el mismo periodo se

han exportado aproximadamente 738,796 quintales, equivalente a \$103,028,066.00 de dólares americanos y las importaciones han sido de 206,768.24 quintales entre café oro tostado y soluble.

Por lo tanto, este rubro es de gran importancia socioeconómica ya que genera empleos y divisas para el país, contribuyendo al producto interno bruto. Además, contribuye en forma significativa a mantener el balance ecológico y energético del país. Siendo una fuente de combustible ya que se consumen aproximadamente 4, 500,000 toneladas de leña al año a nivel nacional, aportando el sistema café un 45% (PROCAFE 2004). La biomasa seca de la planta de café posee una capacidad calórica de  $19,75 \text{ MJ Kg}^{-1}$  convirtiéndose en un combustible directo (Rodríguez y Zambrano 2010).

### 2.3 El sistema climático.

Es un sistema altamente complejo integrado por cinco grandes componentes: atmósfera, hidrosfera (océanos y mares), litosfera (superficie terrestre continental e insular), criósfera (hielo marino, cubierta de nieve estacional, glaciares de montaña y capas de hielo a escala continental) y la biosfera (vida vegetal y animal, incluida la humana), y las interacciones entre ellos. El sistema climático evoluciona con el tiempo bajo la influencia de su propia dinámica interna y debido a forzamientos externos como las erupciones volcánicas, las variaciones solares y los forzamientos inducidos por el ser humano, como los cambios en la composición de la atmósfera y los cambios en el uso de la tierra, además de la influencia del efecto invernadero y el cambio climático provocado de manera natural y antropogénica (Benavides y León 2007).

#### 2.3.1 Efecto invernadero.

Efecto invernadero, es el fenómeno por el cual la radiación que emite la superficie terrestre y océanos es retenida temporalmente, por gases atmosféricos conocidos como gases de efecto invernadero (dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ), y menor proporción, el carbono atmosférico se presenta en la forma de metano ( $\text{CH}_4$ ), Perfluorocarbonos (PFCs) e Hidrofluorocarbonos (HFC)) (Filho y Abarca 2008). Considerados los causantes del cambio climático, particularmente el dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ), el gas con mayor participación y que se fija a través del proceso de fotosíntesis (Schlegel *et al.* 2000).

### 2.3.2 Cambio climático y calentamiento global.

El cambio climático, según el artículo uno de la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático, se define como el “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 comparables”. En las últimas décadas se han producido cambios sin precedentes en el clima: desde 1950 la atmósfera y los océanos se han calentado, la cantidad de hielo y nieve han disminuido y el nivel del mar ha crecido. El calentamiento global se refiere al incremento gradual, observado o proyectado, en la temperatura media de la superficie global terrestre, consecuencia de la alteración del balance energético del planeta (diferencia entre la radiación solar absorbida y la reflejada) causado por las emisiones resultantes de la actividad del hombre sobre el ecosistema (CEPSA 2015).

### 2.3.3 Ciclo de carbono.

Los ecosistemas terrestres son importantes para el ciclo global del carbono, ya que almacenan en su biomasa  $63.8 \times 10^{12}$  TC (toneladas de carbono), poco menos que el carbono atmosférico, cuyos flujos son de  $120 \times 10^{12}$  TC año<sup>-1</sup> durante el proceso de la fotosíntesis. Sin embargo, de 2005 a 2010, en la biomasa forestal, el carbono ha disminuido  $0.5 \text{ Gt C año}^{-1}$ , debido a la pérdida de bosques (Ruiz *et al.* 2014).

El carbono es el elemento químico fundamental de los compuestos orgánicos, que circula por los océanos, la atmósfera, el suelo, y subsuelo. Estos son considerados depósitos (reservorios) de carbono. El carbono pasa de un depósito a otro por medio de procesos químicos, físicos y biológicos. La atmósfera es el menor y el más dinámico de los reservorios del ciclo del carbono. Mientras tanto, todos los cambios que ocurren en este reservorio tienen una estrecha relación con los cambios del ciclo global de carbono y del clima (Rügnitz *et al.* 2009).

El intercambio de carbono entre el reservorio terrestre y el atmosférico es el resultado de procesos naturales de la fotosíntesis y respiración, y de la emisión de gases causada por la acción humana. El carbono presente en el suelo está ampliamente relacionado al proceso de descomposición de la biomasa por las actividades bacterianas. Parte del carbono presente en el suelo regresa a la atmósfera a través del proceso de mineralización del carbono orgánico. De forma natural, otra parte del carbono orgánico es llevado por los ríos hasta llegar a los

océanos, donde se deposita en forma de carbonatos ( $\text{CO}_3^{2-}$ ). El cambio de carbono entre el reservorio oceánico y el atmosférico ocurre por medio de procesos químicos que establecen un equilibrio entre las mareas superficiales de los océanos y las concentraciones en el aire sobre la superficie (Rügnitz *et al.* 2009).

#### 2.3.4 Flujo de carbono en las plantas.

Las plantas superiores adquieren el bióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ) atmosférico por difusión a través de pequeñísimos poros de las hojas conocidos como estomas y es transportado a los sitios donde se lleva a cabo la fotosíntesis. Cierta cantidad de este  $\text{CO}_2$  regresa a la atmósfera, pero la cantidad que se fija y se convierte en carbohidratos durante la fotosíntesis se conoce como producción primaria bruta (PPB). Esta se ha estimado globalmente en  $120 \text{ Pg C año}^{-1}$  ( $1 \text{ Pg [Petagramo]} = 10^{15}$ ). La mitad de la PPB  $60 \text{ Pg C año}^{-1}$  se incorpora a los tejidos vegetales, como hojas raíces y tejido leñoso, y la otra mitad regresa a la atmósfera como  $\text{CO}_2$ , debido a la respiración autotrófica (respiración de los tejidos vegetales). El Crecimiento anual de las plantas es el resultado de la diferencia entre el carbono fijado y el respirado (Jaramillo 2004).

#### 2.3.5 Las plantas y el proceso de fotosíntesis.

La fotosíntesis es un proceso distintivo del reino vegetal, que determina en buena parte los rasgos característicos de la estructura y fisiología de las plantas. El tipo de fotosíntesis que realizan los vegetales, se caracteriza por la formación de oxígeno ( $\text{O}_2$ ) como sub producto despedido a la atmósfera; este tipo de fotosíntesis se denomina fotosíntesis oxigénica. Los organismos fotosintéticos transforman en biomasa la energía solar que absorben y asimilan. Este es un proceso biológico complejo donde la energía luminosa es absorbida por biomoléculas fotosensibles y transformada en una forma de energía bioquímica estable. En este proceso pueden distinguirse dos fases bien diferenciadas (De las Rivas 2000a).

La primera fase es un proceso de conversión de energía luminosa del espectro de ondas electromagnéticas en energía electroquímica (figura 1). La radiación luminosa ocupa una pequeña franja del espectro que va desde los 400 a los 700 nm, y se sitúa entre las radiaciones ultravioleta (UV) e infrarroja (IR), y constituye la llamada radiación fotosintéticamente activa (PAR). En la segunda fase sucede toda una serie de reacciones de asimilación de elementos necesarios para la construcción biomolecular: C, H, O, N, S, etc. El elemento esencial y mayoritario es el carbono el cual es tomado del dióxido de carbono del aire y los elementos constitutivos son tomados de fuentes minerales inorgánicas ( $\text{H}_2\text{O}$ ; nitratos,  $\text{NO}_3^-$ ; sulfatos,

$\text{SO}_4^{=}$ ; etc.). Las reacciones fotosintéticas pueden expresarse en una ecuación global que incluye los componentes esenciales del proceso, la ecuación global es la siguiente:  $n \text{H}_2\text{O} + n \text{CO}_2 \xrightarrow{(+ \text{luz})} n \text{O}_2 + (\text{CH}_2\text{O})_n$  (De las Rivas 2000a).

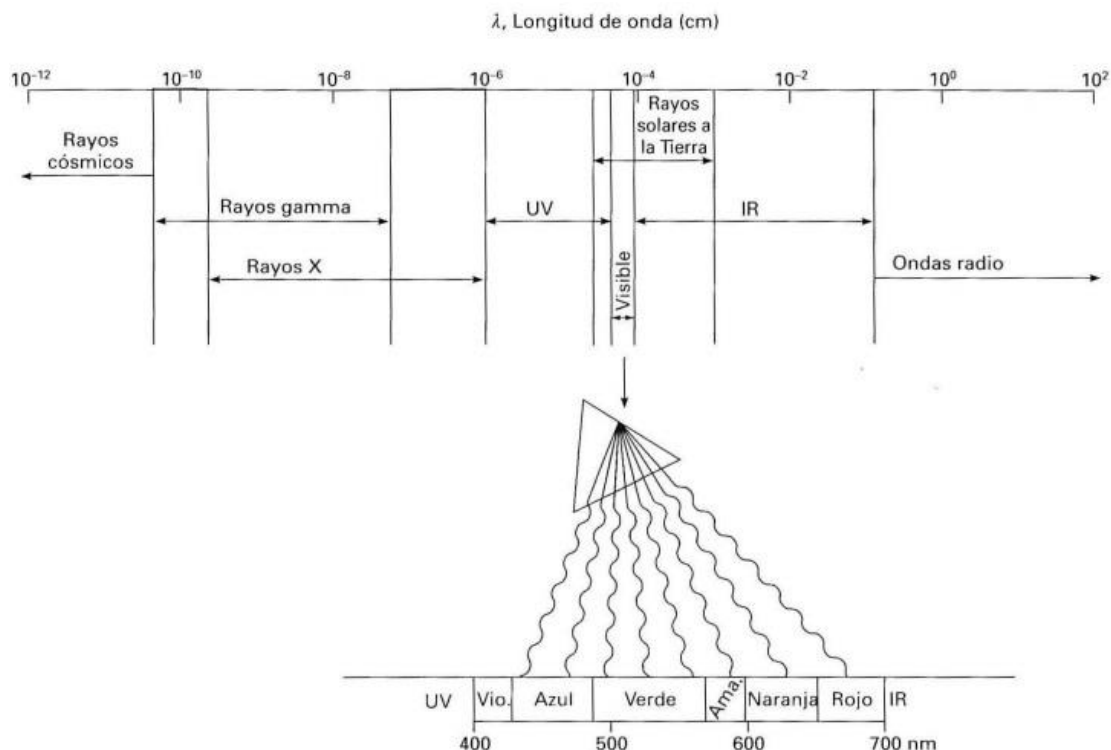


Figura 1. Espectro de onda electromagnética indicando la escala de longitud de onda. **Fuente:** tomado de Gonzáles y Raisman 2000.

## 2.4 Órgano vegetal especializado en realizar la fotosíntesis.

Según De las Rivas (2000) y Patiño (2014) en las plantas superiores, las hojas son los órganos especializados en realizar la fotosíntesis (figura 2). Las hojas son generalmente planas, como pequeños paneles que se pueden orientar a los rayos solares. A la sección media de la hoja se le denomina mesófilo, esta sección se relaciona con el gradiente de penetración de luz calculado para tres intensidades de luz blanca incidente: 200, 700 y 1500  $\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ .

El gradiente es dependiente de la estructura tisular de la sección de la hoja. Primero están las células del mesófilo en empalizada, cercanas al haz, alargadas, compactadas, y con una gran densidad de cloroplastos. Luego, las células del mesófilo lagunar, cercanas al envés, son irregulares y dejan muchos huecos o espacios llamados cámaras subestomaticas, esenciales para el intercambio gaseoso regulado por estomas. A este segundo tipo tisular le llega menos luz y, por ello, tiene menor densidad de orgánulos fotosintéticos.



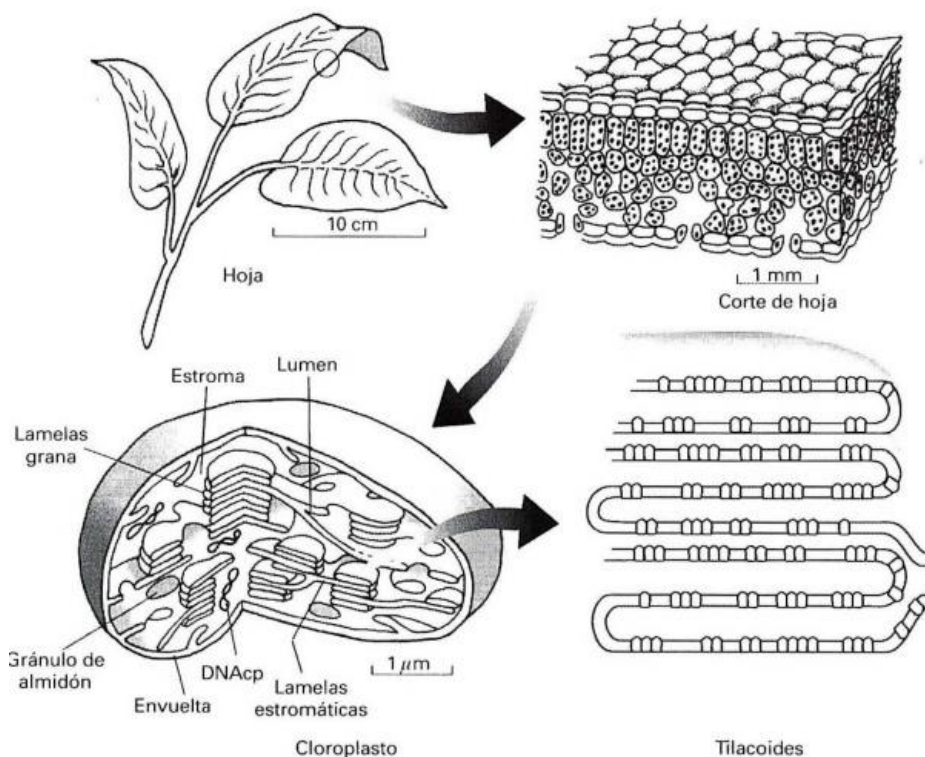


Figura 2. Estructuras vegetales que contienen el aparato fotosintético: hojas, tejido foliar (corte de hoja), cloroplastos, y tilacoides. **Fuente:** tomado de, De las Rivas 2000.

#### 2.4.1 El cloroplasto y el aparato fotosintético.

Los cloroplastos son plástidos especializados en la función fotosintética en eucariotas. Son orgánulos separados del citosol celular por una doble membrana denominada envuelta o envoltura cloroplástica, estas membranas constituyen los tilacoides y forman un sistema de membranas a modo de láminas llamadas lamela. Existen dos tipos de lamelas: las lamela grana y lamela estromática. Las membranas tilacoidales son las membranas fotosintéticas porque incluye en su interior todo el aparato biomolecular (figura 3), que lleva a cabo la primera fase de la fotosíntesis, se incluyen además los principales pigmentos fotosintéticos como las clorofilas (verdes) y los carotenoides (amarillo-anaranjado). El aparato está compuesto por cuatro complejos: el fotosistema I, fotosistema II, las antenas LHC I y II (Light Harvesting Complexes), el complejo citocromo b6f y la ATP sintasa. Cada uno de estos complejos proteínicos interviene en las etapas de fotólisis del agua, proceso conocido también como cadena de transporte de electrones (De las Rivas 2000).

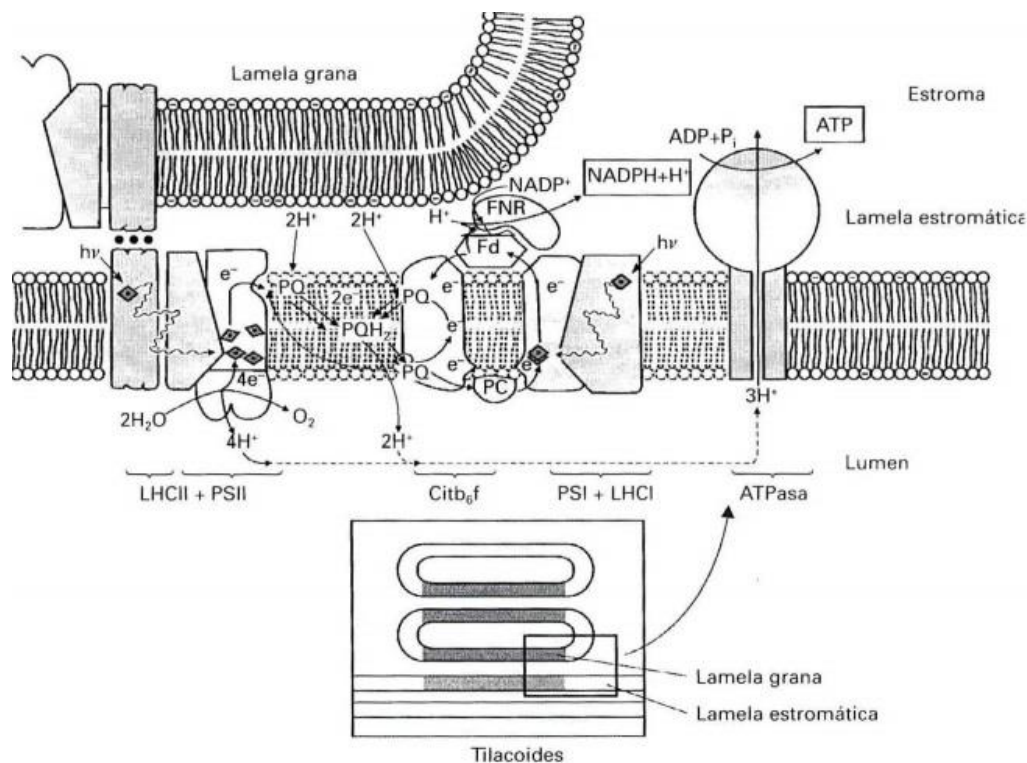


Figura 3. Complejos fotosintéticos: antena II y fotosistema II, complejo citocromo  $b_6f$ , antena I y fotosistema I, y ATPasa. **Fuente:** tomado de, De las Rivas 2000.

## 2.5 Fotólisis del agua.

Otro proceso fisiológico que se da en la primera fase de la fotosíntesis es la fotólisis del agua. Según De las Rivas (2000) un punto especialmente importante y significativo de la cadena redox fotosintética es la primera reacción, en la cual se produce la oxidación del agua; el clúster de manganeso ( $\text{Mn}_4^{++++}$ ) con cuatro cargas acumuladas es capaz de oxidar dos moléculas de agua ( $2\text{H}_2\text{O}$ ) liberando una molécula de oxígeno ( $\text{O}_2$ ) y cuatro protones en el lado donador (lumen,  $+4\text{H}^+$ ) (Patiño 2014).

## 2.6 Asimilación y fijación de $\text{CO}_2$ por las plantas.

La biomasa es la capacidad existente en los diferentes componentes de los ecosistemas para acumular o almacenar materia orgánica en diferentes periodos de tiempo. Está compuesta por el peso de la materia orgánica epigea y subterránea que existe en un ecosistema forestal. Y se refiere a toda la materia orgánica que proviene de árboles y plantas que pueden ser convertidas en energía (Cuenca *et al.* 2014).

Fisiológicamente la asimilación fotosintética de CO<sub>2</sub>, es el primer paso para la producción de nueva biomasa, y se realiza por medio del Ciclo Fotosintético de Reducción de carbono o Ciclo de Calvin. En este proceso se diferencian tres fases: 1) la fijación inicial del CO<sub>2</sub>, que tiene lugar por la carboxilación de la RuBP; 2) la reducción del carbono fijado a hidratos de carbono, que requiere el aporte de energía y poder reductor generados mediante la cadena de transporte electrónico; y 3) la regeneración de la RuBP, que requiere también poder energético (Medrano y Flexas 2000). Los productos de la asimilación de CO<sub>2</sub>, son triosas-fosfato, que posteriormente, pasan a ser moléculas de azúcares sencillos (glucosa, fructosa) o más complejas (sacarosa y almidón) (Azcón-Bieto y Talón 2000).

## 2.7 La célula vegetal.

Presenta una pared celular que rodea el protoplasto, delimitado externamente por la membrana plasmática. Esta membrana establece la primera división en compartimentos, por una parte, el protoplasma, tradicionalmente identificado con el interior de las células; por otra, el espacio externo o espacio extracelular. Con la peculiaridad continuarse con el de las células adyacentes, recibiendo el nombre de apoplasto y otros espacios conocidos como plasmodesmos y simplastos (Revilla y Zarra 2000).

### 2.7.1 Estructura de la pared celular.

La pared celular está formada mayoritariamente por polisacáridos (celulosa, hemicelulosa y pectinas), que constituyen alrededor del 90% del peso seco de las paredes celulares primarias y entre el 65 y el 85% de las secundarias. Las proteínas, tanto estructurales como enzimáticas, constituyen hasta un 10% del peso de las paredes, mientras que las ligninas pueden tener una presencia importante (hasta un 35%) en algunos tipos de paredes secundarias (Revilla y Zarra 2000); (Acebes *et al.* 2019).

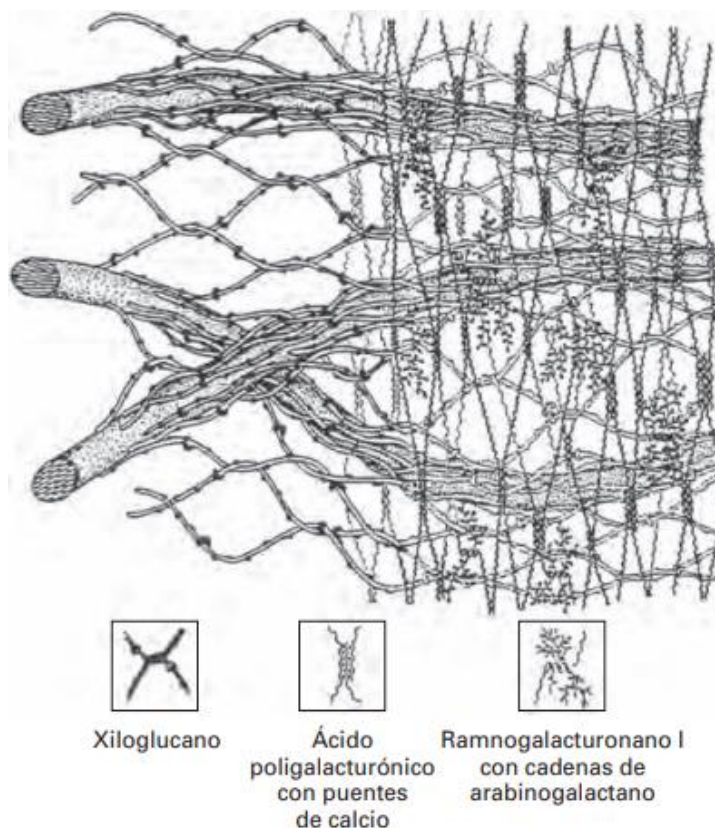


Figura 4. Representación esquemática de la estructura de la pared celular primaria de una dicotiledónea. **Fuente:** tomado de Revilla y Zarra 2000.

Está constituida por una larga secuencia lineal de restos de D-glucosa unidos por enlaces  $\beta$  (1 $\rightarrow$ 4). Cada resto presenta una rotación de 180° respecto a los restos contiguos. Las microfibrillas de celulosa están presentes en las paredes celulares de todas las plantas superiores, constituyendo el 30 – 40% de peso de las paredes de tejidos leñosos, mientras que en paredes primarias se encuentran en menor proporción (González 2013).

### 2.7.2 Las hemicelulosas.

Estas entrelazan las microfibrillas de celulosa. Los polisacáridos hemicelulósicos están constituidos por una cadena lineal relativamente larga sobre la que pueden aparecer cadenas laterales relativamente cortas. Los polisacáridos hemicelulósicos son el xiloglucano el más abundante, los xilanos que están constituidos por una cadena lineal de  $\beta$  (1 $\rightarrow$ 4)-D-xilosa con sustitución de arabinosa, ácido glucurónico y ácido metilglucurónico mediante enlaces  $\alpha$  (1 $\rightarrow$ 2) o  $\alpha$  (1 $\rightarrow$ 3), el glucano o glucano mixto, formado por una cadena lineal de restos de  $\beta$ -D-glucosa unidos por enlaces  $\beta$  (1 $\rightarrow$ 4) y  $\beta$  (1 $\rightarrow$ 3) en una relación aproximada 2.3 (Carpita y Pérez-Almeida 2006).

Otros polisacáridos hemicelulósicos presentes en las paredes celulares son los mananos, que constituyen un grupo muy heterogéneo en el que la manosa es el componente mayoritario. Los (galactos) glucomananos están presentes en cantidades significativas en paredes celulares de tejidos lignificados de coníferas (12-15%) y en menores cantidades en angiospermas (3-5%) (Carpita y Pérez-Almeida 2006).

### 2.7.3 Las pectinas.

Estas presentan una gran complejidad estructural. Los polisacáridos pépticos o pectinas son unos de los polímeros conocidos más complejos, constituidos por una mezcla de polímeros ácidos y neutros. Están presentes en las paredes celulares de todas las plantas, aunque su importancia cuantitativa varía alrededor del 35% en paredes primarias de dicotiledóneas hasta el 5% en monocotiledóneas.

### 2.7.4 Proteínas estructurales y diversidad de enzimas asociadas a las paredes.

Las paredes celulares contienen también diferentes proteínas, tanto estructurales como enzimáticas, que en las paredes primarias llegan a constituir el 10%. Entre las proteínas estructurales, la proteína rica en hidroxiprolina (46% extensina) junto con otros cinco aminoácidos (serina, histidina, valina, tirosina y lisina) constituyen más del 90% de la misma. Otras son las proteínas-arabinogalactanos, son proteínas solubles que no están covalentemente enlazadas a la pared celular, por lo que no tienen una función estructural, y posiblemente, participen en la diferenciación (Acebes *et al.* 2019).

Las enzimas asociadas a la pared celular son una muestra de su dinamismo. La pared contiene diferentes tipos de enzimas; prácticamente todas son glicoproteínas, aunque su grado de asociación, tipo de sección y funciones, pueden ser diferentes. Existen tres grupos principales de enzimas presentes en la pared: oxidoreductasas, hidrolasas y transglicosilasas. En la pared celular se encuentran también las expansinas, proteínas de pequeño tamaño asociadas a la pared, capaces de inducir la extensión de la misma (Acebes *et al.* 2019).

### 2.7.5 Síntesis y diferenciación de tejidos.

La pared celular es una entidad molecular compleja, formada por distintos componentes capaces de auto ensamblarse. Desde su formación (citoquinesis) hasta que alcanza su forma y tamaño definitivo, la composición y estructura sufren cambios continuos, que implican la

síntesis e incorporación de nuevos componentes en la misma. La capacidad de modificación de las células, implica el fenómeno de crecimiento y desarrollo. Segura (2013) define que el desarrollo es el conjunto de cambios graduales y progresivos en tamaño (crecimiento), estructura y función (diferenciación) que hace posible la transformación de un cigoto en una planta completa (Benavides y León 2007).

## 2.8 Inventarios de carbono en Cafetales.

Son estimaciones que permiten ilustrar el potencial de los cafetales arbolados como sumideros de carbono, a la vez que evidencian los impactos negativos de la eliminación de estos cafetales para usos de la tierra que no cumplen con servicios ambientales igual o mayores. En relación con la retención de carbono para el mercado se deben establecer dos conceptos, el carbono retenido al momento de la primera valoración, el cual debe ser cuantificado (toneladas/ha), tomado como línea base, y ofertar como carbono fijado o retenido. Luego el carbono adicional cuantificado periódicamente (cada uno o dos años), a partir de la línea base (toneladas/ha/año) (Filho y Abarca 2008).

## 2.9 Aplicaciones de principios de dasonomía, para el desarrollo de modelos alométricos.

La dasonomía, es una parte de la ciencia forestal, que trata de la gestión de las masas forestales, basada en principios científicos, que resultan de la comprensión de la biología del árbol y de la dinámica de las masas forestales. Una de las divisiones es la dasometría, con la cual se estudia la medición de árboles y masas forestales, así como las leyes métricas que rigen su crecimiento. Las variables que interesan medir en un árbol son el diámetro normal (d), altura (h), espesor de corteza, crecimiento, dimensiones de copa y edad (Yner 2014).

## 2.10 Modelos alométricos.

Alometría estudia los patrones de crecimiento de los seres vivos y las proporciones de sus partes en relación con las dimensiones totales (Ruiz *et al.* 2014). Los modelos alométricos ayudan al cálculo de la biomasa de grandes áreas forestales, valiéndose de la correlación existente entre las variables de difícil medición (pesos) y aquellas directamente medidas en inventarios forestales (DAP, HC o HT) (Solano *et al.* 2014).

Se trata del principio básico que permite predecir una medida de un árbol (lo típico es su biomasa) en función de otra medida (por ejemplo, su diámetro). Una ecuación es una fórmula que formaliza de forma cuantitativa dicha relación (Picard *et al.* 2012).

Hace referencia a una relación (lineal o no) entre los aumentos de las medidas de los árboles, también se refiere al desarrollo ontogénico de los individuos, es decir, al crecimiento de los árboles (Picard *et al.* 2012).

Existen dos métodos para medir y estimar la biomasa arbórea sobre el suelo: el método directo y el indirecto. El método directo (o destructivo) utilizado para la construcción de ecuaciones alométricas y factores de expansión de la biomasa. El método indirecto consiste en utilizar ecuaciones o factores de expansión que permitan relacionar algunas dimensiones básicas obtenidas en campo. Estas ecuaciones son generadas por medio de una técnica estadística llamada análisis de regresión (Rügnitz *et al.* 2009).

Los métodos de estimación del volumen y de la biomasa de los árboles están en constante evolución. Cada vez más se quieren obtener estimaciones que sean lo más próximas posibles a la realidad. Los modelos de volumen y biomasa no han seguido la misma evolución en diferentes zonas ecológicas. En las zonas tropicales secas, donde el problema del suministro de leña es muy antiguo (Picard *et al.* 2012).

#### 2.10.1 Desarrollo de modelos alométricos de biomasa.

Los modelos alométricos de volumen, biomasa y carbono (VBC) ayudan a estimar el almacenamiento de carbono en sistemas forestales y agroforestales. La construcción de modelos alométricos de VBC para Árboles, Arbustos y Palmas (AAP) conlleva los siguientes pasos: Definición del ecosistema y selección de las especies de interés, determinación del tamaño de la muestra, selección de individuos por muestrear, medición, corte y estimación de VBC por árbol y selección de los mejores modelos alométricos (Segura y Andrade 2008).

#### 2.10.2 Determinación de muestras.

Chave *et al.* (2004), citado por Picard *et al.* (2012). Demostró que, usando 300 árboles para elaborar un modelo de biomasa, la estimación en un bosque tropical húmedo daba un coeficiente de variación de apenas 3.1% dicho coeficiente supera el 10 % cuando el número de árboles usados para elaborar el modelo de biomasa está por debajo de 50, con una reducción de coeficiente de variación aproximadamente proporcional a  $\frac{1}{\sqrt{n}}$  Van Breugel *et al.*

(2011) citado por el mismo autor, encontró una disminución en la precisión de la estimación con el tamaño de la muestra usada para elaborar el modelo de biomasa para “n” comprendida entre 49 y 195 árboles.

Cuanto más costosa resulta una observación en términos de tiempo y de esfuerzo de medición, más se tiende a realizar el plan de muestreo en función de trabajo que se está dispuesto a realizar. Al ser la biomasa epigea de un árbol más difícil de medir que el volumen de su fuste, los modelos de biomasa tienden a elaborarse a partir de menos observaciones que los modelos de volumen.

### 2.11 Regresión lineal.

En la práctica surge con frecuencia la necesidad de tener que relacionar un conjunto de variables a través de una ecuación. La regresión es una técnica estadística que permite construir modelos que representan la dependencia entre variables o hacer predicciones de una variable “Y” en función de las observaciones de otras ( $X_1, \dots, X_p$ ).

$$Y = f(X_1, \dots, X_p) + \epsilon$$

“Y” es la variable respuesta o dependiente;  $X_1, \dots, X_p$  son las variables predictores o independientes y  $\epsilon$  es el término de error que se supone con media cero y varianza constante. Con el apoyo de un diagrama de dispersión se determina la relación entre las variables. Uno de los modelos más común que se utiliza para expresar esta relación es el modelo potencial (Laguna 2014).

#### 2.11.1 Ajuste de la recta por mínimos cuadrados.

Se trata de buscar la recta que dé lugar a los residuos más pequeños, es decir la recta que hace mínima la suma de cuadrados de las distancias verticales entre cada punto y la recta, de tal manera que se minimice la suma de los errores al cuadrado. Buscamos cantidades “a” (ordenada en el origen) y “b” (pendiente de la recta lineal). Para cada observación podemos definir el error o residuo como la distancia vertical entre el punto  $(x_i, y_i)$  y la recta, es decir:  $y_i - (a + bx_i)$  (Frías *et al.* 2012).

Según Suarez (2011) la regresión potencial tiene por ecuación predictora:

$$Y = aX^b + \epsilon$$



Para el primer caso los valores siguen una ley potencial. Si la ecuación predictora está dada por la ecuación antes descrita, tomando logaritmos en ambos miembros, queda:

$$\log Y = \log a + b \cdot \log X$$

Donde las constantes  $a$  y  $b$  quedan fijadas al resolver simultáneamente las ecuaciones:

$$a = \frac{\sum \log X^2 \sum \log Y - \sum \log X * \sum \log X \log Y}{n \sum \log X^2 - (\sum \log X)^2}$$

$$b = \frac{n \sum \log X \log Y - \sum \log Y * \sum \log X}{n \sum \log X^2 - (\sum \log X)^2}$$

Interpretación de la ordenada en el origen  $a$ :

Este parámetro representa la estimación del valor de “Y” cuándo “X” es igual a cero.

Interpretación de la pendiente de la recta  $b$ :

El coeficiente de regresión es muy importante, porque mide el cambio de la variable Y por cada unidad de cambio de X. Este parámetro nos informa de cómo están relacionadas las dos variables en el sentido de que nos indica en qué cantidad (y si es positiva o negativa) varían los valores de Y cuando varían los valores de la X en una unidad. De hecho, el coeficiente de regresión  $b$  y el coeficiente de correlación  $r$  siempre tendrán el mismo signo.

Si  $b > 0$ , cada aumento de X se corresponde con un aumento de Y;

Si  $b < 0$ , Y decrece a medida que aumenta X (Laguna 2014).

#### 2.11.2 Coeficiente de correlación lineal de Pearson y coeficiente de determinación $R^2$ .

El estimador muestral más utilizado para evaluar la asociación lineal entre dos variables X e Y es el coeficiente de correlación de Pearson ( $r$ ). Se trata de un índice que mide si los puntos tienen tendencia a disponerse en una línea recta. Puede tomar valores entre -1 y +1. Es un método estadístico paramétrico, ya que utiliza la media, la varianza y, por tanto, requiere criterios de normalidad para las variables analizadas (Frías *et al.* 2012) y (Laguna 2014).

Propiedades:

- Carece de unidades de medida (adimensional).
- Sólo toma valores comprendidos entre  $[-1, 1]$ .
- Cuando  $|r|$  esté próximo a uno,  $r = +1$  (recta lineal creciente de izquierda a derecha) o  $r = -1$  (recta lineal decreciente), se tiene que existe una relación lineal muy fuerte entre las variables.
- Cuando  $r \approx 0$ , puede afirmarse que no existe relación lineal entre ambas variables.

Condiciones de aplicación de la correlación:

- Variables cuantitativas: Ambas variables examinadas han de ser cuantitativas. Para variables ordinales se puede usar el coeficiente de Spearman.
- Normalidad: La normalidad de ambas variables es un requisito en el caso del coeficiente de correlación de Pearson, pero no en el de Spearman.
- Independencia: Las observaciones han de ser independientes, es decir, sólo hay una observación de cada variable para cada individuo.

Supuestos del modelo de regresión:

- Linealidad: El valor esperado de la variable dependiente “Y” es una función lineal de la variable explicativa “X”, de tal forma que cambios de magnitud constante a distintos niveles de “X” se asocian con un mismo cambio en el valor medio de “Y”.
- Homogeneidad de la varianza: La varianza de la variable dependiente “Y” es la misma para cualquier valor de la variable explicativa “X”; es decir, a diferencia de la media, la varianza de “Y” no está relacionada con “X”.
- Normalidad: Para un valor fijo de la variable explicativa “X”, la variable dependiente “Y” sigue una distribución normal. Independencia: Cada observación de la variable “Y” debe ser independiente de las demás.

Según Laguna (2014) y Bonilla (1993) la medida más importante de la bondad del ajuste es el coeficiente de determinación  $R^2$ . Este coeficiente nos indica el grado de ajuste de la recta de regresión a los valores de la muestra, y se define como el porcentaje de la variabilidad total de la variable dependiente Y que es explicada por la recta de regresión.

$$R^2 = 1 - \frac{S_e^2}{S_y^2}$$

Las características de este coeficiente son:

- $R^2$  es una cantidad adimensional que sólo puede tomar valores en  $[0, 1]$ .
- Cuando un ajuste es bueno,  $R^2$  será cercano a uno (mayor será la fuerza de asociación entre ambas variables). y
- Cuando un ajuste es malo,  $R^2$  será cercano a cero (la recta no explica nada, no existe asociación entre X e Y).

Puesto que  $R^2$  nos explica la proporción de variabilidad de los datos que queda explicada por el modelo de regresión, cuanto más cercano a la unidad esté, mejor es el ajuste.

Relación entre  $R^2$  y r es muy importante tener clara la diferencia entre el coeficiente de correlación y el coeficiente de determinación:

- $R^2$ : mide la proporción de variación de la variable dependiente explicada por la variable independiente.
- r: mide el grado de asociación entre las dos variables.

A diferencia de  $R^2$  que siempre es positivo, r puede ser positivo o negativo (tendrá el mismo signo que la pendiente de la recta que hemos llamado b). Por tanto, es importante tener presente que r nos da más información que  $R^2$ . El signo de r nos informa de si la relación es positiva o negativa. Así pues, con el valor de r siempre podremos calcular el valor de  $R^2$ , pero al revés siempre nos quedará indeterminado el valor del signo a menos que conozcamos la pendiente de la recta (Laguna 2014).

## 2.12 Sistemas de información geográfica (SIG), como herramienta para la planificación y elaboración de inventarios forestales.

SIG es un sistema que permite la recolección, manipulación, transformación, análisis y despliegue de información que tiene una referencia en el espacio. Está conformado por recurso humano (especialistas, técnicos y usuarios), base de datos (cartográficas, temáticas y topologías) y software especializados. Además, se emplea el uso de GPS, software ArcGis 10.3, el datum WGS 84, sistema de coordenadas UTM, sensores remotos aplicados a la cobertura y uso de la tierra, imágenes de satélite ASTER, nomenclatura Cónica Conformal de Lambert, Google Earth, clasificación digital de imágenes y análisis multi-temporal (Arévalo y Méndez 2011).

### 3. Materiales y métodos.

#### 3.1 Ubicación espacial.

La investigación, se realizó en cuatro fincas, ubicadas en el municipio de Comasagua, departamento de La Libertad, 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 (Figura 5), 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.

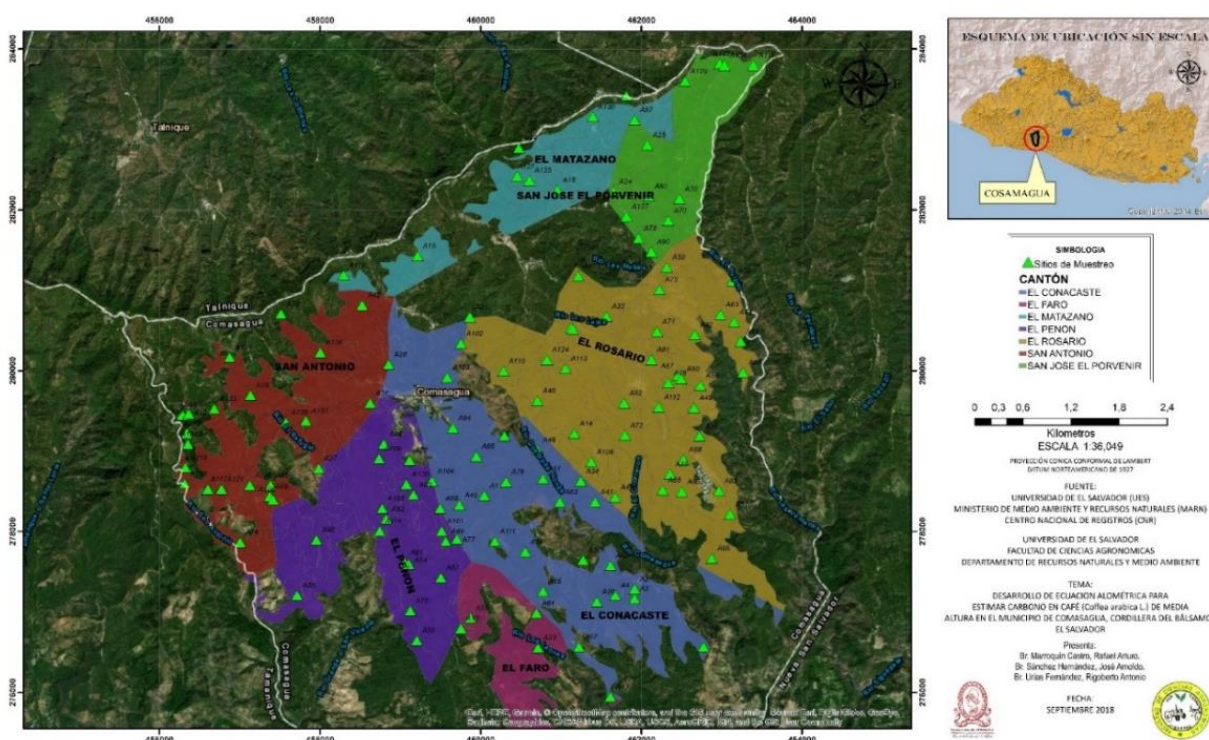


Figura 5. Mapa de localización de zona de estudio, Cordillera del Bálsamo, municipio de Comasagua, departamento de La Libertad.

#### 3.2 Caracterización climática.

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

Vista panorámica de la vegetación predominante en la zona de estudio, perteneciente al sistema de bosque de café bajo sombra, en Finca San Antonio, Cordillera del Bálsamo.



Figura 6. Vista paisajística Finca San Antonio del municipio de Comasagua.

### 3.3 Metodología de campo.

La metodología de muestreo de campo se adaptó de Castellanos *et al.* (2010), Andrade y Segura (2008) y Picard *et al.* (2012). Para el desarrollo del modelo de estimación de biomasa se utilizó el método destructivo; consistió en seccionar cada individuo en sus partes principales, en este caso raíz, tocón, rebrotes, bandola y hojas. El procedimiento fue el siguiente:

1. Se realizaron previamente visitas de campo, con los coordinadores de la zona de estudio tanto del personal de unidad ambiental de las alcaldías, personal del Consejo Salvadoreño del Café (CSC), en dichas reuniones se explicó el objetivo de la investigación, los alcances y la metodología de trabajo. Y así solicitar el permiso de ingreso a las fincas para la extracción de plantas de café.
2. Se desarrolló una planificación de los posibles lugares de muestreo, con ayuda de la herramienta ArcGis® versión 10.3, en la cual se seleccionaron aleatoriamente puntos para obtener sus coordenadas geográficas. Según la cartografía oficial del Centro Nacional de Registro (CNR).

3. Con las coordenadas de los diferentes puntos se realizó otra visita para establecer día de trabajo en cada una de las fincas cafetaleras.
4. Con los puntos cargado en un GPS Garmin® Modelo 78s, utilizando la herramienta de navegación se localizó uno a uno los sitios de muestreo. Que previamente se codificaron de la siguiente forma.

Cuadro 2. Ejemplo de codificación de árboles en finca.

Nombre de la Finca	Árbol	Correlativo	Individuo
Finca San Antonio	A	1	A o B
Finca Germania	A	2	A o B
Finca las Nubes	A	3	A o B
Finca el Faro	A	72	A o B

Ejemplo de etiquetado: FSA\_A02A

5. 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.



Figura 7. Descripción del terreno medición de pendiente.

6. Se realizó una descripción general del lugar.
  - Manejo de la Finca
  - Topografía.
  - Pendiente

- Orientación topográfica

7. Las variables medidas en campo se registraron en un formulario digital diseñado en la plataforma ODK® Build (Figura 8). Para posteriormente cargarla en un servidor alojado en Google Cloud®, y así utilizarla en una app para teléfonos Android®.

		Previous	Alometria_Café_Campo_01					Next		
FLN_A29B	13.65826	8934527	13.652809999999999	-89.34524666666667	966.3	4.8	S		60	O
FLN_A28A	13.65334	8934602	13.653330000000002	-89.34607833333332	940.3	3.9	S		10	S
FLN_A28B	13.65334	8934602	13.65329	-89.34602666666666	970.4	4.5	S		10	S
FF_A34A	13.59981	8937218	13.599854999999999	-89.37227499999999	962.7	4.0	N		40	S
FF_A35B	13.59985	8937214	13.600086666666668	-89.37225833333332	982.6	4.3	N		40	S
FF_A35A	13.5998	8937176	13.600161666666668	-89.37112333333334	881.5	4.8	N		33	E
FF_A35B	13.59979	8937173	13.599646666666668	-89.37174833333331	884.0	4.4	N		33	E
FF_A36A	13.60024	8937188	13.600191666666667	-89.371905	897.6	4.9	N		25	S
FF_A36B	13.60023	8937187	13.600268333333334	-89.37191499999999	899.2	3.0	N		33	S

Figura 8. Registro de códigos, coordenadas y otros datos en la plataforma digital Open Data Kit (ODK)

8. 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.



Figura 9. Plantas de café seleccionadas como muestras.

9. Se procedió con la medición de las variables altura total, altura de tocón, altura de rebrotes, diámetro a 15 cm de altura y diámetro a la base de rebrotes, utilizando cinta diamétrica, cinta métrica y vernier.



Figura 10. Medición y registro de variables dasométricas en plantas de café.

10. 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 dependiendo el estado fenológico de los cafetos.



Figura 11. Seccionamiento y preparación de muestras.



Medición de variables dasométricas con cinta diamétrica, corte de secciones y extracción completa de raíz de una planta de café.

11. Se extrajo la raíz de los individuos utilizando palín y bieldo.



Figura 12. Preparación de área alrededor de la raíz de la planta de café

12. Luego se pesó en balanza semi analítica, cada uno de los elementos seccionados y se registraron estos pesos en el formulario ODK.

13. 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.



Figura 13. Seccionamiento y almacenamiento de muestras.



Figura 14. Almacenaje y transporte de muestras.

14. Las muestras tomadas se colocaron en sobres de papeles manila debidamente etiquetados y se transportaron en una caja para evitar pérdidas o deterioro.



Figura 15. Muestras de cada una de las secciones.

### 3.4 Desarrollo de modelos alométricos.

El desarrollo de modelos alométricos de biomasa comprendió lo siguiente:

#### 3.4.1 Definición de ecosistema.

El ecosistema seleccionado fue café bajo sombra, que se sitúa entre los 800 y 1200 msnm, donde se desarrolla el cultivo que se denomina café de media altura, en dichas zonas se cultivan variedades como: Borbón, Pacamara, Pacas, Catuai, entre otras de la especie arábica. Por ser plantaciones permanentes las edades varían y se realizan diferentes manejos agronómicos.

#### 3.4.2 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 (figura A 1), 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 un total de 72 individuos, para desarrollar 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.

#### 3.4.3 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, definiendo cuatro diferentes zonas.

#### 3.4.4 Medición, corte y estimación de biomasa por árbol.

Una vez seleccionado 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  $\frac{2}{3}$  de la altura. Los diámetros se registraron utilizando 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. Teniendo el cuidado de recuperar en su totalidad cada sección.

Se procedió a pesar la raíz, tocón, rebrotes, bandolas y hojas, para registrar la biomasa húmeda en una balanza digital de una precisión  $\pm 1$  g. Luego 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 (Cuadro 3).

Cuadro 3. Codificación de las sub muestras de un arbusto de café por sección.

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

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 %

### 3.5 Metodología de laboratorio.

#### 3.5.1 Determinación de humedad parcial.

Se determinó el contenido de humedad de la biomasa para poder estimar el peso seco; se requirió de 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 Segura y Andrade (2008) a una temperatura media de 60°C hasta llegar a un peso constante.

Estas muestras siguieron el siguiente proceso:

1. Se tomaron 9 sub muestras de biomasa verde por planta.
2. Se pesaron la muestra para obtener peso húmedo (PH). Aproximadamente 100 g en balanza semi-analítica.
3. Se calentó el horno a 60 °C y se colocaron las muestras por 72 horas hasta obtener un peso constante determinado mediante pesajes periódicos. Y así evitar dejar residuos de humedad y no provocar oxidación de las muestras.

4. Las sub muestras se colocaron en bolsas de papel Kraft etiquetadas en el horno.
5. Se retiraron las muestras del horno y se colocaron en desecador por 30 minutos y posterior mente se pesaron balanza semi-analítica. Para así conocer la pérdida de peso (ecuación 2).

Calculo de humedad:

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

Donde:

*H%: Porcentaje de Humedad*

*PH: Peso humedo de la muestra*

*PS: Peso seco de la muestra*



Figura 16. Muestra para determinar porcentaje de humedad.



Figura 17. Horno utilizado para determinación de

### 3.5.2 Densidad de madera.

Para la determinación de la densidad específica de madera se realizaron los siguientes pasos:

1. Para este caso en particular se seleccionaban muestras de tallo y de tocón ya que estas partes contienen las características apropiadas para su determinación y representan una parte importante de la planta.
2. Se determinó la humedad parcial, aplicando el proceso descrito anteriormente.
3. Se parafinó cada trozo de tocón y rebrote sin corteza, para formar una película impermeable para evitar que el agua penetre. Luego se procedió a pesar para obtener el peso de madera más parafina.
4. A continuación, se sumergía en un vaso aforador de eureka que contenía agua a temperatura ambiente, con la ayuda de una pesa, ya que la madera tiende a flotar.
5. Este vaso de eureka se utilizó para medir el volumen desplazado de un cuerpo, tiene una salida de aforo que permite depositar fácilmente el agua desplazada en un erlenmeyer; para su posterior medición en una probeta graduada de 10 ml con una precisión de 0.1 ml.
6. Conociendo el peso inicial de madera y el de madera más parafina por diferencia, se determina el peso únicamente de la parafina. La densidad de la parafina es de  $0.86 \text{ g cm}^{-3}$  con esta se determina el volumen desplazado por la parafina. Para restar el volumen de agua desplazado por la parafina al volumen total desplazado (ecuación 3 y 4).
7. 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).
8. Cálculo de densidad (ecuación 5):

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

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

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

Donde:

$V_p$ : Volumen desplazado por la parafina

$m_p$ : Masa de la parafina

$\rho_p$ : Densidad de la parafina

$V_m$ : Volumen de madera

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

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

$M_m$ : Masa de madera

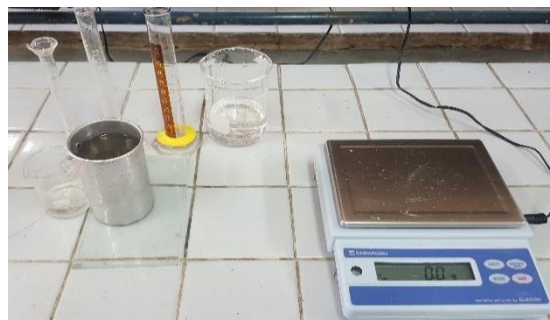


Figura 18. Materiales utilizados para determinar densidad de madera en rebrotes y tocones.

### 3.6 Factor de forma de rebrotes.

Se determinó el 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).

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

Donde:

$V$  = Volumen ( $cm^3$ ).

$D_1^2$  = Diámetro mayor al cuadrado ( $cm^2$ ).

$D_2^2$  = Diámetro menor al cuadrado ( $cm^2$ ).

$h$  = Altura de rebrote (cm).

$f$  = Factor de forma.

$\pi = 3.1416$

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), para el caso del café se determinó de la siguiente manera: (CARDER 2013)

$$F_f = \frac{\text{Volumen real del rebrote}}{\text{Volumen del cilindro}} = \frac{\pi/4 \times \left(\frac{Dm^2 + dm^2}{2}\right) \times h + \pi/4 \times \left(\frac{Dm^2 + dm^2}{2}\right) \times h}{\pi/4 \times DAB^2 \times h} \quad (7)$$

Donde:

$Dm^2$ : Diámetro mayor al cuadrado.

$dm^2$ : Diámetro menor al cuadrado.

$h$ : Altura.

$DAB$ : Diámetro a la de base de rebrotes.

$\pi = 3.1416$ .

### 3.7 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) (cuadro A 1). 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 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 una distribución 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 grafico estarán sobre una recta.

Para los coeficientes de los modelos, se tomaron significativos aquellos que su P-valor es mayor a 0.05 y la hipótesis alterna lo más cercano a  $1 \times 10^{-5}$ . Se realizó un análisis general de las variables para todos los modelos de regresión, se combinaron variables y se hizo un análisis grafico para identificar datos extremos y observar cual curva presenta un coeficiente "r" de Pearson y un  $R^2$  mayor.

Se dividió la variable 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.

## 4. Resultados y discusión.

### 4.1 Resumen de datos obtenidos por finca en estudio.

En el cuadro 4, 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. El máximo promedio de altura se registró en Finca El Faro con 2.57 m y el promedio más bajo en Finca Germania con 1.63 m. con respecto a la altura promedio de Tocón la tendencia fue similar con 0.36 m En Finca el Faro y 0.16 m en Finca Germania.

El mayor promedio de diámetro a 15 cm de la base del tocón se encontró en la Finca Germania con un valor de 6.6 cm y en Finca el Faro el menor promedio con 4.9 cm. En el promedio de altura de rebrotes cambia la tendencia ya que los datos máximos se presentan en Finca Germania con 1.32 m y los mínimos en Finca Las Nubes con 1.21 m. En el diámetro de la base del rebrote Finca Germania presenta los datos máximos con 2.87 cm y el mínimo en Finca Las Nubes con 1.89 cm. La Biomasa total se registraron valores promedio máximo de 2.50 Kg en Finca San Antonio y el mínimo en 1.73 Kg en Finca Las Nubes.

Cuadro 4. Resumen de datos 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)
<b>SAN ANTONIO</b>	FSA	26	2.16	0.34	6.2	1.28	2.21	2.50	209
<b>GERMANIA</b>	FG	28	1.63	0.16	6.6	1.32	2.87	2.11	209
<b>LAS NUBES</b>	LN	12	2.25	0.33	6.0	1.21	1.89	1.73	419
<b>EL FARO</b>	FF	6	2.57	0.36	4.9	1.21	1.91	2.03	61.5
<b>TOTAL</b>		72							898.5

### 4.2 Porcentaje de humedad por sección.

Se obtuvieron los siguientes resultados de humedad (figura 19). Hojas 64.51%, 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.

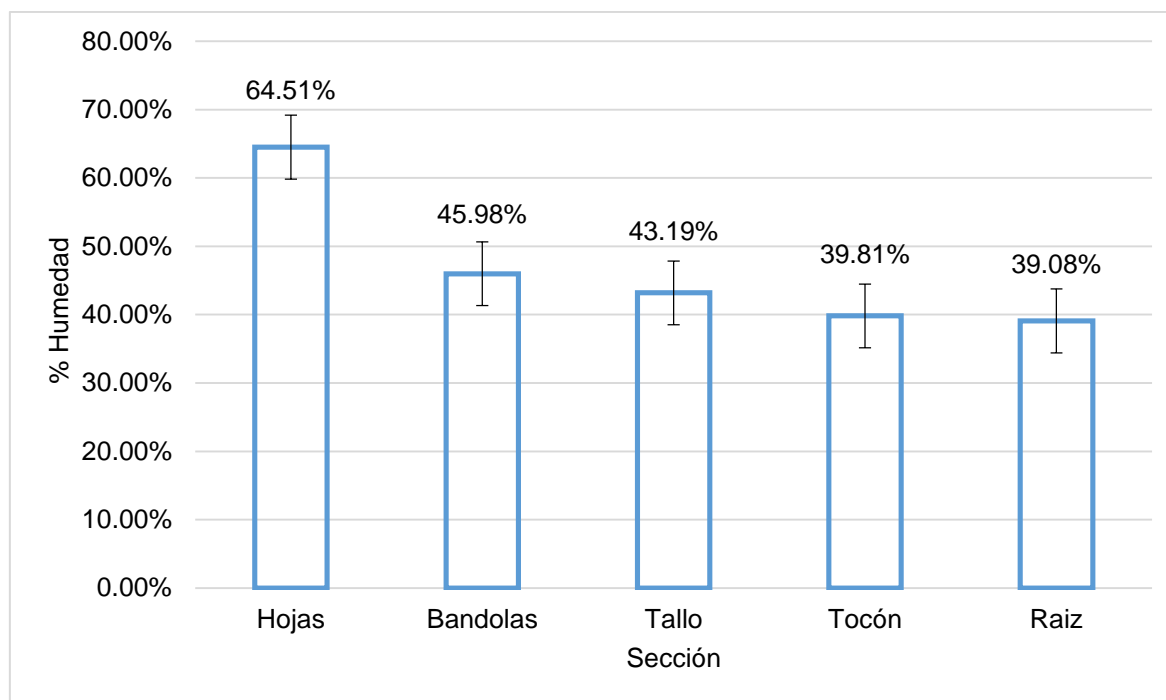


Figura 19. Porcentaje de humedad por sección.

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 4 y A 1), 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.

Cuadro 5. 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%).

### 4.3 Biomasa seca por sección.

Se determinó que la raíz representa un 32.93% de la biomasa seca total (figura 20). Castellanos *et al.* (2010) en el estudio de línea base de carbono en cafetales realizado en Guatemala reporta que un 26.6% de la biomasa seca total lo representa la raíz. Teniendo una diferencia de 6.33%, con respecto a los datos obtenidos.

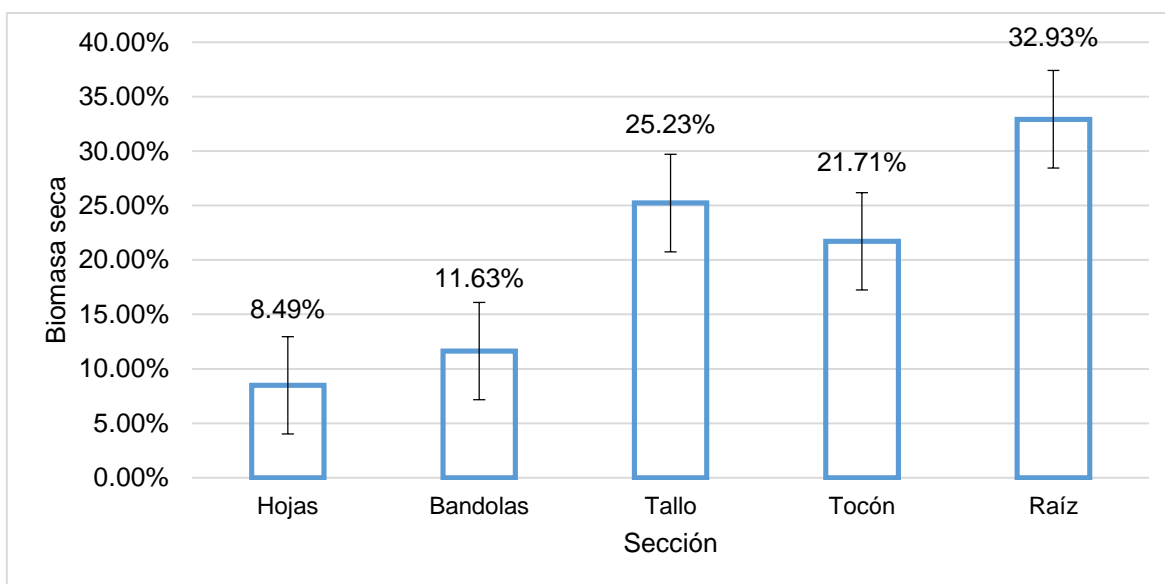


Figura 20. Porcentaje promedio de peso de biomasa por sección.

### 4.4 Carbono y dióxido de carbono fijado por sección.

La figura 21 muestra el contenido promedio de carbono y dióxido de carbono fijado en las diferentes secciones de una planta de café expresado en porcentaje. En la raíz es donde se fija la mayor cantidad de C y CO<sub>2</sub>, Castellanos *et al.* 2010 reporta que el 21% de carbono se fija en la raíz. Y en el estudio realizado se encontró un porcentaje de 33.11% una diferencia de 12.10%, para carbono y dióxido de carbono. El carbono y el CO<sub>2</sub> se estimaron según la IPCC 2006. Las principales diferencias de contenido de carbono y CO<sub>2</sub> 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 en 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

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

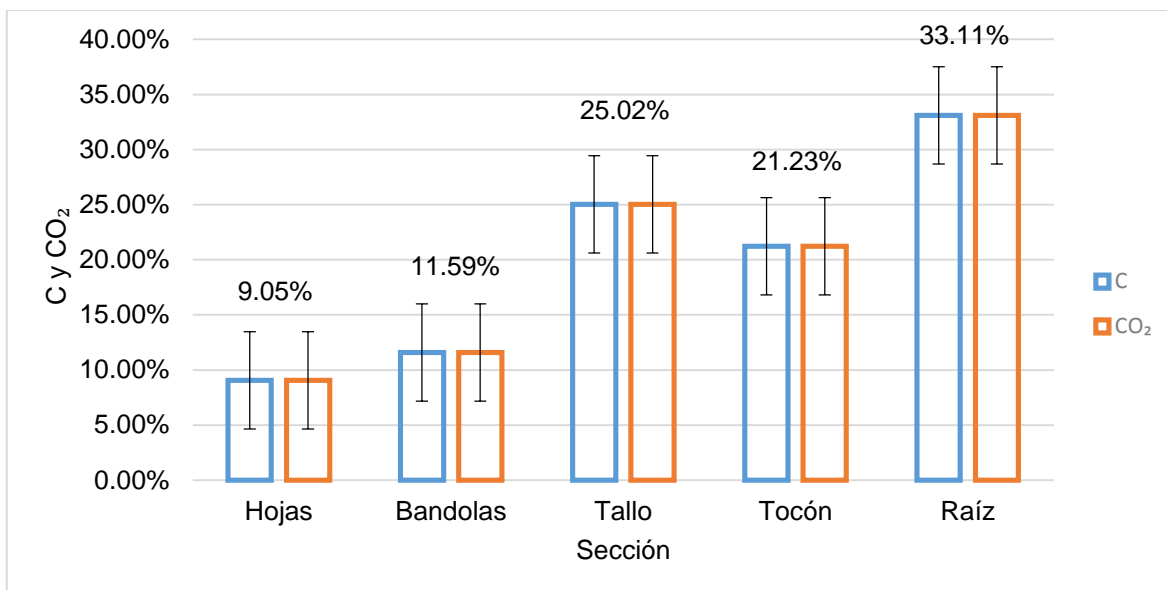


Figura 21. Porcentaje promedio de carbono y dióxido de carbono fijado por sección.

#### 4.5 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 paraboloides 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  $0.62 \text{ g cm}^{-3}$ , el valor promedio determinado para rebrotes y tocón (cuadro 6) fue de  $0.795 \text{ g cm}^{-3}$ , existiendo una diferencia de  $0.175 \text{ g cm}^{-3}$ .

Cuadro 6. Resumen densidad de madera.

Variable	N	Media	D.E	E.R	CV	Mínimo	Máximo
<b>Factor de forma</b>	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 <sup>-03</sup>	5.00*	0.70	0.88
$\rho_{\text{tocón}} \text{ g cm}^{-3}$	75	0.79	0.04	4.6E <sup>-03</sup>	4.84*	0.63	0.90

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

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

#### 4.6 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 cual solo se incluyó la biomasa seca arriba del suelo en kilogramos del tocón, rebrotes, bandolas y hojas en el análisis de regresión. 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 que incluye la biomasa de bandolas y hojas.

##### 4.6.1 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 grafica 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 grafica de los modelos de regresión (figura A 2). Se observó, que el modelo que mejor se ajusto es el de potencia. Por lo antes expuesto y por los resultados obtenidos se eligió este modelo, ya que se conoce como una relación alométrica y es el que mayor  $R^2$  presento en la evaluación gráfica (cuadro A 3).

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 22) (ecuación 9).

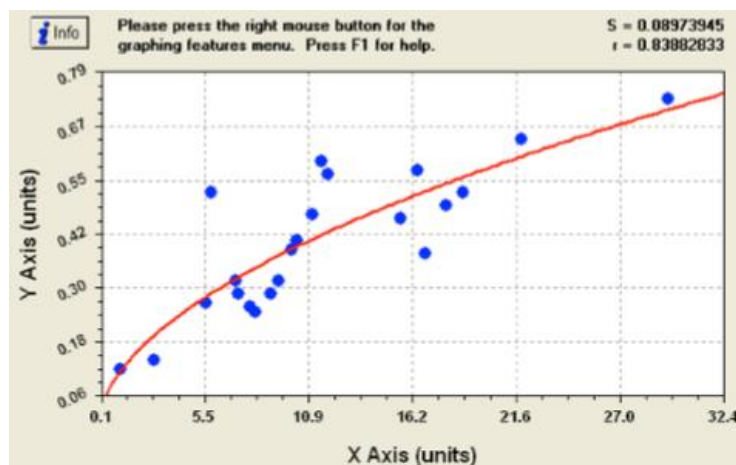


Figura 22. Análisis gráfico del modelo de potencia de Castellanos *et al.* (2010) para tocones.

$$\text{Ecuación del modelo: } y = 0.1124X^{0.5435} \quad R^2 = 0.70 \quad (9)$$

El modelo alométrico de potencia desarrollado (figura 23) (ecuación 10), obtuvo un coeficiente de determinación ( $R^2$ ) de 0.692, (Cuadro A 5) 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%.

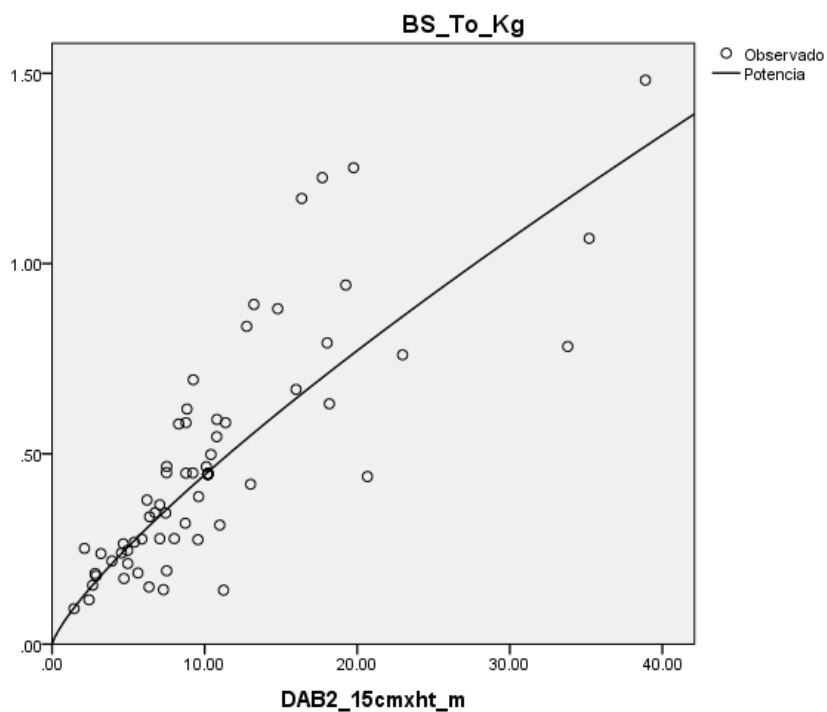


Figura 23. Relación de la biomasa seca de los tocones (eje Y) y el  $DAB^2$  a 15 cm \* ht\_m (eje X).

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

Donde:

$B_{\text{tocón}}$  = biomasa seca (Kg)

$a$ : 0.071 (Constante)

$X$ :  $DAB^2_{15 \text{ cm}} * h_{\text{to}_m}$

$b$ : 0.794 (Coeficiente de regresión)

El análisis de varianza indica que estadísticamente las constantes del modelo son significativas (cuadro A 6) con un intervalo de confianza del 95%. En el cuadro A 4 se resume la significancia de los coeficientes propiamente dichos. Así mismo, se comprobó mediante la gráfica P-P normal que los datos de la variable independiente biomasa seca en kilogramos, cumplan con una distribución normal (figura 24).

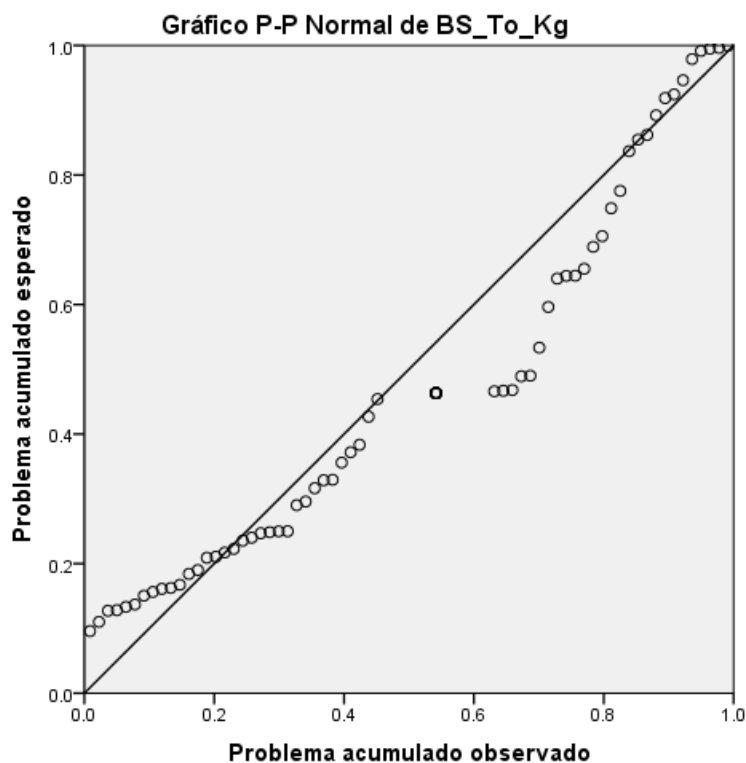


Figura 24. Prueba de normalidad de la variable independiente biomasa seca de tocones en kilogramos. Gráfico P-P Normal.



#### 4.6.2 Modelo alométrico para rebrotes.

Para desarrollar el modelo alométrico de rebrotes 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 grafica las pruebas de regresión con diferentes modelos. Se observó, que el modelo de potencia tiene mejor ajuste (figura A 3). Por lo antes expuesto y por los resultados obtenidos se eligió este modelo, ya que se conoce como una relación alométrica y es el que mayor  $R^2$  presento 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 25) (ecuación 11).

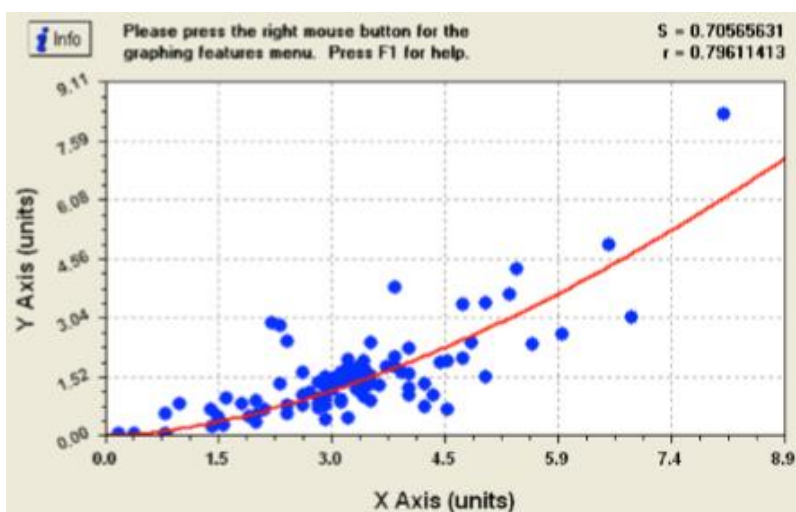


Figura 25. Análisis grafico del modelo de potencia de Castellanos et al. (2010) para rebrotes.

$$\text{Ecuación del modelo: } 0.1955X^{1.648} \quad R^2 = 0.63 \quad (11)$$

El modelo alométrico de potencia desarrollado (figura 26) (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%.

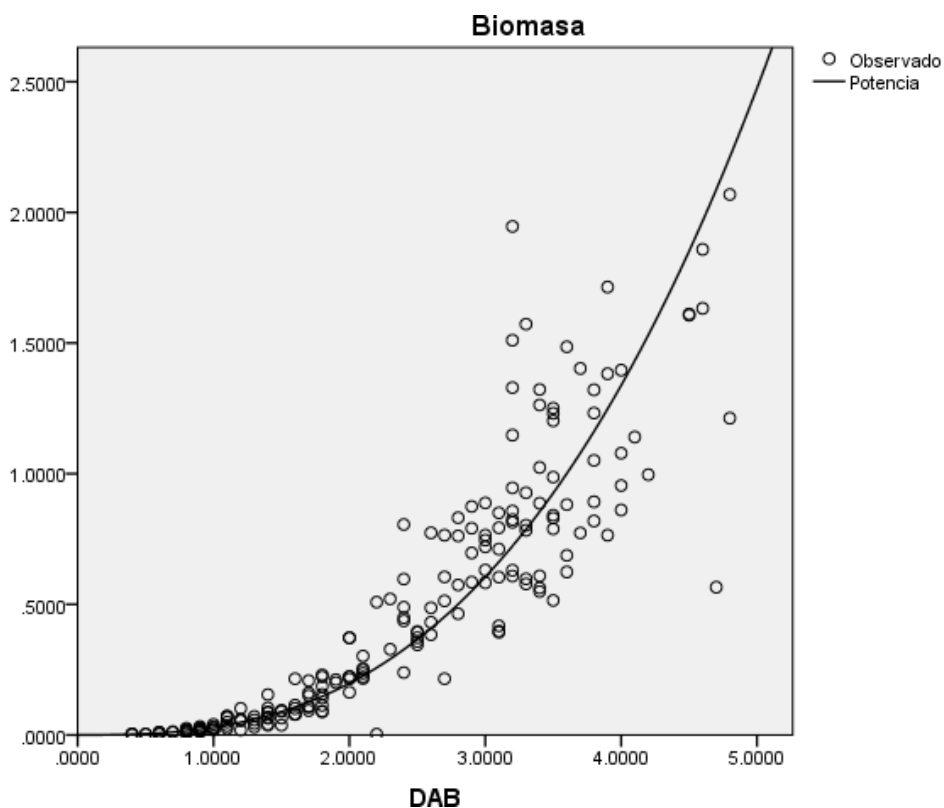


Figura 26. Relación de la biomasa seca de los rebrotes (eje Y) y el DAB en cm (Eje X).

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

$B_{rebrotos}$  = 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 (cuadro A 9), en el cuadro A 10 se resume la significancia de los coeficientes propiamente dichos. Así mismo, se comprobó que los datos de la variable independiente biomasa seca de rebrotes en kilogramos, tienen una distribución normal mediante la gráfica P-P normal (figura 27).

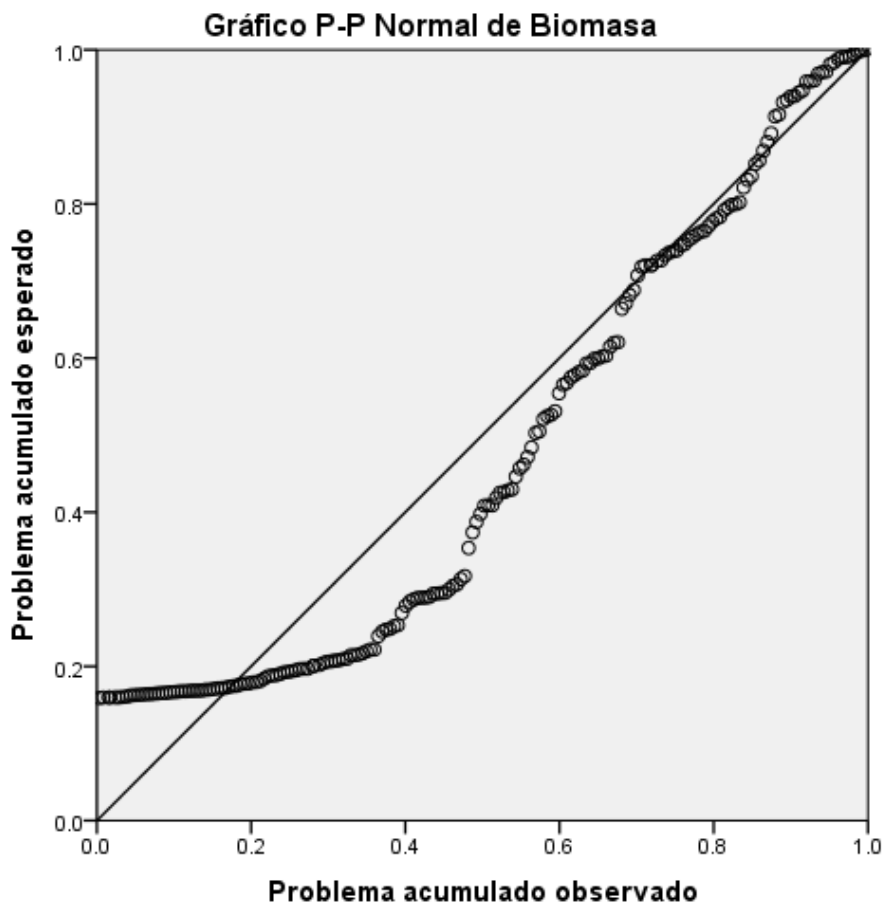


Figura 27. Prueba de normalidad de la variable independiente biomasa seca de rebrotes en kilogramos. Gráfico P-P Normal.

#### 4.7 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 rebrotes. 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<sub>2</sub> 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:

$$Biomasa\ total = \left( \sum_{i=1}^n Biomasa\ tocón + \sum_{i=1}^n Biomasa\ rebrotes \right) * \% \text{ de raiz}$$

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 Dióxido de carbono se basa en la relación del peso de ratio de la molécula de (CO<sub>2</sub>) (44/12) (IPCC 2006).

#### 4.8 Estimación de carbono y CO<sub>2</sub> 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 rebrotes resumidos en el cuadro 4, se proyectaron las estimaciones de biomasa seca, carbono y CO<sub>2</sub> 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. Obteniendo los resultados de los cuadros 7 y 8.

Cuadro 7. Estimaciones de biomasa seca, carbono y CO<sub>2</sub> fijado arriba del suelo, por finca.

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

En cuanto al carbono y CO<sub>2</sub> fijado, el mayor promedio lo registro la Finca Las Nubes con 1,114.61/4,086.91 toneladas de C y CO<sub>2</sub>, el menor promedio lo registro la Finca el Faro con 155.30/569.45 toneladas de C y CO<sub>2</sub> fijado.

Cuadro 8. Estimaciones totales de biomasa seca, carbono y CO<sub>2</sub> fijado por finca.

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

## 5. 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 secciones y en el procedimiento de preparación de muestras para el análisis de laboratorio.
- Las metodologías para la elaboración de modelos alométricos desarrolladas por otros autores, sirvieron de base para la adaptación de la metodología del estudio. Esto permitió obtener resultados satisfactorios para el desarrollo de los modelos alométricos para estimar 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 desarrollado. Estos resultados obtenidos son la determinación del contenido de carbono y CO<sub>2</sub> de las plantas aplicando 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, la relación del producto del diámetro de la base a 15 centímetros elevado al cuadrado multiplicado la altura en metros, son menos dispersos si los valores calculados son menores a 20 unidades. Y para rebrotes los resultados son menos dispersos si los diámetros de las bases son menores a 3.5 cm.

## 6. Recomendaciones.

- Se recomienda hacer pruebas de estimación de biomasa y carbono en plantaciones de café, en otras cordilleras y elevaciones, para hacer comparaciones de variabilidad, con el propósito de ajustar un solo modelo alométrico que pueda ser utilizado a nivel nacional.
- Se recomienda la aplicación del modelo alométrico para rebrotes en cafetos de plantilla, la variable a utilizar es el diámetro de la base en centímetros.
- Para la estimación de biomasa seca de cafetos, se recomienda hacer parcelas de 25 m<sup>2</sup> (2.5 m \* 10.0 m), y multiplicar la biomasa obtenida por 400, factor de expansión, para proyectar kilogramos de materia seca por hectárea o toneladas de materia seca por hectárea.
- Luego aplicar los factores (0.47) de fracción de carbono y el peso de ratio molecular del dióxido de carbono (44/12), para obtener kilogramos o toneladas de carbono y dióxido de carbono fijado por hectárea respectivamente.
- Para agregar la fracción de carbono contenido en los frutos se recomienda utilizar el 10% que reporta Castellanos *et al.* (2010) en base al peso total de carbono determinado en un cafeto.

## 7. Bibliografía.

- Acebes, JL; Encina, A; Pertejo, D. 2019.** Paredes celulares de plantas: composición, estructura y aplicaciones (póster). *In XI Jornada de genética y biotecnología.* Universidad de León, España.
- Acosta, M; Etchevers, JD; Monreal, C; Quednow, K; Hidalgo, C. 2001.** Un método para la medición del carbono en los compartimientos subterráneos (raíces y suelo) de sistemas forestales y agrícolas en terrenos de ladera en México: método estándar para el análisis químico del carbono. Chile. Valdivia. 2 p.
- Aristizábal, J.D. 2011.** Desarrollo de modelos de biomasa aérea en sombríos de cafeto (*Coffea arabica* L.) mediante datos simulados: modelos alométricos utilizados para estimar los datos simulados. *Revista U.D.C.A Actualidad & Divulgación Científica* 14(1): 49-56.
- Alvarado Dima, DM; Evangelista Méndez, RE; Mejía Figueroa, KL. 2004.** Identificación de territorios de café (*Coffea Arabica*) de calidad en El Salvador. Tesis Ing. Agro. San Salvador, El Salvador. UES. 99 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](http://www.rivasdaniel.com/pdf/GUIA_DE_CUBICACION_MADERA.pdf)
- Carpita, NC y Pérez-Almeida, I. 2006.** Las  $\beta$ -Galactosidasas y la dinámica de la pared celular (en línea). INCI. 31(7): 476-483 p. consultado 10 feb. 2020. Disponible en [http://ve.scielo.org/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S0378-18442006000700004](http://ve.scielo.org/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0378-18442006000700004).
- Castellanos, E; Quilo, A; Pons, D. 2010.** Estudio de línea base de carbono en cafetales: resumen. Guatemala. UVG. 48 p.
- CECAFÉ (Consejo Estatal del Café, Colombia). 2009.** Paquete tecnológico para el cultivo de café orgánico en el estado de Colima. Estado de Colima, Colombia. 58 p.
- CEPSA (Compañía Energética Global Integrada). 2015.** El cambio climático y los gases de efecto invernadero (GEI) en cepsa (en línea). Consultado feb. 2020. Disponible en [https://www.cepsa.com/stfls/CepsaCom/Coorp\\_Comp/Medio%20Ambiente\\_Seguridad\\_Calidad/Art%C3%ADculos/Dossier-Cambio-Climatico-y-GEI.pdf](https://www.cepsa.com/stfls/CepsaCom/Coorp_Comp/Medio%20Ambiente_Seguridad_Calidad/Art%C3%ADculos/Dossier-Cambio-Climatico-y-GEI.pdf)
- Chave, J; Condit, R; Aguilar, S; Hernández, A; Lao, S; Pérez, R. 2004.** Error propagation and scaling for tropical forest biomass estimates. Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Series B, Biological Sciences, 359(1443): 409–420.
- 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/>
- CSC (Consejo Salvadoreño del Café, El Salvador). 2019.** Estadísticas cafetaleras: informe oficial (en línea, sitio web). Santa tecla, La Libertad, El Salvador. 19 p. Consultado 03 ene. 2020. Disponible en <http://www.csc.gob.sv/estadisticas/>
- 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.
- De las Rivas, J. 2000.** La luz y el aparato fotosintético. *In* Fundamentos de fisiología vegetal. Barcelona, España. McGraw-Hill. 131-153 p.
- De las Rivas, J. 2000a.** Utilización de la energía luminosa en la fotosíntesis. *In* Fundamentos de fisiología vegetal. Barcelona, España. McGraw-Hill. 155-172 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.
- Frías Domínguez, MD; Fernández Fernández, J; Sordo, CM. 2012.** Estadística: modelos de regresión (en línea). Universidad de Cantabria. Consultado feb. 2020. Disponible en [https://ocw.unican.es/pluginfile.php/1156/course/section/1396/tema\\_02.pdf](https://ocw.unican.es/pluginfile.php/1156/course/section/1396/tema_02.pdf)
- García, K. 2016.** Zonas cafetaleras de El Salvador (en línea, diapositiva). Consultado 03 ene. 2020. Disponible en <https://prezi.com/mn17sgfdijsb/zonas-cafetaleras-de-el-salvador/>
- González, AM. 2013.** Morfología de plantas vasculares: pared celular (en línea, sitio web). Consultado 10 feb. 2020. Disponible en <http://www.biologia.edu.ar/botanica/tema7/7-4comunicac.htm>
- Hernández, JL. 2007.** Métodos para el análisis físico de los suelos: Manual de laboratorio. La Habana, Cuba. INCA. 54 p.
- Honorato Pinto, R. 2000.** Manual de edafología. 4 ed. Alfa omega. Distrito federal, México. 267 p.
- 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>
- Jaramillo, VJ. 2004.** Cambio climático, una visión desde México: El ciclo global del carbono. Coyoacán, México. Instituto Nacional de Ecología. Secretaria del Medio Ambiente y Recursos Naturales. 75 p.
- Laguna, C. 2014.** Correlación y regresión lineal (en línea). Instituto Aragonés de Ciencias de la Salud. Consultado feb. 2020. Disponible en <http://www.ics-aragon.com/cursos/salud-publica/2014/pdf/M2T04.pdf>
- MARN (Ministerio de Medio Ambiente y Recursos Naturales, El Salvador). 2018.** Inventario Nacional de Bosques de El Salvador. San Salvador, El Salvador. 426 p.

- Martínez Pons, JA. 2012.** Enseñanza de la química: la corona de Región y el Eureka de Arquímedes. *Revista de la Real Sociedad Española de Química.* 108(2):119-125 p.
- Medrano, H; Flexas, J. 2000b.** Fijación del bióxido de carbono y de foto asimilados. *In* Fundamentos de fisiología vegetal. Barcelona, España. McGraw-Hill. 173-185 p.
- Monro, A; Peña Chocarro, MC (eds.). 2002.** Actas del simposio café y biodiversidad. 2 ed. Esp. San Salvador. El Salvador. TNHM-UES. 71 p.
- Monroig, I. s.f.** Morfología del cafeto (en línea). Puerto Rico. 4 p. Consultado 20 may. 2017. Disponible en [http://academic.uprm.edu/mmonroig/HTMLObj-1858/Morfologia\\_cafeto2.pdf](http://academic.uprm.edu/mmonroig/HTMLObj-1858/Morfologia_cafeto2.pdf)
- Mora, N. 2008.** Agrocadena del café (en línea). Costa Rica. 49 p. Consultado 20 may. 2017. Disponible en <http://www.mag.go.cr/bibliotecavirtual/a00080.PDF>
- ONU (Organización de las Naciones Unidas, Chile). 2018.** La Agenda 2030 y los Objetivos de Desarrollo Sostenible: una oportunidad para América Latina y el Caribe (en línea). Santiago de Chile, Chile, s. e. 93 p. Consultado 03 ene. 2020. Disponible en [https://repositorio.cepal.org/bitstream/handle/11362/40155/24/S1801141\\_es.pdf](https://repositorio.cepal.org/bitstream/handle/11362/40155/24/S1801141_es.pdf)
- ONU (Organización de las Naciones Unidas, Estados Unidos). 2015.** Objetivos de Desarrollo Sostenible (en línea, sitio web). Consultado 03 ene. 2020. Disponible en <https://www.un.org/sustainabledevelopment/es/>
- 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.
- Patiño Cadavid, MM. 2014.** Contribuciones del trabajo colaborativo y la experimentación para en cambio conceptual en la enseñanza del progreso de fotosíntesis en el cloroplasto. Tesis magister en la enseñanza de las ciencias exactas y naturales. Medellín, Colombia. 98 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.

**PNUD (Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo, Estados Unidos de América). 2017.** Objetivos de desarrollo sostenible (en línea, sitio web). Consultado 12 may. 2015. Disponible en <http://www.undp.org/content/undp/es/home/sustainable-development-goals/>

**PROCAFE (Fundación Salvadoreña para Investigación del Café, El Salvador). 2004.** Manejo de cafetales y árboles de sombra: Modulo de capacitación N.º 1. Santa Tecla, El Salvador, PROCAFE. 46 p.

**Revilla, G; Zarra, I. 2000.** La fisiología vegetal y su impacto social: la célula vegetal. *In* Fundamentos de fisiología vegetal. Barcelona, España. McGraw-Hill. 1-16 p.

**Rodríguez N; Sambrano Franco, DA; 2010.** Los subproductos del café: fuente de energía renovable. Revista CENICAFE, avances técnicos 393. Caldas, Colombia. 5p.

**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 Días, 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.

**Schlegel, B; Gayoso, J; Guerra, J. 2000.** Manual de procedimientos para inventario de carbono en ecosistemas forestales: medición de la capacidad de captura de carbono en bosques de Chile y promoción en el mercado mundial. Valdivia, Chile. 17 p.

**Segura, J. 2013.** Introducción al desarrollo: Concepto de hormona vegetal. *In* Fundamentos de fisiología vegetal. Barcelona, España. 2 ed. McGraw-Hill. 351-376 p.

**Segura, M; Hernán, Andrade, HJ. 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.

- 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.
- Suarez Ibijes, MO. 2011.** Regresión potencial mediante el método de mínimos cuadrados (en línea). Consultado feb. 2020. Disponible en <https://www.monografias.com/trabajos89/regresion-potencial-metodo-minimos-cuadrados/regresion-potencial-metodo-minimos-cuadrados.shtml>
- Van Breugel, M; Ransijn, J; Craven, D; Bongers, F; Hall, JS. 2011.** Estimating carbon stock in secondary forests: Decisions and uncertainties associated with allometric biomass models. Forest ecology and management, 262 (8): 1648–1657.
- Wunder, S. 2005.** Pago por servicios ambientales: principios básicos esenciales. Jakarta, Indonesia. CIFOR Occasional paper No 42 (s). 32 p.
- Yner Juárez, F. 2014.** Dasometría: apuntes de clase y actividades prácticas. Cochabamba, Bolivia. 103 p.

## 8. Anexos

### 8.1 Figuras.

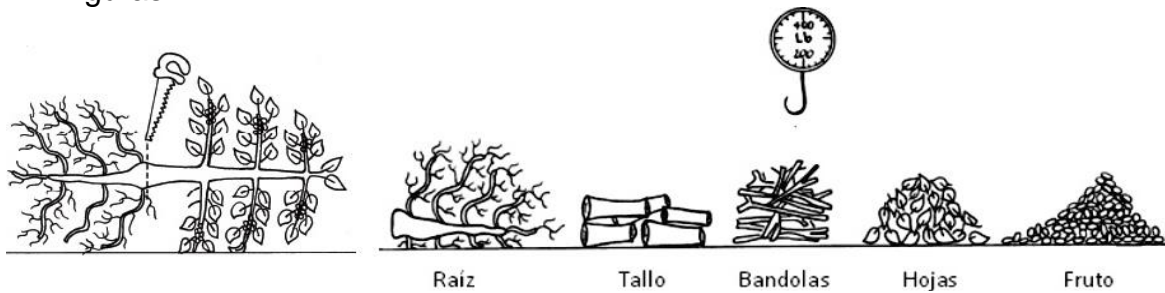


Figura A 1. Secuencia de muestreo aplicando el método destructivo en plantas de café.

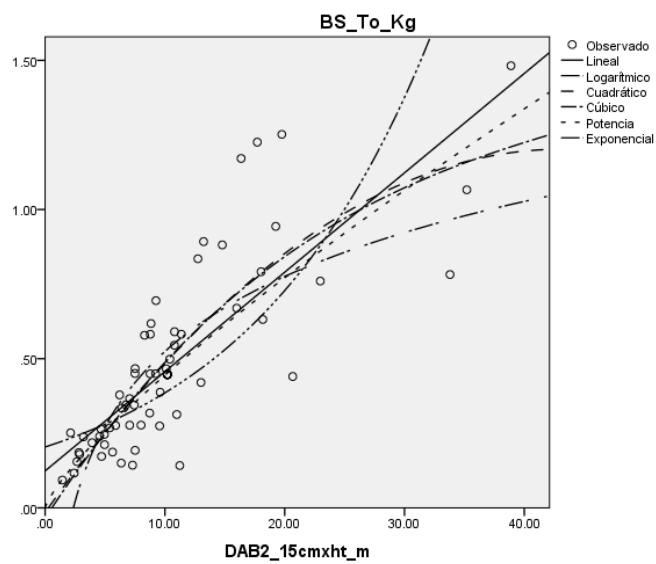


Figura A 2. Análisis general de las regresiones que mejor se ajustan al modelo, relacionando biomasa seca de tocones y el producto del DAB2 a 15 cm multiplicado por la altura de toques.

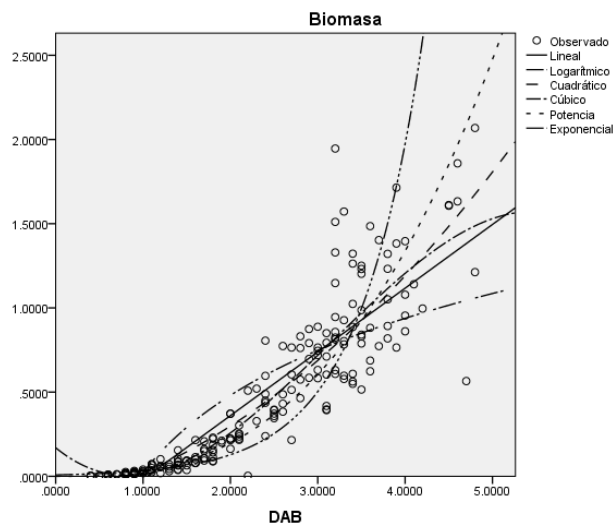


Figura A 3. Análisis general de las regresiones que mejor se ajustan al modelo, relacionando biomasa seca de rebrotes y diámetro de la base.

## 8.2 Cuadros.

Cuadro A 1. Grado de representación de la media aritmética, para distintos coeficientes de variabilidad.

<b>Valor del coeficiente de variabilidad (CV)</b>	<b>Grado en que la media representa a la serie</b>
<b>De 0 a menos de 10%</b>	Media altamente representativa.
<b>De 10 a menos de 20%</b>	Media bastante representativa.
<b>De 20 a menos de 30%</b>	Media tiene representatividad.
<b>De 30 a menos de 40%</b>	Media cuya representación es dudosa.
<b>De 40% o más</b>	Media carente de representatividad.

**Fuente:** tomado de Bonilla 1993.

Cuadro A 2. Interpretación del coeficiente correlación "r" de Pearson

<b>Coeficiente "r" de Pearson</b>	<b>Intensidad de relación de variables</b>
<b><math>0 \leq r \leq 0.20</math></b>	Correlación indiferente o nula.
<b><math>0.20 \leq r \leq 0.40</math></b>	Correlación baja.
<b><math>0.40 \leq r \leq 0.70</math></b>	Correlación sustancial o marcada.
<b><math>0.70 \leq r \leq 1.00</math></b>	Correlación alta o perfecta.

**Fuente:** adaptado de Pacheco 1994.

Cuadro A 3. Resumen de ajuste de los modelos para tocones y la significancia.

<b>Modelo</b>	<b>R</b>	<b>R cuadrado</b>	<b>R cuadrado ajustado</b>	<b>Error estándar de la estimación</b>	<b>P-valor</b>
<b>Lineal</b>	0.807	0.652	0.641	0.173	0.000
<b>Logarítmico</b>	0.784	0.615	0.609	0.182	0.000
<b>Cuadrático</b>	0.829	0.688	0.679	0.165	0.000
<b>Cubico</b>	0.830	0.688	0.674	0.166	0.000
<b>Potencia</b>	0.832	0.692*	0.688	0.336	0.000
<b>Exponencial</b>	0.747	0.558	0.551	0.403	0.000

Cuadro A 4. Resumen del modelo para la variable independiente DAB<sup>2</sup> a 15 cm \* ht\_m.

<b>R</b>	<b>R<sup>2</sup></b>	<b>R<sup>2</sup> ajustado</b>	<b>Error estándar de la estimación</b>
<b>0.832</b>	0.692	0.688	0.336

Cuadro A 5. Análisis de varianza para la regresión de la variable independiente  $DAB^2$  a 15 cm \* ht\_m.

	Suma de cuadrados	gl	Media cuadrática	F	P-valor
<b>Regresión</b>	17.791	1	17.791	157.209	0.000
<b>Residuo</b>	7.922	70	0.113		
<b>Total</b>	25.713	71			

Cuadro A 6. Significancia de los coeficientes del modelo de regresión para la variable independiente Ln (Biomasa).

	Coeficientes no estandarizados		Coeficientes estandarizados	t	P-valor
	B	Error estándar	Beta		
<b>ln(<math>BAD^2</math> a 15 cm * ht_m)</b>	0.794	0.063	0.832	12.538	0.000
<b>(Constante)</b>	0.071	0.010		7.006	0.000

Cuadro A 7. Resumen de ajuste de los modelos y la significancia

Modelo	R	R cuadrado	R cuadrado ajustado	Error estándar de la estimación	P-valor
<b>Logarítmico</b>	0.799	0.638	0.636	0.309	0.000
<b>Cuadrático</b>	0.901	0.812	0.810	0.223	0.000
<b>Potencia</b>	0.956	0.913	0.913	0.501	0.000
<b>Exponencial</b>	0.888	0.789	0.788	0.781	0.000

Cuadro A 8. Resumen del modelo para la variable independiente diámetro de la base de rebrotes.

R	R <sup>2</sup>	R <sup>2</sup> ajustado	Error estándar de la estimación
<b>0.956</b>	0.914	0.914	0.496



Cuadro A 9. Análisis de varianza para la regresión de la variable independiente diámetro de la base de rebrotes.

	<b>Suma de cuadrados</b>	<b>gl</b>	<b>Media cuadrática</b>	<b>F</b>	<b>P-valor</b>
<b>Regresión</b>	507.785	1	507.785	2067.364	0.000
<b>Residuo</b>	47.650	194	0.246		
<b>Total</b>	555.435	195			

Cuadro A 10. Significancia de los coeficientes del modelo de regresión para la variable independiente Ln (Biomasa).

	<b>Coeficientes no estandarizados</b>		<b>Coeficientes estandarizados</b>	<b>t</b>	<b>P-valor</b>
	<b>B</b>	<b>Error estándar</b>	<b>Beta</b>		
<b>ln(DAB)</b>	2.758	0.061	0.956	45.468	0.000
<b>(Constante)</b>	0.029	0.002		18.134	0.000