

UNIVERSIDAD RAFAEL LANDÍVAR

FACULTAD DE CIENCIAS AMBIENTALES Y AGRÍCOLAS

LICENCIATURA EN INGENIERÍA FORESTAL CON ÉNFASIS EN SILVICULTURA Y MANEJO DE BOSQUES

GENERACIÓN DE UN MODELO MATEMÁTICO PARA LA ESTIMACIÓN DE BIOMASA Y
CUANTIFICACIÓN DE CARBONO EN PLANTACIONES DE SAN JUAN (*Vochysia guatemalensis*
Donnell-Smithii)
TESIS DE GRADO

GERSON ARIEL MORALES RODRIGUEZ

CARNET 22198-06

SAN JUAN CHAMELCO, ALTA VERAPAZ, SEPTIEMBRE DE 2017

CAMPUS "SAN PEDRO CLAVER, S . J." DE LA VERAPAZ

UNIVERSIDAD RAFAEL LANDÍVAR

FACULTAD DE CIENCIAS AMBIENTALES Y AGRÍCOLAS

LICENCIATURA EN INGENIERÍA FORESTAL CON ÉNFASIS EN SILVICULTURA Y MANEJO DE BOSQUES

GENERACIÓN DE UN MODELO MATEMÁTICO PARA LA ESTIMACIÓN DE BIOMASA Y
CUANTIFICACIÓN DE CARBONO EN PLANTACIONES DE SAN JUAN (*Vochysia guatemalensis*

Donnell-Smithii)

TESIS DE GRADO

TRABAJO PRESENTADO AL CONSEJO DE LA FACULTAD DE
CIENCIAS AMBIENTALES Y AGRÍCOLAS

POR

GERSON ARIEL MORALES RODRIGUEZ

PREVIO A CONFERÍRSELE

EL TÍTULO DE INGENIERO FORESTAL CON ÉNFASIS EN SILVICULTURA Y MANEJO DE BOSQUES EN EL
GRADO ACADÉMICO DE LICENCIADO

SAN JUAN CHAMELCO, ALTA VERAPAZ, SEPTIEMBRE DE 2017

CAMPUS "SAN PEDRO CLAVER, S . J." DE LA VERAPAZ

AUTORIDADES DE LA UNIVERSIDAD RAFAEL LANDÍVAR

RECTOR: P. MARCO TULIO MARTINEZ SALAZAR, S. J.
VICERRECTORA ACADÉMICA: DRA. MARTA LUCRECIA MÉNDEZ GONZÁLEZ DE PENEDO
VICERRECTOR DE INVESTIGACIÓN Y PROYECCIÓN: ING. JOSÉ JUVENTINO GÁLVEZ RUANO
VICERRECTOR DE INTEGRACIÓN UNIVERSITARIA: P. JULIO ENRIQUE MOREIRA CHAVARRÍA, S. J.
VICERRECTOR ADMINISTRATIVO: LIC. ARIEL RIVERA IRÍAS
SECRETARIA GENERAL: LIC. FABIOLA DE LA LUZ PADILLA BELTRANENA DE LORENZANA

AUTORIDADES DE LA FACULTAD DE CIENCIAS AMBIENTALES Y AGRÍCOLAS

DECANO: DR. ADOLFO OTTONIEL MONTERROSO RIVAS
VICEDECANA: LIC. ANNA CRISTINA BAILEY HERNÁNDEZ
SECRETARIO: MGTR. LUIS MOISES PEÑATE MUNGUÍA
DIRECTOR DE CARRERA: MGTR. JOSÉ MANUEL BENAVENTE MEJÍA

NOMBRE DEL ASESOR DE TRABAJO DE GRADUACIÓN

ING. PEDRO GABRIEL SILVESTRE DELGADO

TERNA QUE PRACTICÓ LA EVALUACIÓN

MGTR. EDWIN ESTUARDO VAIDES LÓPEZ
ING. ROBERTO WALDEMAR MOYA FERNÁNDEZ
ING. SELVYN RUBÉN DARIO GONZÁLEZ URRUTIA

San Juan Chamelco, Alta Verapaz
15 de agosto de 2017


Honorables miembros de la
Comisión de Trabajos de Graduación
Facultad de Ciencias Ambientales y Agrícolas
Universidad Rafael Landívar
Guatemala, Ciudad

Respetables miembros de la Comisión:

Por este medio hago constar que he procedido a revisar el Informe Final de Tesis del estudiante Gerson Ariel Morales Rodriguez, que se identifica con carné 2219806, titulado "**Generación de un modelo matemático para la estimación de biomasa y cuantificación de carbono en plantaciones de San Juan (*Vochysia guatemalensis* Donnell-Smithii)**" el cual considero que cumple con los requisitos establecidos por la Facultad para ser aprobado.

Sin otro particular, me suscribo de ustedes.

Atentamente,



Ing. Ftal. Pedro Gabriel Silvestre Delgado
Colegiado No. 4846
Asesor



Orden de Impresión

De acuerdo a la aprobación de la Evaluación del Trabajo de Graduación en la variante Tesis de Grado del estudiante GERSON ARIEL MORALES RODRIGUEZ, Carnet 22198-06 en la carrera LICENCIATURA EN INGENIERÍA FORESTAL CON ÉNFASIS EN SILVICULTURA Y MANEJO DE BOSQUES, del Campus de La Verapaz, que consta en el Acta No. 06133-2017 de fecha 3 de septiembre de 2017, se autoriza la impresión digital del trabajo titulado:

GENERACIÓN DE UN MODELO MATEMÁTICO PARA LA ESTIMACIÓN DE BIOMASA Y CUANTIFICACIÓN DE CARBONO EN PLANTACIONES DE SAN JUAN (*Vochysia guatemalensis* Donnell-Smithii)

Previo a conferírsele el título de INGENIERO FORESTAL CON ÉNFASIS EN SILVICULTURA Y MANEJO DE BOSQUES en el grado académico de LICENCIADO.

Dado en la ciudad de Guatemala de la Asunción, a los 8 días del mes de septiembre del año 2017.



LIC. ANNA CRISTINA BAILEY HERNÁNDEZ, VICEDECANA
CIENCIAS AMBIENTALES Y AGRÍCOLAS
Universidad Rafael Landívar

AGRADECIMIENTOS

A:

Dios, por darme fortaleza, sabiduría e inteligencia para poder superarme día a día, alcanzar esta meta y compartir la alegría con mi familia.

Mi asesor Ing. Pedro Gabriel Silvestre Delgado por su asesoría, consejos y aportes valiosos en el trabajo de investigación.

Ing. MSc. Edwin Estuardo Vaides López por sus aportes valiosos en proceso de investigación.

Ing. Roberto Waldemar Moya por su apoyo como coordinador y su enseñanza en proceso de estudios.

Ing. Selvin González Urrutia por su valioso aporte en el proceso de elaboración del informe y enseñanza en el proceso de estudios.

Ing. Gabriela Meza por su valioso apoyo en el proceso de laboratorio en la Universidad Rafael Landívar sede La Verapaz.

Personal del Centro de Estudios Ambientales y de Biodiversidad de la Universidad del Valle de Guatemala por su apoyo en el proceso de análisis químico de las muestras.

Mis amigos Fredy y Nery Morales Rodriguez, Ing. Fredy Bolaños, Marco Amalem y Rocael Rolando Rodríguez por su valioso apoyo en el proceso de campo y gabinete.

DEDICATORIA

A:

DIOS: Por darme su infinito amor, sabiduría e inteligencia para poder alcanzar la meta de graduarme y poder compartir este logro con mi familia.

Mis Padres: Vilma América Rodríguez y Efraín Morales a quienes respeto y admiro mucho. Gracias por su amor y por enseñarme a ser una persona luchadora con deseos de superación.

Mi Esposa: Yasmin Fabiola Ramos Magaña por su amor, paciencia, apoyo y comprensión en todo momento.

Mis Hijas: Brisey Andrea y Yaslin Ariani Morales Ramos, las amo y son mi fuerza para seguir adelante y alcanzar mis metas.

Mi Familia: Hermanos, sobrinas, primos, tíos y abuelos; que de una u otra forma han sido parte importante en mi proceso de formación.

Mis Amigos: Por su apoyo, compañía y formar parte de mi desarrollo integral, con mucho aprecio

ÍNDICE GENERAL

RESUMEN.....	i
1. INTRODUCCIÓN.....	1
2. MARCO TEÓRICO.....	2
2.1.MARCO CONCEPTUAL.....	2
2.1.1. Definiciones.....	2
2.1.2. Descripción de la Especie.....	9
2.2.ANTECEDENTES	14
3. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	18
3.1.DEFINICIÓN DEL PROBLEMA.....	18
3.2.JUSTIFICACIÓN DE LA INVESTIGACIÓN	19
4. OBJETIVOS	20
4.1.GENERAL.....	20
4.2.ESPECÍFICOS	20
5. METODOLOGÍA	21
5.1.LOCALIZACIÓN DEL AREA DE TRABAJO	21
5.2.UNIDADES DE ANÁLISIS	22
5.3.SELECCIÓN DE LA MUESTRA	22
5.4.PROCEDIMIENTO DE CAMPO Y LABORATORIO.....	23
5.4.1. Fase de Campo	23
5.4.2. Fase de Laboratorio	27
5.4.3. Estimación de biomasa de las ramas, ramillas, hojas y fuste	28
5.4.4 Estimación de biomasa total por árbol (kg)	30
5.4.5. Determinación del factor de conversión de carbono	31
5.4.6. Factor o Índice de expansión de biomasa.....	31
5.4.7. Estimación del contenido de carbono total por encima del suelo	32
5.4.8. Determinación del Modelo Matemático para Estimación de Biomasa	32
6. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	36

6.1. ESTIMACIÓN DE BIOMASA TOTAL POR ENCIMA DEL SUELO DE LOS ÁRBOLES DE SAN JUAN (<i>Vochysia guatemalensis</i> Donnell-Smithii).....	36
6.1.1. Medición de campo de los componentes vegetales de los árboles de San Juan (<i>Vochysia guatemalensis</i> Donnell-Smithii)	36
6.1.2. Pesos frescos de los componentes vegetales	37
6.1.3. Cálculo de la densidad de la madera del árbol San Juan.	38
6.1.4. Biomasa estimada por componente vegetal	40
6.1.5. Análisis comparativo de predicción de biomasa entre lo real y los modelos general y específico.	41
6.1.6. Prueba de hipótesis estadística de medias poblacionales dependientes (o pareadas) a los valores estimados de biomasa.	42
6.2. DETERMINACIÓN DEL FACTOR DE CONVERSIÓN DE BIOMASA A CARBONO PARA EL SAN JUAN.....	43
6.2.1. Determinación del Factor de Expansión de Biomasa (FEB)	43
6.2.2. Determinación del factor de conversión de carbono	43
6.3. ESTIMACION DE CARBONO TOTAL POR ENCIMA DEL SUELO POR ARBOL	46
6.4. GENERACIÓN DEL MODELO MATEMATICO PARA LA ESTIMACIÓN DE BIOMASA Y CUANTIFICACIÓN DE CARBONO	48
6.4.1. Diagramas de dispersión y análisis de correlación de Pearson	48
6.4.2. Análisis de Regresión Lineal Simple	50
6.4.3. Análisis de Regresión Lineal Cuadrática.....	52
6.4.4. Análisis de ajuste de modelos	55
6.4.5. Análisis de Regresión Lineal Múltiple	56
7. CONCLUSIONES.....	60
8. RECOMENDACIONES.....	61
9. REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS.....	62
10. ANEXOS	67
ANEXO 1. BOLETA DE CAMPO PARA REGISTRO DE INFORMACIÓN	67

ANEXO 2. BOLETA DE LABORATORIO PARA EVALUACION DE BIOMASA.	68
ANEXO 3. RESULTADO DEL ANALISIS DE PRUEBA DE MEDIAS DEPENDIENTES PAREADAS.....	70
ANEXO 4. ANÁLISIS DE CORRELACIÓN PARA CADA VARIABLE DASOMETRICA.....	71
ANEXO 5. ANALISIS DE REGRESION LINEAL SIMPLE	72
ANEXO 6. ANALISIS DE REGRESION LINEAL CUADRATICO O CON POLINOMIOS DE GRADO 2	74
ANEXO 7. ANÁLISIS DE REGRESIÓN LINEAL MÚLTIPLE.....	75
ANEXO 8. RESULTADOS DE LA PRUEBA DE CARBONO.....	81
ANEXO 9. COMPARACIÓN DE BIOMASA ESTIMADA EN 2 ARBOLES DONDE SE DUPLICARON LAS MUESTRAS.....	84
ANEXO 10. FACTOR DE CONVERSIÓN DE CARBONO OBTENIDOS EN LABORATORIO DE LA UNIVERSIDAD DEL VALLE DE GUATEMALA, CORRESPONDIENTES A 2 ARBOLES CON MUESTRAS DUPLICADAS....	85

ÍNDICE DE CUADROS

Cuadro 1. Propiedades físicas de la madera verde y seca para el árbol San Juan (<i>Vochysia guatemalensis</i> Donnell-Smithii).	12
Cuadro 2. Ecuaciones generadas para el cálculo de biomasa en bosques del altiplano occidental de Guatemala.	16
Cuadro 3. Árboles cortados por clase diamétrica.	22
Cuadro 4. Coordenadas de ubicación y diámetros de los árboles estudiados.	24
Cuadro 5. Clasificación de las ramas y ramillas para los árboles de San Juan (<i>Vochysia guatemalensis</i> Donnell-Smithii).	25
Cuadro 6. Distribución de los árboles muestreados por clase diamétrica para determinar el Factor de Conversión de Carbono.	31
Cuadro 7. Variables medidas en árboles muestreados.	36
Cuadro 8. Pesos estimados de los componentes vegetales de los árboles de San Juan muestreados.	37
Cuadro 9. Cálculo de la densidad de la madera del árbol San Juan.	39
Cuadro 10. Biomasa estimada por árbol muestreado.	40
Cuadro 11. Factor de Expansión de Biomasa.	43
Cuadro 12. Factor de conversión de carbono a partir de la biomasa total del árbol San Juan (<i>Vochysia guatemalensis</i> Donnell-Smithii).	44
Cuadro 13. Determinación del Factor de conversión de biomasa a carbono por componente vegetal de los árboles evaluados.	45
Cuadro 14. Cuantificación de carbono total por encima del suelo por componente vegetal.	47
Cuadro 15. Ajuste de modelos de regresión lineal evaluados.	55
Cuadro 16. Ajuste de modelos de regresión lineal cuadráticos evaluados.	55
Cuadro 17. Modelo matemático generado para estimación de biomasa del fuste del árbol de San Juan (<i>Vochysia guatemalensis</i> Donnell-Smithii) en plantaciones forestales mixtas.	58

Cuadro 18a . Análisis de la prueba de medias dependientes pareadas a la biomasa estimada utilizando las tres formas: biomasa estimada en campo, con modelo general y modelo específico.	70
Cuadro 19a. Análisis de varianza realizado a pruebas de carbono por componente vegetal de los árboles evaluados.	71
Cuadro 20a. Análisis de Correlación de Pearson entre el DAP y Biomasa total ...	71
Cuadro 21a. Análisis de Correlación de Pearson entre la altura y biomasa total ...	71
Cuadro 22a. Análisis de Correlación de Pearson entre diámetro de copa y la biomasa total.	72
Cuadro 23a. Análisis de Regresión Lineal simple entre el DAP y la biomasa total.	72
Cuadro 24a. Regresión Lineal Simple entre altura y biomasa total.	73
Cuadro 25a. Regresión Lineal Simple entre el diámetro de copa y biomasa total.	73
Cuadro 26a. Análisis de Regresión Lineal cuadrático o con polinomios de grado 2 entre el DAP y la biomasa total	74
Cuadro 27a. Análisis de regresión lineal cuadráticos o con polinomios de grado 2 entre la altura y la biomasa total.....	74
Cuadro 28a. Análisis de regresión lineal cuadrático o con polinomios de grado 2 entre el diámetro de la copa y la biomasa total	75
Cuadro 29a. Análisis de regresión lineal múltiple utilizando el método Eliminación Backward, relacionando variables independientes con biomasa de 20 árboles.	75
Cuadro 30a. Análisis de regresión lineal múltiple utilizando el método Eliminación Backward, relacionando las variables independientes con la biomasa total de 18 árboles.	76
Cuadro 31a. Análisis de regresión lineal múltiple entre las variables independientes con la biomasa del fuste de 20 árboles por el método Eliminación.....	77
Cuadro 32a. Análisis de Regresión Lineal Múltiple entre las variables independientes con la biomasa del fuste utilizando el método de Eliminación Backward, incluyendo datos de 19 árboles	78
Cuadro 33a. Análisis de Regresión Múltiple entre las variables independientes versus la biomasa del fuste por el método Eliminación Backward incluyendo datos de 18 árboles.	79

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 Mapa de localización del área del estudio.	21
Figura 2. Pesos frescos por componente vegetal en porcentaje (%).....	38
Figura 3. Porcentaje de biomasa seca por componente vegetal del árbol de San Juan.....	41
Figura 4. Comparación de la biomasa real estimada versus el modelo específico generado y el modelo de bosque natural.....	42
Figura 5. Grafica de comportamiento de medias.....	46
Figura 6. Diagrama de dispersión y correlación entre el DAP (cm) y la biomasa total del árbol.....	48
Figura 7. Diagrama de dispersión entre la Altura (m) y la biomasa total del árbol (kg).	49
Figura 8. Diagrama de dispersión y correlación entre el diámetro de la copa (m) y la biomasa total del árbol (kg)	50
Figura 9. Diagrama de regresión lineal simple entre la variable independiente o regresora DAP y la variable dependiente biomasa total	51
Figura 10. Diagrama de regresión lineal simple entre la variable independiente o regresora altura y la variable dependiente biomasa total.....	51
Figura 11. Diagrama de regresión lineal simple entre la variable independiente o regresora Diámetro de copa y la variable dependiente Biomasa	52
Figura 12. Diagrama de regresión lineal cuadrática entre DAP y biomasa total.....	53
Figura 13. Diagrama de regresión lineal cuadrática entre altura y biomasa total ..	54
Figura 14. Diagrama de regresión lineal cuadrático entre el diámetro de copa y la biomasa total.	54
Figura 15 Región de aceptación y rechazo de la hipótesis nula.....	70
Figura 16. Diagrama de regresión lineal múltiple por Eliminacion Backward entre el DAP, altura y diámetro copa versus biomasa total de 20 árboles.	76
Figura 17. Diagrama regresión lineal múltiple por el método Eliminación Backward entre el DAP, altura y diámetro copa versus biomasa total de 18 árboles.	77

Figura 18. Diagrama regresión por el método de Eliminación Backward, entre el DAP, altura y diámetro de copa versus la biomasa del fuste, utilizando los datos de 20 árboles.....	78
Figura 19. Diagrama regresión lineal múltiple por el método de Eliminación Backward, entre las variables independientes con la dependiente biomasa del fuste, utilizando los datos de 19 árboles.	79
Figura 20. Diagrama regresión lineal múltiple por el método de Eliminación Backward, entre las variables independientes con la biomasa del fuste, utilizando datos de 18 árboles.	80

Generación de un modelo matemático para estimación de biomasa y cuantificación de carbono en plantaciones de San Juan (*Vochysia guatemalensis* Donnell-Smithii).

RESUMEN

En la presente investigación, se generó un modelo matemático específico de (*Vochysia guatemalensis* Donnell-Smithii), para la estimación de biomasa almacenada por encima del suelo y cuantificación de carbono total de árboles en pie. El estudio se realizó en plantaciones forestales mixtas establecidas a través del Programa de Incentivos Forestales -PINFOR- del Instituto Nacional de Bosques -INAB- ubicadas en el municipio de Ixcán, Quiché; utilizando la metodología tipo destructiva propuesta por Winrok International Institute (1996), en la cual se seleccionaron y derribaron 20 árboles distribuidos en clases diamétricas establecidas, obteniendo muestras frescas de fuste, ramas, ramillas y hojas que posteriormente fueron trasladadas al laboratorio para la estimación de la biomasa y determinación del factor de conversión de carbono promedio el cual es 0.4717 y por componente vegetal (0.4668 del fuste, 0.4749 de ramas, 0.4940 de ramillas y 0.4417 de las hojas). En la generación del modelo se utilizaron como variables independientes el Diámetro a la Altura del Pecho -DAP-, Altura total -Ht-, Diámetro de copa -DC- y la Biomasa del Fuste -Bf- como dependiente; analizándolas a través del software estadístico INFOSTAT. Se concluyó que el modelo matemático más ajustado estadísticamente para estimación de Biomasa del Fuste es $Bf=121.4544-26.3643(Ht)+1.3175(Ht)^2+0.1221(DAP)^2$, con Coeficiente de Determinación -R²- de 0.97, valores "P" de 0.0001 para la Ht, < 0.0001 para la Ht² y < 0.0001 para el DAP², así mismo se estimó el factor de expansión de biomasa el cual es de 1.44. El fuste de los árboles estudiados fijan en promedio el 69 % del carbono total y el 31 % se encuentra en la copa.

1. INTRODUCCIÓN

A nivel mundial existe un fenómeno conocido como calentamiento global que ocasiona el cambio climático, producto del incremento de emisiones de gases efecto invernadero (GEI) a la atmosfera; que trae como consecuencia una gran variabilidad climática y desequilibrio de los ecosistemas naturales. Por lo que es un reto para la humanidad contrarrestar estas emisiones.

Cubero y Rojas (1997) refieren que las plantaciones forestales han sido sugeridas como alternativas para la captura de carbono, por ser ecosistemas cuyo manejo va orientado a maximizar el volumen de madera por unidad de área. En 1992, surge la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático y en 1997 se firma el Protocolo de Kyoto, convenios internacionales que promueven actualmente la compra y venta de carbono capturado y carbono no emitido, a través las plantaciones forestales y bosque natural, mediante el mecanismo regulado de Reducción de Emisiones por Deforestación y Degradación de Bosques (REED_{plus}) Estas estrategias permiten que países desarrollados puedan pagar a países en desarrollo por la fijación de carbono del ambiente.

Para el caso de Guatemala no se cuenta con ecuaciones específicas que estimen biomasa y cuantifiquen carbono por especie forestal bajo manejo, por lo que se utilizan modelos matemáticos generales; a través de este trabajo de tesis se generó un modelo matemático para estimar biomasa y cuantificar el carbono para (*Vochysia guatemalensis* Donnell-Smithii) en plantaciones forestales mixtas establecidas por el Programa de Incentivos Forestales del INAB en el municipio de Ixcán, Quiché; utilizando la metodología tipo destructiva propuesta por Winrock International Institute (1996), que consistió en derribar 20 árboles de diferentes clases diametrales, midiendo el fuste, peso de las ramas, ramillas, hojas y medir el diámetro de la copa; asimismo, se obtuvieron muestras de cada parte vegetativa y fueron enviadas al laboratorio. De igual manera se determinó el factor de expansión de biomasa el cual incluye la biomasa contenida en la copa del árbol.

2. MARCO TEÓRICO

2.1. MARCO CONCEPTUAL

2.1.1. Definiciones

Dióxido de carbono

Es un compuesto que se encuentra en estado gaseoso es producido de forma natural, también se forma como subproducto de la combustión de combustibles fósiles y biomasa, cambios en el uso de las tierras y otros procesos industriales. En las distintas publicaciones del Panel Intergubernamental de Cambio Climático (IPCC 2011), indica que es el principal gas de efecto invernadero antropogénico que afecta al equilibrio de radiación del planeta.

La Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura –FAO- (2013) indica que “el contenido de dióxido de carbono de la vegetación está directamente relacionado con la biomasa, la biomasa en cada una de las unidades de muestreo se determina según el peso después del secado siguiendo los protocolos estándar”.

Monóxido de carbono

Se obtiene por combustión incompleta de combustibles fósiles y se acumula en las urbes metropolitanas por ausencia de corrientes de aire, por alta concentración de fuentes emisoras y por la baja densidad de vegetación y suelo descubierto. Es un gas venenoso, incoloro, inodoro e insípido, que al ser inhalado obstaculiza la capacidad de la sangre para absorber el oxígeno, lo cual afecta la facultad de ver, percibir y pensar, los reflejos se tornan más lentos, causa somnolencia e incluso inconsciencia y a veces puede causar la muerte a los humanos cuando son expuestos a concentraciones mayores a 750 ppm (partes por millón), ya que la sangre tiene una afinidad por el monóxido de carbono de 210 a 240 veces mayor que el oxígeno. En las embarazadas pone en peligro el crecimiento y desarrollo mental del feto (Fundación Solar, 2000).

Carbono potencial

Se refiere al carbono máximo o carbono real que pudiera contener un determinado tipo de vegetación, asumiendo una cobertura total y original (Alpízar, 1997).

Carbono real

Según Alpízar (1997) se refiere al carbono almacenado considerando las condiciones actuales de cobertura en cuanto al área y al estado sucesional: bosque primario, bosque secundario, potrero.

Carbono fijado

Se refiere al flujo de carbono de la atmósfera a la tierra producto de la recuperación de zonas (regeneración) previamente deforestadas, desde pastizales, bosques secundarios hasta llegar a bosque climax. El cálculo por lo tanto, está definido por el crecimiento de biomasa convertida en carbono. (Alpízar, 1997).

Carbono

Es uno de los elementos químicos más abundantes del planeta Tierra y está presente en todos los seres vivos. Walker (2011), aduce que el carbono se encuentra en grandes cantidades en las hojas, ramas, tallos y raíces de los árboles. Además de estar compuesta de hasta 50% de agua, la biomasa de un árbol vivo contiene aproximadamente 25% de carbono, por consiguiente, el carbono constituye aproximadamente la $\frac{1}{2}$ del total de la Biomasa Seca –BSS- de un árbol. Por ejemplo, si un árbol tiene una BSS de 2.4 toneladas métricas entonces el carbono encontrado en este árbol tiene un peso de 1.2 toneladas métricas.

Carbono no emitido

Se refiere al carbono salvado de emitirse a la atmósfera por un cambio de cobertura. Se fundamenta en supuesto riesgo que se tiene de eliminación de los bosques y por ende de emisión de carbono. El valor estimado considerando el carbono real y una tasa de deforestación (Alpízar, 1997).

Efecto invernadero

Según estudio realizado por la Fundación Solar (2,000), se entiende por efecto de invernadero al cambio climático provocado por un aumento de la temperatura ambiental a consecuencia de una mayor concentración de dióxido de carbono (CO₂) en la atmósfera, que aunque permite que la radiación solar llega a la tierra, impide que parte de aquella pueda volver al espacio, siendo reflejada nuevamente y, por lo tanto, facilitando un aumento de temperatura. La intensa utilización de combustibles fósiles es la principal causa del aumento del efecto de invernadero. Esto es un efecto natural que mantiene la tierra a una temperatura promedio arriba del punto de congelación del agua y permite la vida tal como la conocemos.

Vulnerabilidad al cambio climático

La vulnerabilidad ha sido definida en el campo del cambio climático como el grado al cual un sistema es susceptible o incapaz de soportar los efectos adversos del cambio climático, incluyendo la variabilidad climática y los extremos. La vulnerabilidad es una función del carácter, magnitud y tasa de cambio y variación climática a la que un sistema se expone, su sensibilidad y su capacidad de adaptación (IPCC 2007).

El efecto invernadero y el cambio climático

La tierra está cubierta por una capa de gases que deja entrar energía solar, la cual calienta la superficie de la tierra. Algunos de los gases en la atmósfera, llamados Los Gases de Efecto Invernadero (GEI), impiden el escape de este calor hacia el espacio. Pero, las actividades humanas están produciendo un exceso de gases de efecto invernadero (principalmente Dióxido de Carbono, Metano y Óxido Nitroso) que están potencialmente calentando el clima de la tierra, un proceso conocido como cambio climático. Por ejemplo, las concentraciones atmosféricas de Dióxido de Carbono, el GEI antropogénico más importante debido a su volumen, ha aumentado en un 30% desde los tiempos de pre-industrializados, con un aumento

concurrente de las temperaturas globales promedios entre 0.3 y 0.6 grados centígrados Fundación Solar (2,000).

Protocolo de Kyoto

Según el Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza -CATIE- PROSEFOR (1,999). “Es un tratado internacional que compromete a los países industrializados a reducir las emisiones de gases que provocan el efecto de invernadero para la próxima década. Los países en desarrollo no están comprometidos a reducir sus emisiones de gases de efecto de invernadero. Sin la participación de los países en desarrollo, el impacto de la implementación del Protocolo de Kyoto en la reducción de emisiones de gases de efecto de invernadero será insignificante”

Árbol: Según el Instituto Nacional de Bosques –INAB- (2015), es una planta leñosa con fuste y copa definida.

Bosque

Según INAB (2015) El bosque es el ecosistema en donde los árboles son la especie vegetal dominante y permanente, se clasifican en:

- a) Bosques naturales sin manejo: son los originados por regeneración natural sin influencia del ser humano.
- b) Bosques naturales bajo manejo: son los originados por regeneración natural y que se encuentran sujetos a la aplicación de técnicas silviculturales
- c) Bosques naturales bajo manejo agroforestal: son los bosques en los cuales se practica el manejo forestal y la agricultura en forma conjunta.

Distribución diamétrica

Nájera, Pereira y Chapas (2010) indican que la distribución diamétrica es la presentación de la información de los diámetros de los fustes de un rodal o estrato forestal, colocados en una tabla que identifica la frecuencia de diámetros por intervalos de clase expresados en diámetros.

Plantación Forestal

Es el establecimiento de rodales forestales mediante la plantación o siembra de árboles, conocido generalmente como proceso de forestación o reforestación. Los rodales pueden ser formados por especies introducidas (todos rodales plantados) o por rodales de especies nativas sometidos a ordenación intensiva, que cumplen todos los requisitos siguientes: una o dos especies al momento de la plantación, clase de edad y esparcimiento regular (FAO, 2004).

Variables

Es lo que observa y se mide sobre unidades estadísticas, López y González (2016) exterioriza que pueden ser características que varían de un individuo a otro. Para el presente estudio se toman en cuenta variables que influyen en la predicción de biomasa del fuste.

Modelo matemático

Según Rienzo, Casanoves, Balsrini, Gonzales, Tablada y Robledo (2010) indica que en ciencias aplicadas, un Modelo matemático es uno de los tipos de modelos científicos, que emplea algún tipo de formulismo matemático para expresar relaciones, proposiciones sustantivas de hechos, variables, parámetros, entidades y relaciones entre variables y/o entidades u operaciones, para estudiar comportamientos de sistemas complejos ante situaciones difíciles de observar en la realidad.

Prueba de F

Según López y González (2016) indican que la prueba de F se utiliza para determinar si hay una relación significativa entre la variable dependiente y el conjunto de todas las variables independiente. En estas condiciones se llama prueba de significancia global.

Coefficiente de Determinación

López y González, (2016) mencionan que el coeficiente de determinación (R^2) indica la proporción de la variación total que está siendo explicada por la regresión. Además ofrece una idea de la calidad del ajuste del modelo a los datos, el coeficiente de determinación puede ser expresado en porcentaje.

Coefficiente de correlación Pearson

El coeficiente de correlación de Pearson presenta una asociación en un valor entre -1 y 1 , facilitando su interpretación. Esta asociación será tan grande, cuando r esté más alejado del valor cero (0) y nula cuando $r = 0$. El coeficiente de correlación lineal es un indicador del grado de asociación lineal entre dos variables. Así, $\rho = 0$ no indica ausencia de asociación entre las variables, pero sí, ausencia de asociación lineal entre las variables. (López y González, 2016)

Variabes Dasométricas

La Dasometría es la especialidad de la ingeniería forestal que trata de la determinación y/o estimación de las dimensiones de variables de medida en individuos arbóreos. Imaña-Encinas, Jiménez, Rezende, Rainier, Antunes y Serpa de Meria (2014), indican que el árbol es tratado como un ente numérico y por lo tanto como unidad de cálculo con base en medidas del Diámetro a la Altura del Pecho –DAP-, Altura Total –Ht-.

Área Basal (AB):

Es el área de la sección transversal de un árbol tomada a 1.30 metros del suelo. El INAB (2014), indica que se utiliza para representar la densidad de un bosque expresada en metros cuadrados por hectárea $-m^2/ha-$.

Biomasa

Según Walker (2011) indica que la biomasa de un árbol es el peso o masa del tejido de la planta viva y es generalmente expresado en unidades de toneladas métricas $-t-$. La biomasa viva puede ser separada en: sobre el suelo (hojas, ramas y tallo)

(aérea) y componentes bajo el suelo (raíces). Lo más común es estimar del árbol la Biomasa Seca Viva Sobre el Suelo –BSS-, lo cual es el peso del tejido vivo de la planta sobre el suelo después de que toda el agua haya sido removida, es decir, después de que las hojas, ramas y tallos se hayan secado por completo, a menudo utilizando un horno especial de laboratorio.

Biomasa arriba del suelo

La biomasa arriba del suelo está compuesta por los árboles, la vegetación arbustiva y la vegetación herbácea. Estos componentes de la biomasa se muestrean en parcelas de proporciones acordes a cada tipo de vegetación. Es muy importante hacer notar que el componente más importante de esta fuente son los árboles. Las malezas, por su muy baja contribución en términos de fijación, puede dejar de muestrearse. Esto es una decisión del equipo técnico, pero como una recomendación, a menos que el sistema a evaluar tenga un componente fuerte de vegetación herbácea, no es necesario muestrear este componente Fundación Solar (2,000).

Estimación de Biomasa en Plantaciones

La biomasa de una masa o plantación forestal según FAO (2013), es a menudo proporcional al volumen y área basal. Por el contrario, la biomasa de un árbol individual es, por lo general, proporcional a su diámetro y altura; para conocer estas variables es necesario levantar un inventario forestal.

Factor de expansión de la biomasa (FEB)

Según Castellanos, Quilo y Mato (2010) Es un coeficiente de multiplicación que brinda información sobre el crecimiento, existencias, producción futura de los bosques, recomiendan que el incluir estructuras no comerciales de la biomasa tales como: las ramas, follaje, ramillas brinda información más completa.

La conversión de la biomasa y expansión de factores siglas en inglés –BCEF- derivan del cálculo de la biomasa aérea. Convierten a la biomasa seca almacenada

en 0,5 toneladas de Carbono -t C- por t de biomasa fresca. (Federici, Tubiello, Salvatore, Jacobs y Schmidhuber, 2015).

Los autores Teobaldelli y Somogyi (2009), reconocen que se utiliza el Factor de Expansión de Biomasa (BEF) debido a que es necesario, para convertir una estimación de la masa arbórea en crecimiento (X) en una estimación de la biomasa (B). Una ecuación de ampliación utilizada con frecuencia tiene la forma de:

$$BEF=b_0+b_1*X^{-b_2}$$

Dónde:

X= Medición de la masa arbórea en crecimiento.

2.1.2. Descripción de la Especie

Clasificación taxonómica

Nombre común:	San Juan
Nombre Científico:	<i>Vochysia guatemalensis</i> Donnell-Smithii
Reino:	Vegetal
Subreino:	Embryobionta.
División:	Magnoliophyta.
Clase:	Magnoliopsida.
Orden:	Polygales
Familia:	Vochysiaceae. CATIE (2009).

Descripción botánica

El árbol San Juan (*Vochysia guatemalensis* Donnell-Smithii) puede alcanzar alturas de hasta 45 metros y un diámetro a la altura del pecho -DAP- de hasta 1.8 metros. El fuste es normalmente recto, cilíndrico y libre de ramas hasta dos tercios de su altura. La copa es redondeada y muy densa. El árbol tiene una corteza lisa de un color grisáceo claro y no llega a formar gambas.

Sus hojas simples opuestas son completamente marginadas, ovaladas y lisobrillantes en el haz. Tienen una longitud de aproximadamente 15 a 20 cm y 5 a 7 cm de ancho. Son verticiladas en grupos de tres. Las inflorescencias se presentan en racimos axilares o terminales y están conformadas por una gran cantidad de flores amarillentas. De aquí se desarrollan las cápsulas con tres lóculos de 4 a 5 cm de largo y de 2 a 2.5 cm de ancho. (Solis y Moya, s.f.).

Sitios óptimos

En un estudio realizado por Silvestre (2010) hace referencia al crecimiento y productividad que tiene el San Juan, en plantaciones forestales, en la Franja Transversal de Norte, Guatemala. Se determinó que el 54.29% de las parcelas medidas se encuentran en sitios de crecimiento bajo (10m), con alturas dominantes menores a los 11 metros. En este tipo de sitios se encontró que tienen un incremento medio anual -IMA- en DAP promedio de 1.84 cm/año, IMA en altura total promedio de 1.33 m/año, IMA en área basal promedio estandarizado de 2.17 m²/ha/año y con una productividad de 12.61 m³/ha/año expresado en IMA de volumen. Los sitios de crecimiento medios (12m) poseen un IMA en DAP promedio igual a 2.66 cm/año, con alturas dominantes de 11-13 metros, IMA en altura dominante promedio de 2.66 m/año. IMA en AB promedio estandarizado igual a 4.59 m²/ha/año y productividad igual a 28.42 m³/ha/año en IMA de volumen total estandarizado.

Para los sitios de crecimiento alto, con alturas dominantes mayor a 13 metros, éstos se caracterizan por tener IMA en DAP igual o mayor a 3.06 cm/año, IMA en altura igual o mayor a 2.28 m/año, IMA en AB promedio estandarizado equivalente a 5.32 m²/ha/año y productividad de 33.47 m³/ha/año en IMA de volumen total estandarizado. No está demás indicar que todos estos datos se basaron en las mediciones hechas para los individuos más altos de cada una de las parcelas dentro de las plantaciones forestales.

Turno y crecimiento

“En plantaciones puras y en mezcla con otras especies en potreros abandonados (bosque lluvioso), el árbol San Juan (*Vochysia guatemalensis* Donnell-Smithii) logró un crecimiento promedio de 11.5 metros en altura después de 4 años, sin diferencias entre las parcelas puras y mixtas. El crecimiento en diámetro fue mayor en las parcelas mixtas (18.0 cm) a comparar con las parcelas puras (11.8 cm), como había menos competencia en las parcelas mixtas. Se espera una sobrevivencia mayor del 85%. En bosque natural en Nicaragua, por el Rio San Juan, mostró un crecimiento anual de 2.5 centímetros de diámetro a la altura del pecho” (CATIE, 2003).

Características y propiedades de la madera

La madera es de color blanco amarillento sin diferencia marcada entre albura y duramen. No obstante, en árboles jóvenes raleados se puede marcar una ligera diferencia por el color más blanco de la albura; tiene un grano ligeramente entrecruzado con una textura media, un lustre de regular a elevado. Anatómicamente presenta poros visibles a simple vista, ovalados en su mayoría, aunque también existen poros redondos. Los poros son moderadamente grandes de 0.1 a 0.3 mm y una gran cantidad de ellos son solitarios aunque existen algunos múltiples radiales de dos o tres. Estos generalmente están presentes en las bandas terminales del parénquima, el cual es visible a simple vista (COSEFORMA, 2001).

La madera de árboles jóvenes de 25 cm de diámetro presenta un peso específico básico de 0.33, mientras que este peso en árboles adultos es de 0.35. Su densidad es de 0.40 a 0.47 g / cm³ secado al aire. En condición seca presenta excelentes condiciones para poder ser trabajada (cortado, rajado, cepillado, lijado y otros).

Su secado es relativamente fácil y muy rápido, con temperaturas iniciales inferiores a 45 grados centígrados y contenidos de humedad de equilibrio (UGL) de inicio superiores o iguales a 19 % (Solis & Moya, s.f.).

La madera es muy sensible al ataque de perforadores y de termitas de madera verde, por lo que con alguna frecuencia se pueden encontrar árboles en pie

dañados, lo que disminuye el rendimiento. Sin embargo, en árboles libres de daños se obtienen buenos rendimientos debido a la forma recta del fuste.

Las propiedades físicas de una especie dan una idea acerca de las posibilidades de uso estructural y de durabilidad. Existe una relación directa de estas propiedades con el contenido de humedad de la madera. Por esta situación, se debe indicar si se trata de madera en condición verde o madera en condición seca, los datos se muestran en el cuadro 1.

Cuadro 1. Propiedades físicas de la madera verde y seca para el árbol San Juan (*Vochysia guatemalensis* Donnell-Smithii).

Estado fisiológico	Humedad Verde (%)	Densidad verde (gr/cm ³)	Densidad anhidrida (gr/cm ³)	Contracciones de verde-Seco al horno		
				Volumétrica Tangencial	Radial	Tangencial
Árbol adulto	186	0.99	0.35	9.2	2.4	8.8
Árbol (10 años)	162	0.85	0.32	11.19	1.29	5.98

Fuente: COSEFORMA (2,001)

Ecología

El árbol San Juan (*Vochysia guatemalensis* Donnell-Smithii) es una especie forestal que es nativo de los bosques tropicales lluviosos del sur de México, América Central y Colombia. Se encuentra en bosques semi-caducifolios, del bosque húmedo tropical y el bosque muy húmedo tropical, según la clasificación de Zonas de Vida de Holdridge CATIE (2003), desde altitudes de 0 a 1000 metros sobre el nivel del mar, con una precipitación promedio anual entre 2500 y 5000 mm, con temperaturas promedio anual de 24 a 30°C. Flores, (1993). Forma rodales casi puros en terrenos agrícolas abandonados, y es abundante en llanuras costales y valles a las orillas de ríos. Puede ocurrir naturalmente en mezclas con (*Vochysia ferruginea*) y (*Vochysia allenii*) (CATIE, 2003) y comúnmente se le encuentra en bosques secundarios en diferentes estados de desarrollo y en repastos.

Importancia económica

Según los estudios realizados por COSEFORMA (2001), la edad de rotación del árbol de San Juan (*Vochysia guatemalensis* Donnell-Smithii) no debe ser mayor a los 15 años, edad en la que se alcanzan diámetros de 60 y 70 cm, no obstante, a esta edad la tendencia de los árboles es a estar huecos en la primera troza. Esto hace pensar que alrededor de los 50 cm deberían ser cortados como medida de prevención para evitar pérdidas de materia prima. Esto demuestra que el San Juan es una especie de rápido crecimiento y que la edad de rotación sea corta para obtener materia prima a mediano plazo, y que se favorezca el retorno económico.

Restauración ecológica

El San Juan (*Vochysia guatemalensis* Donnell-Smithii) es buena para recuperar suelos degradados, acumula altos niveles de aluminio en sus hojas, y con su alta producción de hojarasca puede aumentar los niveles de materia orgánica y nutrientes en el suelo. Las hojas secas, molidas han sido utilizadas como fijador para tintas naturales en fibras naturales (p.ej. algodón) (CATIE, 2003).

Uso recomendado de la madera

Por su rápido crecimiento y lignificación temprana, se puede industrializar desde el primer raleo, principalmente para producción de embalajes. Aunque es una madera liviana, posterior al secado artificial mejora considerablemente su resistencia mecánica lo que la convierte en una madera adecuada para la fabricación de muebles y construcción interna (COSEFORMA, 2001).

La madera de esta especie se puede utilizar para la fabricación de embalajes, formaletas, madera para construcción interna (forros, rodapié, venilla, cuarto redondo). También presenta características aceptables para la fabricación de pulpa para papel.

2.2. ANTECEDENTES

Ante el evidente cambio climático que se vive en la actualidad, existe la necesidad de reducir las emisiones de Gases Efecto Invernadero (GEI) que provocan el calentamiento global, por tal razón es necesario buscar alternativas que mitiguen estas emisiones. Una de las alternativas para contribuir en la captura de carbono es el ingreso de las plantaciones forestales a futuros mercados de carbono.

“En el año 1992, las Naciones Unidas del Mundo toman la decisión de firmar una Convención bajo el nombre de Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático, con el propósito de comprometerse a estabilizar las emisiones antropogénicas de GEI. Reuniones posteriores dieron origen a la firma del Protocolo de Kioto en 1997, el cual establece los objetivos cuantificados de reducción de emisiones para los países desarrollados así como los mecanismos de mercado. Uno de estos mecanismos, es el Mecanismo de Desarrollo Limpio (MDL), permite que proyectos de inversión elaborados en países en desarrollo puedan obtener ingresos económicos adicionales a través de la venta de créditos de carbono llamados “Certificados de Emisiones Reducidas” (CER), al mitigar la emisión de gases de efecto invernadero o secuestrando dióxido de carbono de la atmósfera” (Lee, 2002). En Guatemala se han realizado diferentes estudios sobre estimación de biomasa y captura de carbono para especies latifoliadas y coníferas. Se citan algunas:

Lee (2,002), realizó una investigación para la estimación de biomasa por encima del suelo en bosques naturales de Morales, Izabal e Ixcán, Quiché Guatemala. Las variables que se utilizaron fueron DAP a 1.3 metros del suelo, altura del árbol en pie en metros, longitud del árbol cortado en metros. Los modelos generados son: Palo blanco (*Cybistax donnell-smithii*) (Biomasa = $e^{(1.469255 + 0.0009 \text{ DAP} + 0.470835 \text{ Altura} - 0.013751 \text{ altura}^2 + 0.000676 \text{ DAP}^2)}$), santa maría (*Calophyllum brasiliense*) (Biomasa = $e^{(3.8926 + 0.0325 \text{ DAP} + 0.06518 \text{ altura})}$), San Juan (*Vochysia guatemalensis*) (Biomasa = $e^{(4.420177 + 0.061182 \text{ DAP} - 0.134815 \text{ Altura} + 0.004806 \text{ altura}^2)}$), Latifoliadas (Biomasa = $e^{(3.852749 + 0.086911 \text{ DAP} - 0.042662 \text{ Altura} - 0.00406 \text{ D} + 0.002021 \text{ DAP}^2 + \text{altura}^2)}$). Con el dato de biomasa se puede

cuantificar el carbono que un árbol puede fijar al multiplicar la biomasa por factores de 0.4555 para (*Cyristax donnell-smithii*), 0.4860 para (*Calophyllum brasiliense*) y 0.4488 para (*Vochysia guatemalensis*). Dichos factores corresponden al carbono presente en la especie toda vez se ha removido el agua.

Aguilar (2,004), estimó el carbono fijado en plantaciones de (*Pinus caribaea* var. *Hondurensis*) en función de su edad, en Livingston Izabal, Guatemala. Donde obtuvo una biomasa de 7.78 a 535.48 kg, y un factor de expansión de biomasa de 1.2622. Generó dos ecuaciones de biomasa, la primera fue: $Y = 0.07035 D^2 + 2.56$ con un R^2 del 93% y la segunda es: $Y = 0.02314 D^2 H - 3.3042$ con un R^2 del 98%. El contenido de carbono total estimado en las plantaciones es de 99 toneladas de carbono/hectárea, 112 toneladas de carbono/hectárea, 104 toneladas de carbono/hectárea, 118 toneladas de carbono/hectárea y 110 toneladas de carbono/hectárea en las fincas de edades 8, 12, 13, 15 y 16 años respectivamente.

Luego, Quilo (2006), realizó la estimación del carbono almacenado por el sistema agroforestal salvia (*Buddleia megaloccephala*) y Papa (*Solanum tuberosum*), en el municipio de San José Ojetenam, San Marcos, Guatemala. Estimó la biomasa y generó seis ecuaciones para estimarla, de las cuales dos son las más recomendables de utilizar. La primera es: $Y = 0.2696X - 3.0267$, con un R^2 de 83%; y la segunda es: $Y = 0.0434X + 0.2381$ con un R^2 de 91%. El sistema agroforestal almacena 35.33 toneladas de carbono en salvia, 35.60 toneladas de carbono en papa y 335.27 toneladas de carbono en el suelo, para hacer un total de 406.18 toneladas de carbono por hectárea capturado en las 18.56 hectáreas que posee el sistema agroforestal evaluado.

Montepeque (2007) realizó una estimación de Biomasa y Captura de Carbono en Plantaciones Forestales de (*Eucalyptus camaldulensis* Dehnh) de 4, 6, 8 y 15 años, en el municipio de Siquinalá Departamento de Escuintla, Guatemala; obteniendo los siguientes resultados, la biomasa total por encima del suelo, fue de 27.66, 87.37, 76.12 y 159.77 toneladas por hectárea, respectivamente. Además de generar la ecuación para la estimación de biomasa de dicha especie, específicamente para

Guatemala, esta ecuación es $Biomasa = 0.0334 (DAP)^{2.876}$ con un coeficiente de determinación (95%), por lo que el modelo es confiable para estimar biomasa. Las plantaciones de 4, 6, 8 y 15 años de edad, fijaron un carbono total de 13.83, 43.69, 38.06 y 79.89 toneladas de carbono por hectárea, respectivamente.

El Centro de Estudios Ambientales y Biodiversidad de la Universidad del Valle de Guatemala -CEAB-UVG- desarrolló ecuaciones específicas para calcular biomasa por arriba del suelo en las especies (*Quercus spp*) y (*Pinus spp*); las cuales se observan en el cuadro 2.

Cuadro 2. Ecuaciones generadas para el cálculo de biomasa en bosques del altiplano occidental de Guatemala.

Tipo de Bosque	Precipitación (mm/año)	Ecuación	Rango DAP (cm)	R ²	Referencia
Latifoliada genérica (seco)	900-1500	$Y=0.2035*(DAP)^{2.3196}$	1-63	0.97	Pearson 2005
Latifoliada genérica (Húmeda)	1500-400	$Y=\exp[2.289+2.649*\ln(\text{dbh})-0.021*(\ln(\text{dbh}))^2]$	5-148	0.98	Pearson 2005
Latifoliada local (<i>Quercus spp</i>)	900-1500	$Y=0.1773*(2.2846^{DAP})$	11-45	0.86	CEAB-UVG
Conífera Local	1000-2500	$Y=0.1377*(DAP)^{2.4038}$	5-52	0.95	CEAB-UVG

Fuente: (Castellanos, Quilo & Mato, 2010)

Pacay (2011) generó un modelo matemático para la estimación de biomasa y cuantificación de carbono por encima del suelo para la especie Nogal (*Juglans olanchana* Standl & L.O. Williams). en bosques naturales del corredor biológico del bosque nuboso, en Purulhá, Baja Verapaz. Utilizando la metodología de tipo destructiva, propuesta por Winrok International Institute (1996), derribando 20 árboles, distribuidos en 5 clases diametrales (4 árboles por clase diametral); las variables independientes utilizadas fueron: Diámetro a la altura del Pecho, altura y Diámetro de la Copa, la ecuación generada es: $e^{(2.8998+0.1255*DAP-0.0007*DAP^2)}$, con un Coeficiente de Determinación de 0.9707. El factor de expansión de Biomasa determinado fue de 1.40 y el factor específico de conversión de biomasa a carbono

para el nogal es de 0.4657. Los Software utilizados para generar la ecuación fueron INFOSTAT Y SAS.

Sagüi (2011), generó un modelo matemático específico de (*Pinus tecunumanii* Eguiluz & J.P Perry), para la estimación de biomasa total por arriba del suelo y cuantificación de carbono total de árboles en pie, en la Reserva de Biósfera Sierra de las Minas en San Jerónimo, Baja Verapaz, utilizando la metodología destructiva propuesta por Winrok International Institute (1,996), en la cual se derribaron un total de 20 árboles distribuidos en las clases diamétricas, además se extrajeron muestras de fuste, hojas, ramas y ramillas que posteriormente se trasladaron a laboratorio para el análisis de biomasa correspondiente. Las variables de modelación fueron; La Biomasa como dependiente. Diámetro a la altura del pecho, altura total y diámetro de copa como independientes; las que se analizaron en conjunto a través de los softwares INFOSTAT y SAS. El modelo que mejor se ajustó estadísticamente es: $Biomasa = e^{(4.0578 + 0.0371 * DAP + 0.0381 * H)}$, con un R^2 de 0.93, valores P de <0.001 para el DAP, y 0.0336 para la altura. Así mismo el índice de expansión de biomasa se determinó en 1.23 unidades y el factor específico de conversión de carbono de 0.48.

López (2017), realizó un estudio de estimación de biomasa y cuantificación de carbono en la teca (*Tectona grandis* L. f.) en plantaciones forestales ubicadas en la Finca Sacuitz Chahal, Alta Verapaz, generando un modelo matemático para estimación de biomasa del fuste específicamente para la especie, el cual es $B_f = -1,594.7707 + 62.5925(DAP) + 44.0475(Ht)$. Posee una probabilidad menor a 0.05 y un valor r^2 ajustado de 0.89; utilizando la metodología tipo destructiva propuesta con Winrock Institute (1996) que consistió en derribar 20 árboles, medición del fuste, pesaje de hojas, ramas, ramillas y análisis de carbono en el laboratorio de la Universidad del Valle de Guatemala.

3. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

3.1. DEFINICIÓN DEL PROBLEMA

Las plantaciones forestales en la actualidad se utilizan como estrategia para reducir los gases de efecto invernadero de la atmósfera, estrategias creadas por los 189 países que conforman las Naciones Unidas -ONU- (2015). De camino y Morales (2013) refieren que las plantaciones forestales se transforman así, en eficientes impulsoras de cambio hacia la promoción de los beneficios que significan la fijación de carbono en la madera, a la vez las plantaciones forestales han hecho que se reduzca el consumo de maderas provenientes de bosque natural por que ofrecen otros productos secundarios, como múltiples bienes y servicios a las comunidades rurales, por ende a la sociedad civil.

En Guatemala, aún no se ha tenido un desarrollo científico aceptable relacionado a la estimación de biomasa a través de ecuaciones específicas generadas en plantaciones forestales. A partir del año 2000 se iniciaron los estudios para generar modelo matemáticos para estimación de biomasa y cuantificación de carbono en bosque natural, lo cual refleja la carencia de estudios para cada especie en plantaciones forestales. Por lo que suele suceder que se generalice el uso de modelos matemáticos y factores de conversión de biomasa a carbono para varias especies; los cuales se han generado en condiciones climáticas y edáficas diferentes a las locales.

Es por ello que en el presente estudio se desarrolló un modelo matemático para estimación de biomasa y carbono en el árbol San Juan (*Vochysia guatemalensis* Donnell-Smithii), en plantaciones forestales mixtas establecidas a través del Programa de Incentivos Forestales, en el municipio de Ixcan, Quiché.

3.2. JUSTIFICACIÓN DE LA INVESTIGACIÓN

La FAO (2015), realizó una Evaluación de Recursos Forestales Mundiales –FRA- y el compendio de datos refleja que en Guatemala en el año 1990 existía un área de bosque de 4,748,000 ha y para 2015 existen 3,540,000 hectáreas de cobertura boscosa, estos datos demuestran que existe una tasa de cambio promedio anual de -1.2%. Esto indica que se está disminuyendo el área boscosa en el mundo y Según Avila, Jiménez, Beer, Gomez y Ibrahim (2001) indican que los árboles capturan el Dióxido de Carbono durante el proceso de fotosíntesis, para ser convertido en celulosa y permanecer almacenado en su estructura, es por ello que los bosques naturales y plantaciones forestales brindan beneficios ambientales como la fijación de carbono.

Según INAB (2011) el (*Vochysia guatemalensis* Donnell-Smithii), es la especie latifoliada mas plantada en el municipio de Ixcán, en segundo lugar está la especie (*Callophyllum brasilense* Camb); Debido a su rápido crecimiento, con edad de rotación de 15 años, edad en la que se alcanzan diámetros entre 60 y 70 cm. Silvestre (2010) indica que “Para el 2009, a nivel nacional se habían reforestado 688 hectáreas de (*V. guatemalensis* Donnell-Smithii) en plantaciones puras y un total de 2,344.83 hectáreas que por lo menos contaban con dicha especie en plantaciones mixtas”.

En Guatemala existen ecuaciones generadas para especies forestales en bosques naturales, no así en plantaciones forestales bajo manejo, por lo que el modelo matemático generado para estimación de biomasa y cuantificación de carbono en (*V. guatemalensis* Donnell-Smithii), en plantaciones forestales mixtas establecidas a través del Programa de Incentivos Forestales en el municipio de Ixcán, es una herramienta científica que contribuirá a la estimación certera y confiable de biomasa y carbono total por encima del suelo para la especie mencionada y permitirá a los propietarios de estas plantaciones a acceder a mercados futuros de venta de carbono, siempre y cuando estén organizados. Así mismo dicha ecuación podrá utilizarse en todas las regiones de Guatemala ubicadas en zonas de vida iguales a las de municipio de Ixcán, Quiché.

4. OBJETIVOS

4.1. GENERAL

- a. Generar un modelo matemático para la estimación de biomasa y cuantificación de carbono para la especie (*Vochysia guatemalensis* Donnell-Smithii) en plantaciones forestales mixtas, establecidas a través del Programa de Incentivos Forestales -PINFOR- en el municipio de Ixcán, Quiché.

4.2. ESPECÍFICOS

- a. Estimar la biomasa total por encima del suelo de los arboles evaluados de San Juan, a partir de las sub-muestras recolectadas de fuste, ramas, ramillas, hojas y pesos totales de las partes vegetativas.
- b. Determinar el factor específico de conversión de biomasa a carbono en el laboratorio para el árbol de San Juan, dentro de plantaciones forestales mixtas y que permita predecir datos de biomasa con variables de DAP y altura total del árbol.
- c. Estimar el carbono total por encima del suelo en función de la biomasa total por individuo de la especie (*Vochysia guatemalensis* Donnell-Smithii) en plantaciones forestales mixtas en el municipio de Ixcán, Quiché.
- d. Determinar el modelo matemático que estime la biomasa total por encima del suelo, a partir de las variables dasométricas Diámetro a la altura del pecho (cm) y la altura total (m).

5. METODOLOGÍA

5.1. LOCALIZACIÓN DEL AREA DE TRABAJO

El municipio de Ixcán se ubica al Norte del Departamento de Quiché, a 375 kilómetro de la ciudad capital vía Cobán Alta Verapaz, al norte colinda con México. El trabajo de investigación se realizó en plantaciones forestales mixtas de San Juan (*Vochysia guatemalensis* Donnell-Smithii), establecidas a través del Programa de Incentivos Forestales en la sub-región II-6 del INAB en el municipio Ixcán, departamento de Quiché. Donde existía un porcentaje mayor o igual al 30 % de presencia del árbol en el área estudiada según base de datos INAB (2017).

El área de estudio se estableció en el municipio de Ixcán, departamento de Quiché en siete comunidades, San José la 20, Lorena, Nuevas Ilusiones, Flor Todosantera, Cari, Punto Chico, El Eden, las cuales se ubican en las coordenadas UTM 463874 y 1762500, 467667 y 1770088, 478157 y 1773251, 445141 y 1760795, 459748 y 1770076, 470817 y 1775429, 461641 y 1769722, respectivamente, se muestra el mapa de localización en la figura 1.

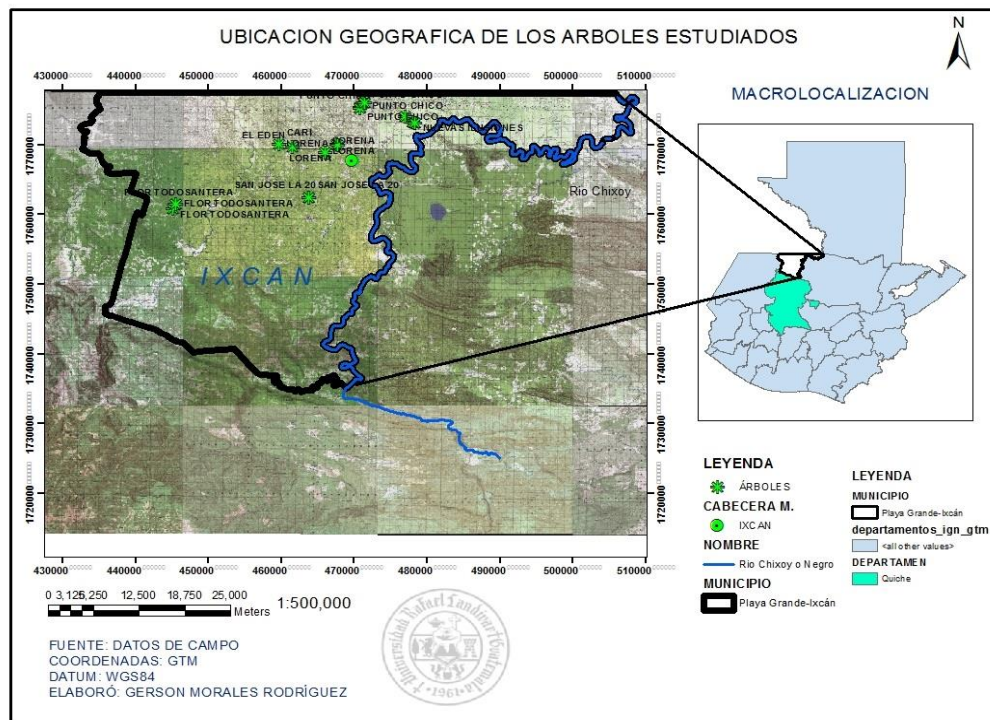


Figura 1. Mapa de localización del área del estudio.

5.2. UNIDADES DE ANÁLISIS

Los árboles de San Juan fueron las unidades de análisis, los cuales fueron seleccionados de acuerdo a las clases diamétricas previamente establecidas, que estuvieran libres de plagas y enfermedades, sin bifurcaciones, con copa definida o simétrica, según Sagui (2011). A los árboles seleccionados se les evaluó el fuste, ramas, ramillas, hojas y se estimó la biomasa total y cuantificó el carbono. Se utilizó la metodología destructiva propuesta por Winrock International Institute que consiste en derribar los árboles. Según la Ley Forestal Decreto 101-96, en artículo 53 indica que para el derribo de árboles para fines de raleo o estudio no se necesita tramitar licencias forestales, por lo cual para fines de este estudio no se necesitó tramitar las mismas ante Instituto Nacional de Bosques -INAB-.

5.3. SELECCIÓN DE LA MUESTRA

Para la selección correcta de las muestras se establecieron 5 clases diametrales con el objeto de contemplar todos los diámetros encontrados en las plantaciones forestales mixtas con presencia de (*Vochysia guatemalensis* Donnell-Smithii). La muestra consistió en un total de 20 árboles, seleccionados tomando en cuenta que estuvieran sanos, sin bifurcaciones, libre de plagas y enfermedades, que existiera competencia entre árboles de la misma especie y que no estuvieran solos dentro del área de plantación; en 2 árboles se duplicaron las muestras para verificar la variabilidad en el mismo árbol (anexo 9). La distribución se muestra en el cuadro 3. Cuadro 3. Arboles cortados por clase diamétrica.

No. Clase diamétrica	Rango Clase diamétrica (cm)	No. Arboles muestreados
1	3 – 9.99	4
2	10 – 16.99	4
3	17 – 23.99	4
4	24 – 30.99	4
5	31 – 37.99	4
TOTAL		20 Arboles

Fuente: Morales (2017)

5.4. PROCEDIMIENTO DE CAMPO Y LABORATORIO

5.4.1. Fase de Campo

Toma de datos

Tomando de base el estudio de Lee (2002), se obtuvieron las variables de medición siguientes en campo: diámetro de la copa en metros (m), altura directa total del árbol en metros (m), diámetro a la altura del pecho (DAP) en cm considerada a 1.30 metros del suelo, altura del tocón en cm, longitud del fuste en metros, diámetro de cada sección del fuste en centímetros, longitud de cada sección del fuste en metros, peso fresco total de hojas en kilogramos (kg), peso total de ramas (kg), peso total de ramillas (kg) y cubicación del fuste (m³).

- ❖ Diámetro de la Copa (cm): La medición de la copa del árbol se realizó tomando cuatro medidas desde el centro del fuste hacia el borde de la copa con una cinta métrica, se sumaron los radios con su respectivo par obteniéndose dos diámetros, se promediaron dichas medidas y se obtuvo el Diámetro de la Copa. Se compensó la medida del diámetro paralelo a la pendiente del terreno para obtener la distancia horizontal real utilizando la siguiente fórmula:

$$DH = \cos \theta * DV$$

En donde:

DH= distancia horizontal (m)

DV= distancia vertical (m)

Cos= Coseno

θ = Angulo de la pendiente

- ❖ Medición de la Pendiente: Se midió la pendiente utilizando un clinómetro sunto en cada sitio donde se extrajeron las muestras de los árboles derribados.

- ❖ Medición del DAP (cm): A cada árbol se le midió el Diámetro a la Altura del Pecho a 1.30 m desde el nivel del suelo utilizando una Cinta Diamétrica.
- ❖ Geoposicionamiento del árbol: Se tomaron las coordenadas UTM a cada árbol muestreado, utilizando un GPS.

Los resultados se describen en el cuadro 4.

Cuadro 4. Coordenadas de ubicación y diámetros de los árboles estudiados.

No. Arbol	DAP (cm)	COORDENADAS		COMUNIDAD	PROPIETARIO
		UTM			
		X	Y		
1	20.37	463874	1762500	SAN JOSE LA 20	FREDY BOLAÑOS CANO
2	16.71	463896	1762481	SAN JOSE LA 20	FREDY BOLAÑOS CANO
3	7.67	467667	1770088	LORENA	FRANCISCO YOHOL HERNANDEZ
4	6.12	467740	1769967	LORENA	FRANCISCO YOHOL HERNANDEZ
5	13.05	478157	1773251	NUEVAS ILUSIONES	JUAN VICENTE CONTRERAS
6	10.42	478135	1773261	NUEVAS ILUSIONES	JUAN VICENTE CONTRERAS
7	23.07	477104	1774031	NUEVAS ILUSIONES	EXCEQUIEL MIJANGOS
8	25.3	445141	1760795	FLOR TODOSANTERA	MARIANO PABLO GOMEZ
9	22.04	445575	1761451	FLOR TODOSANTERA	PAULA MEJIA VELASQUEZ
10	24.82	445563	1761487	FLOR TODOSANTERA	PAULA MEJIA VELASQUEZ
11	29.28	459748	1770076	CARI	MAURICIO MEJIA LOPEZ
12	32.15	470817	1775429	PUNTO CHICO	JUAN CO COY
13	18.72	470852	1775351	PUNTO CHICO	JUAN CO COY
14	31.83	478445	1773113	NUEVAS ILUSIONES	EXCEQUIEL MIJANGOS
15	26.89	478417	1773125	NUEVAS ILUSIONES	EXCEQUIEL MIJANGOS
16	35.01	471405	1776031	PUNTO CHICO	JUAN XOL IQUI
17	32.56	471448	1776032	PUNTO CHICO	JUAN XOL IQUI
18	9.71	466094	1768900	LORENA	JOSE ANTONIO VELASQUEZ
19	6.43	466067	1768929	LORENA	JOSE ANTONIO VELASQUEZ
20	14.64	461641	1769722	EL EDEN	SANTOS MARTIN VASQUEZ BATZ



- ❖ Selección del árbol: El árbol se seleccionó completamente al azar y considerando la clase diamétrica, se verificó que estuviera sano, con copa definida y sin bifurcación Montepeque, (2007).
- ❖ Derribo del árbol: Se limpió la zona de caída del árbol. Se cortó a 0.15 m de altura del suelo utilizando una motosierra.
- ❖ Medición de altura total: Se midió la altura directa total del árbol cuando este estaba derribado, utilizando una cinta métrica. La altura se midió desde la base hasta la punta, incluyendo el fuste y copa del árbol.
- ❖ Separación de hojas: Se separaron todas las hojas de las ramas y ramillas del árbol de forma manual, se colocaron en bolsas de polietileno color negro y costales, se obtuvo el peso fresco total de hojas por árbol en kilogramos.
- ❖ Separación de ramas y ramillas: Se separaron manualmente las ramas y las ramillas de cada árbol muestreado, considerando los diámetros establecidos en el cuadro 5. Posteriormente se obtuvo el peso fresco total de ramas y ramillas en kilogramos, utilizando una balanza romana y semi analítica. La clasificación de ramas y ramillas se muestran en el cuadro 5.

Cuadro 5. Clasificación de las ramas y ramillas para los árboles de San Juan (*Vochysia guatemalensis* Donnell-Smithii).

Ramas Diámetro (cm)	Ramillas Diámetro (cm)
> de 2	≤de 2

Fuente: Lee (2002)

- ❖ Muestreo de hojas: Se obtuvieron tres (3) sub-muestras de hojas, se pasaron, se colocaron en bolsas de polietileno, se sellaron y se identificaron. El tamaño de cada sub-muestra fue de media libra aproximadamente. Se utilizaron balanzas romana y semi analítica para la toma de pesos.
- ❖ Muestreo de ramas y ramillas: Se obtuvieron tres (3) sub-muestras de ramas y ramillas, el tamaño de la muestra fue de 10 a 15 centímetros de longitud. Las muestras fueron pesadas en campo para obtener su peso fresco, utilizando balanza analítica. Finalmente fueron identificadas y colocadas en bolsas de polietileno bien identificadas.
- ❖ Cubicación del Fuste: Se midió la longitud del fuste, luego se cubicó utilizando la metodología de Smalian desarrollado, que consiste en seccionarlo como mínimo en 10 partes, en cada sección se registró el diámetro mayor, menor y la longitud de la sección; finalmente se realizó la sumatoria de las secciones cubicadas y se obtuvo el volumen del fuste en m³. Se utilizó la siguiente fórmulas para la cubicación:

$$V_i = (AB_1 (m^2) + AB_2 (m^2)/2) * L$$

$$VF = \sum V_i$$

En Donde:

V_i = Volumen de cada sección (m³)

AB_1 = Area Basal (m²)

AB_2 = Area Basal (m²)

L = Longitud de la sección del fuste (m)

VF = Volumen del Fuste (m³)

- ❖ Muestreo del Fuste: Se obtuvieron tres sub-muestras del fuste del árbol derribado, constituyéndose en tres rodajas parte baja, media y alta,

respectivamente, el grosor de la rodaja fué 1.5 pulgadas y se obtuvo el peso fresco en gramos (g).

- ❖ **Traslado de las muestras al laboratorio:** Después de haber concluido la fase de recolección de muestras en el campo, estas fueron trasladadas al laboratorio de la Universidad Rafael Landívar con sede en las Verapaces en un tiempo no mayor a tres días después de su recolección en campo para evitar la oxidación de la materia orgánica.

5.4.2. Fase de Laboratorio

En esta etapa de la investigación se obtuvieron las siguientes variables: volumen del fuste (m^3), peso seco de las sub muestras del fuste, hojas, ramas y ramillas en gramos, densidad de la madera (g/cc), biomasa total del árbol, contenido de carbono por árbol.

Secado de las muestras de hojas, ramas y ramillas en el laboratorio: Las sub muestras de hojas, ramas y ramillas fueron trabajadas en el mismo orden en el que fueron recolectadas en campo para evitar que se mezclaran o extraviaran, se ingresaron para secarlas a un horno de convección forzada marca BINDER 5-300 grados centígrados ($^{\circ}C$) del laboratorio de la Universidad Rafael Landívar, Campus San Pedro Claver a temperaturas que oscilaban entre 70 – 80 $^{\circ}C$, las muestras se sometieron a estas temperaturas para evitar la combustión y poder conservar los tejidos de las muestras; se registraron los pesos a cada veinticuatro horas utilizando una balanza semi analítica con sensibilidad de $\pm 0.01g$. Finalmente se obtuvo el peso seco de las muestras después estabilizarse durante 48 horas.

Análisis de sub muestras del fuste: Se registró el diámetro y grosor promedio, respectivamente de cada rodaja del fuste de la parte baja, media y alta en estado fresco, luego se obtuvo el volumen de cada sub muestra de rodaja en centímetros

cúbicos (cm³), posteriormente se obtuvo la densidad en g/cc de cada sub muestra utilizando las siguientes formulas:

$$V=(AB1 (m^2) + AB2 (m^2)/2)*L$$

$$D=M/V$$

En Donde:

V=Volumen de la rodaja (m³)

V=Volumen de rodaja en fresco (cc)

L=Longitud de la rodaja (m)

AB1= Area Basal (m²)

AB2= Area Basal (m²)

En Donde:

D=Densidad de la rodaja (g/cc)

M=Masa de la rodaja seca (g)

Secado de las sub-muestras de fuste: Las sub-muestras del fuste constituidas por rodaja parte baja, media y alta fueron ingresadas al horno de convección forzada de la marca BINDER 5 - 300 °C modelo FED 53, el cual se calibró a una temperatura que osciló entre 70 -80°C, el cual se ubica en la Universidad Rafael Landívar, sede las Verapaces; a cada una de las sub muestras se les registro el peso a cada 24 horas en boletas de laboratorio previamente diseñadas, para la obtención de estos pesos se utilizaron balanzas semi analíticas o balanzas portátiles con una sensibilidad de +-0.01g. El objetivo principal de este procedimiento fue el de obtener el peso seco de cada muestra del fuste, por lo que el registro de los pesos se mantuvo hasta que el mismo se estabilizara durante 72 horas (3 días), tomando esta lectura como peso seco y/o biomasa final de cada sub muestra de la parte alta media y baja del fuste. Se promediaron los pesos de las tres sub-muestras del fuste y se obtuvo la biomasa del fuste, sugerido por Pacay (2011).

5.4.3. Estimación de biomasa de las ramas, ramillas, hojas y fuste

Después de obtener el peso seco promedio de las sub-muestras del fuste, ramas, ramillas y hojas se procedió a estimar la biomasa por componente vegetal, utilizando las siguientes formulas:

a) Biomasa total de ramas (kg):

$$BTramas = (PSMr_{ram} \text{ (Kg)} / PFM_{ram} \text{ (Kg)}) * PHTram \text{ (kg)}$$

En donde:

BTramas= Biomasa total de ramas (kg)

PSMr_{ram}= Peso seco promedio muestra de ramas (kg)

PFMr_{ram}= Peso fresco promedio de la muestra de ramas (kg)

PHTram= Peso fresco total de ramas (kg)

b) Biomasa total de ramillas (kg)

$$BTramillas = (PSMr_{ramill} \text{ (Kg)} / PFM_{ramill} \text{ (Kg)}) * PHTramill \text{ (kg)}$$

En donde:

BTramillas= Biomasa total de ramillas (kg)

PSMr_{ramill}= Peso seco promedio muestra de ramillas (kg)

PFMr_{ramill}= Peso fresco promedio de la muestra de ramillas (kg)

PHTramill= Peso fresco total de ramillas (kg)

c) Biomasa total de hojas (kg)

$$BThojas = (PSM_{hojas} \text{ (Kg)} / PFM_{hojas} \text{ (Kg)}) * PHThojas \text{ (kg)}$$

En donde:

BThojas= Biomasa total de las hojas (kg)

PSM_{hojas}= Peso seco promedio muestra de hojas (kg)

PFM_{hojas}= Peso fresco promedio de la muestra de hojas (kg)

PHThojas= Peso fresco total de hojas (kg)

d) Densidad específica de parte alta, baja y media del fuste (g/cc):

Densidad específica de la parte alta

D.e.A.= Peso secado al horno secc. parte alta (g) / Volumen fresco secc. parte alta (cc)

Densidad específica de la parte media

D.e.M.= Peso secado al horno secc. parte media (g) / volumen fresco secc. parte media (cc)

Densidad específica de la parte baja

D.e.B.= Peso secado al horno secc. parte baja (g) / volumen fresco secc. parte baja (cc)

e) Densidad promedio del fuste (DPF en g/cc):

$$DPF. = (D.e.A + D.e.M+ D.e.B)/3$$

Donde:

DPF=Densidad promedio del fuste (g/cc)

D.e.B= Densidad específica obtenida de la base del fuste

D.e.M= Densidad específica obtenida de la sección media del fuste

D.e.A= Densidad específica obtenida de la sección alta del fuste

f) Biomasa del Fuste (Kg)

$$BF= \{D.e.P \text{ (gr/ cc)} * VF \text{ (m}^3\text{)} * 1000000\} / 1000$$

En donde:

D.e.P= Densidad específica promedio del fuste

BF= Biomasa del fuste (kg)

VF= Volumen del fuste (m³)

5.4.4 Estimación de biomasa total por árbol (kg)

Después de haber estimado la biomasa por cada parte vegetativa (Ramas, ramillas, hojas y fuste), se realizó la sumatoria de cada uno de los componentes del árbol y se obtuvo la biomasa total por árbol en kilogramos, utilizando la siguiente fórmula:

$$\text{Biomasa total por árbol (kg)} = BF + B\text{Tramas} + B\text{Tramillas} + B\text{Hojas}$$

En donde:

BF=Biomasa del fuste

BTramas= Biomasa total de ramas

BTramillas= Biomasa total de ramillas

BHojas= Biomasa total de las hojas

5.4.5. Determinación del factor de conversión de carbono

Se seleccionaron 86 sub-muestras de fuste, ramas, ramillas y hojas correspondientes a seis árboles, seleccionados de acuerdo al Diámetro a la altura del pecho, con el objeto de contemplar las cinco clases diamétricas previamente establecidas y lograr una mejor certeza en el estudio. Solamente en dos árboles se duplicó la cantidad de sub-muestras analizadas con el fin de verificar la variabilidad de los resultados de un mismo árbol (cuadro 6 y anexo 10). La determinación del factor de conversión de carbono se realizó en el laboratorio especializado de la Universidad del Valle de Guatemala -UVG- en donde se pulverizaron todas las sub-muestras, se depositaron en bolsas de papel para luego ingresarlas al analizador elemental de carbono y nitrógeno (Flash EA 1112), en el cual las muestras fueron sometidas a la prueba de los elementos antes mencionados, la constancia de los resultados se presentan en el Anexo 8.

Cuadro 6. Distribución de los árboles muestreados por clase diamétrica para determinar el Factor de Conversión de Carbono.

No. Clase diamétrica	Rango clase diamétrica (cm)	No. Árboles muestreados
1	3 – 9.99	1
2	10 – 16.99	2
3	17 – 23.99	1
4	24 – 30.99	1
5	31 – 37.99	1
TOTAL		6 árboles

5.4.6. Factor o Índice de expansión de biomasa

El factor de expansión de biomasa -FEB- se determinó realizando una relación matemática entre la biomasa total de cada árbol con la biomasa del fuste, luego se promediaron los 20 árboles evaluados y se obtuvo el FEB final, esto con el propósito de abarcar todos los diámetros establecidos en la investigación, según lo indica Lee (2002). Es importante mencionar que este índice de biomasa determinado para la

especie forestal (*Vochysia guatemalensis* Donnell-Smithii) permitirá realizar estimaciones de biomasa total del árbol partiendo de los datos de inventarios forestales convencionales; en el que ya estará incluida la biomasa de las ramas, ramillas y hojas, puesto que en el inventario tradicional solo se puede realizar estimaciones de biomasa del fuste. Para realizar el cálculo de biomasa total se utilizó la siguiente fórmula:

$$FEB = BT/BF.$$

En donde:

FEB= Factor de expansión de biomasa.

BT= Biomasa total (kg)

BF= Biomasa del fuste (kg)

5.4.7. Estimación del contenido de carbono total por encima del suelo

Se ordenaron los resultados de biomasa obtenidos por árbol en función de las clases diamétricas previamente establecidas, los datos de biomasa por árbol se dividieron dentro de 1000, para convertirlos a toneladas de biomasa por árbol y se multiplicaron por el factor de conversión de biomasa a carbono previamente determinado para el árbol San Juan en el laboratorio químico de la Universidad del Valle de Guatemala. Se utilizó la siguiente fórmula:

$$C_{tot} \text{ (ton)} = (\text{Biomasa (kg)}/1000) * FCBC$$

En donde:

C_{tot} (ton)=Carbono total en toneladas (ton)

FCBC= Factor de conversión de Biomasa a Carbono para el San Juan.

5.4.8. Determinación del Modelo Matemático para Estimación de Biomasa

Se relacionaron las variables independientes (DAP, Altura total y Diámetro de copa) con la variable dependiente (Biomasa total), utilizando el InfoStat versión 2010. Para lo cual se realizó el análisis de correlación, análisis de tendencia, análisis de regresión lineal, cuadrático y múltiple; posteriormente se relacionaron las variables independientes con la Biomasa de Fuste, con el propósito de generar el modelo

matemático que mejor estime la biomasa total de los árboles de San Juan (*Vochysia guatemalensis* Donnell-Smithii), realizando los siguientes prodecimientos:

Observación de Tendencias: Se realizaron las gráficas de dispersión para observar la tendencia mostrada al relacionar las variables independientes (DAP, altura y Diámetro de copa) con la dependiente (Biomasa total), esto evidenció la relación positiva que se tiene al relacionar las variables X con la Y; lo cual se realizó utilizando el programa INFOSTAT versión 2010. Posteriormente se realizó el análisis de correlación entre las variables.

Análisis de correlación: Según López y González (2016), indican que el coeficiente de correlación (R) de Pearson debe oscilar entre -1 y 1, lo cual significa que entre más alejado del valor cero (0) esté el valor de R mayor será la el grado de asociación lineal existente entre una variable regresora con la dependiente. Sin embargo, $\rho = 0$ no indica ausencia de asociación entre las variables, pero sí, ausencia de asociación lineal entre las variables. Se utilizó el programa estadístico INFOSTAT para realizar el análisis de correlación entre las variables regresoras con la independiente (biomasa total).

Inferencia acerca del coeficiente de correlación: Según López y González (2016), indican que se realiza la prueba de hipótesis con el propósito de verificar desde el punto de vista estadístico si el coeficiente de correlación (r) de Pearson es diferente o igual a cero, para lo cual se utiliza la prueba de T de student para aceptar o rechazar la hipótesis nula (H_0), teniendo como regla de decisión $P = 0$ no existe correlación lineal (H_0), y $P \neq 0$ (H_a) existe correlación lineal. Este análisis se realizó utilizando el programa INFOSTAT.

Evaluación del ajuste de la regresión: Se realizó un análisis de correlación entre cada una de las variables regresoras o independientes (DAP, Altura, Diámetro de copa) y las variables dependientes (biomasa tota, Biomasa del Fuste), haciendo el análisis con el programa estadístico InfoStat versión 2010, para generar los

modelos de las regresiones lineales, cuadráticas y polinómicas, en donde el ajuste de dichos modelos se evaluaron estadísticamente utilizando la “t” de student, utilizando como regla de decisión de que si $\beta=0$ no existe regresión lineal, lo cual se estableció como hipótesis nula y que si $\beta\neq 0$ significa que si existe regresión lineal, definiéndose como hipótesis alternativa, en donde β representa la pendiente de la recta en el modelo; Se tomó la decisión en base a que si el valor de “P” era menor a 0.05 se rechazó la hipótesis nula y la hipótesis alternativa se aceptaba, utilizando un nivel de confianza de 0.95 y 0.5 de significancia; además se tomó en cuenta el valor del Coeficiente de Determinación (R^2), el cual va de 0 a 1, lo que significa que entre mas cercano a el valor 1 esté, mejor va ser la representatividad de los datos en el modelo generado.

Análisis de regresión Lineal simple y cuadrática o de grado 2

a). Se realizó el análisis de regresión lineal simple entre las variables regresoras (DAP, altura y Diámetro de copa) con la variable dependiente (Biomasa total).

b). Posteriormente se realizó el análisis de regresión cuadrática o de grado 2 a cada una de las variables regresoras con la dependiente (Biomasa total), tanto en la lineal como en la cuadrática se midió el grado de ajuste a través del Coeficiente de Determinación (R^2), se les realizó la prueba de hipótesis con la tabla de distribución de t student con el fin de verificar si existe una relación significativa en las variables estudiadas, se utilizó un nivel de significancia de 0.05 y confianza del 95%, se planteó la hipótesis nula (H_0) $\beta=0$ que significa que no existe regresión y se acepta la hipótesis alternativa (H_a) $\beta \neq 0$ que significa que si existe regresión entre las variables y β es la pendiente de la recta del modelo generado.

Análisis de regresión lineal múltiple

Se realizó el análisis de regresión lineal múltiple, utilizando la indicación de López y Gonzalez (2016), los cuales mencionan que para conocer el tipo de regresión existente entre cada una de las variables independientes con la variable dependiente, se procede a elaborar el análisis de regresión múltiple, el cual define

la manera en que la variable dependiente (Biomasa) se relaciona con todas las variables independientes (Diámetro a la Altura del Pecho, Altura total del árbol y Diámetro de la copa).

Supuestos del modelo matemático generado: Una vez generado el modelo matemático, según Sagui (2011) se deben evaluar una serie de condiciones que deben darse para validar el modelo. En esta investigación se utilizó el supuesto de homocedasticidad.

6. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

6.1. ESTIMACIÓN DE LA BIOMASA TOTAL POR ENCIMA DEL SUELO DE LOS ÁRBOLES DE SAN JUAN (*Vochysia guatemalensis* Donnell-Smithii).

6.1.1. Medición de campo de los componentes vegetales de los árboles de San Juan (*Vochysia guatemalensis* Donnell-Smithii)

Se seleccionaron 20 árboles de San Juan (*Vochysia guatemalensis* Donnell-Smithii) establecidos en plantaciones forestales mixtas e ingresadas al Programa de Incentivos Forestales –PINFOR- utilizando la metodología destructiva propuesta por Winrock International Institute (1996), a los que se les midió el peso fresco de las hojas, ramas, ramillas y fuste. El criterio de selección de las unidades de muestreo se basó de acuerdo a las clases diamétricas previamente definidas. Los resultados obtenidos se presentan en el cuadro 7.

Cuadro 7. Variables medidas en árboles muestreados.

No. Arbol	DAP (cm)	ALTURA (m)	DIÁMETRO DE COPA (m)
1	20.37	14.9	4.73
2	16.71	13	5.66
3	7.67	6.01	3.75
4	6.12	5.89	3.21
5	13.05	7.9	4.19
6	10.42	8.03	3.18
7	23.07	13.45	6.57
8	25.3	16.78	6.62
9	22.04	13.98	4.63
10	24.82	16.05	4.99
11	29.28	19.25	5.91
12	32.15	19.12	5.37
13	18.72	14.02	3.99
14	31.83	21.02	3.26
15	26.89	20.25	3.92
16	35.01	15.42	4.35
17	32.56	16.05	7.9
18	9.71	8.42	3.07
19	6.43	7.46	2.91
20	14.64	10.64	3.69

En el cuadro 7 se observan las variables morfométricas medidas a los árboles de San Juan estudiados, donde los valores mayores de DAP, altura y diámetro de copa encontrados fueron 35.01 cm, 21 m y 7.9 m, respectivamente; mientras que los valores mínimos fueron 6.12 cm de DAP, 5.89 m de altura y 2.91 m de diámetro de copa, lo cual indica el rango mínimo y máximo de DAP a considerar cuando se realicen estimaciones de biomasa y cuantificación de carbono en la especie forestal estudiada.

6.1.2. Pesos frescos de los componentes vegetales

Después de haber derribado los árboles se obtuvieron los pesos frescos totales por cada parte vegetativa, las cuales fueron el fuste, hojas, ramas y ramillas; los cuales se muestran en el cuadro 8.

Cuadro 8. Pesos estimados de los componentes vegetales de los árboles de San Juan muestreados.

No. Árbol	Biomasa peso fresco (kg)				Peso Fresco Total (kg)
	Fuste	Hojas	Ramas	Ramillas	
1	211.4	24.587	65.691	28.295	329.97
2	126.3	19.31	80.5	22.27	248.38
3	183.2	7.811	5.295	7.556	203.86
4	20.7	19.945	4.977	14.14	59.76
5	38.2	38.636	28.636	24.09	129.56
6	29.2	13.59	12.045	9.272	64.10
7	221.2	30.41	47.27	25.91	324.79
8	367.2	78.34	96.136	37.272	578.94
9	211.7	26.05	59.77	21.59	319.11
10	282.8	39.736	107.27	36.36	466.16
11	515.3	30.59	115.68	34.318	695.88
12	599.3	34.94	114.09	30.909	779.23
13	156.8	21.776	40.227	19.09	237.89
14	704.7	27.57	118.409	32.04	882.71
15	552.1	22.17	53.636	17.5	645.40
16	508.2	97.272	17.727	20.227	643.42
17	494.6	59.54	292.72	56.81	903.67
18	26.7	12.045	10.227	11.59	60.56
19	8.66	3.693	4.54	3.977	20.87
20	78.3	20.77	18.86	13.181	131.11
Total	5336.56	628.781	1293.706	466.397	7725.444

En el cuadro 8 se observan los pesos frescos en campo por cada componente vegetativo de los árboles derribados, a partir de estos datos se calculó el porcentaje que aporta cada componente al peso fresco total del árbol; en la figura 2 se indica que el fuste es quien registró el mayor peso fresco en relación a todos los componentes vegetales, conteniendo el 69% en promedio, seguido por las ramas (17%) y por ultimo las ramillas con 6 %.

Se determinó que el fuste es el que más peso fresco aporta, asimismo este será el componente vegetal con mayor biomasa y por consiguiente tendrá más carbono, el segundo lugar lo ocupan las ramas.

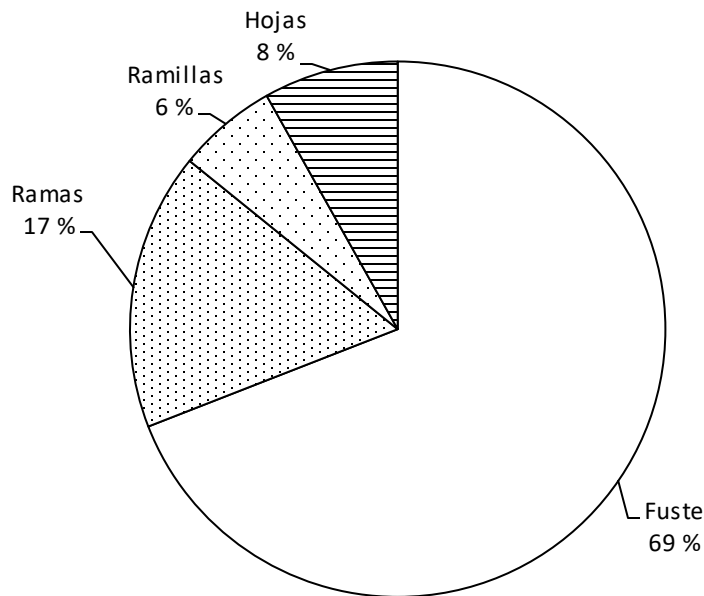


Figura 2. Pesos frescos por componente vegetal en porcentaje (%)

6.1.3 Cálculo de la densidad de la madera del árbol San Juan.

Se calculó la densidad de la madera del árbol San Juan a través del análisis de las sub-muestras del fuste recopiladas en campo. Los resultados se presentan en el cuadro 9.

Cuadro 9. Cálculo de la densidad de la madera del árbol San Juan.

No. Arbol	DAP (cm)	Densidad del fuste	Densidad de la madera (g/cc)
1	20.37	0.356	
2	16.71	0.328	
3	7.67	0.361	
4	6.12	0.363	
5	13.05	0.346	
6	10.42	0.331	
7	23.07	0.635	
8	25.3	0.282	
9	22.04	0.435	
10	24.82	0.317	
11	29.28	0.399	0.370
12	32.15	0.378	
13	18.72	0.314	
14	31.83	0.409	
15	26.89	0.383	
16	35.01	0.329	
17	32.56	0.366	
18	9.71	0.327	
19	6.43	0.407	
20	14.64	0.334	

En el cuadro 9 se observa que la densidad estimada de la madera de San Juan (*Vochysia guatemalensis* Donnell-Smithii) es 0.37 g/cc, la cual debe utilizarse para realizar el cálculo de biomasa en una plantación forestal. Se puede observar que la madera es blanda debido a su baja densidad, en comparación con maderas duras, por ejemplo la teca con una densidad de 0.57 g/cc estimada por López (2017).

6.1.4. Biomasa estimada por componente vegetal

Se realizó el cálculo de la biomasa estimada de las partes vegetativas hojas, ramas, ramillas y fuste por cada árbol derribado a partir de los pesos secos, los cuales se muestran en el cuadro 10.

Cuadro 10. Biomasa estimada por árbol muestreado.

No. Arbol	Biomasa en Fuste (kg)	Biomasa en Ramas (kg)	Biomasa en Ramillas (kg)	Biomasa en Hojas (kg)	Biomasa total (kg)
1	75.259	27.935	9.908	6.84	119.942
2	41.487	30.617	8.285	4.375	84.764
3	66.15	2.084	1.014	1.356	70.604
4	7.515	1.817	5.308	5.418	20.058
5	13.227	11.056	8.958	10.708	43.949
6	9.668	4.491	3.386	4.319	21.864
7	140.642	20.167	10.308	7.875	178.992
8	103.584	43.889	15.631	20.624	183.728
9	92.253	25.205	8.861	7.734	134.053
10	89.908	45.376	13.283	11.163	159.73
11	205.622	54.415	13.677	7.854	281.568
12	226.668	53.593	12.844	10.896	304.001
13	49.279	15.075	6.875	5.634	76.863
14	288.815	46.964	10.842	7.377	353.998
15	211.865	22.564	6.348	5.98	246.757
16	167.326	7.396	7.389	28.211	210.322
17	181.355	113.69	20.579	16.759	332.39
18	8.739	3.666	4.055	3.046	19.506
19	3.526	1.552	1.381	1.026	7.485
20	26.216	7.115	4.735	5.706	43.772

En el cuadro 10 se observa que el árbol que contenía más biomasa total por encima del suelo fue 353.99 kg, registrando las variables dasométricas siguientes: 31.83 centímetros de DAP, 21.02 metros de altura y 3.26 metros de Diámetro de la copa y el árbol que menos biomasa total por encima del suelo fue 7.48 kg, el cual registró 6.43 cms de DAP, 7.46 metros de altura y 2.91 metros de diámetro de copa. El

fuste es el componente vegetal que más biomasa acumula en comparación con las ramillas, ramas y hojas del árbol; las hojas son las que menos biomasa acumulan.

Posteriormente se calculó el porcentaje de biomasa que contiene cada componente vegetal de los árboles de San Juan muestreados, observándose en la figura 3.

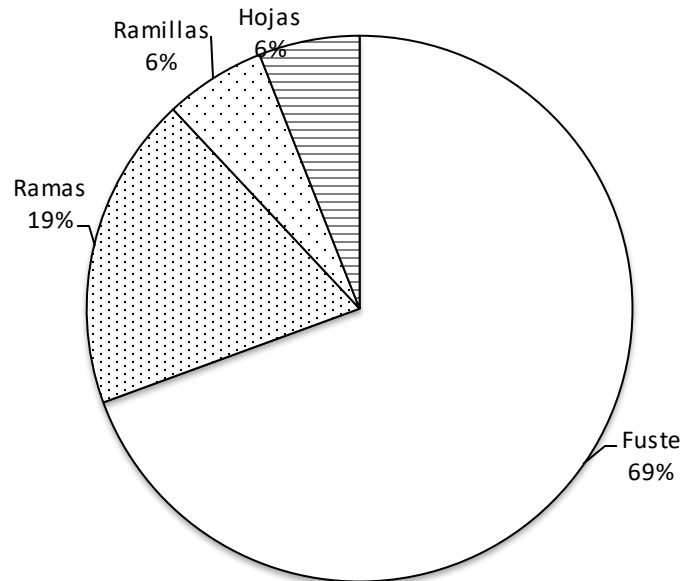


Figura 3. Porcentaje de biomasa seca por componente vegetal del árbol de San Juan.

En la figura 3 se observa que el fuste contiene el mayor porcentaje de biomasa seca (69 %), de los 20 árboles evaluados, mientras que las hojas y ramillas contienen el menor porcentaje de biomasa de los arboles (6, 6, respectivamente).

6.1.5. Análisis comparativo de predicción de biomasa entre lo real y los modelos general y específico.

Se realizó un análisis comparativo, entre la biomasa real obtenida versus la estimada a través del modelo generado por Lee (2002) y la generada en el presente estudio para el árbol San Juan (*Vochysia guatemalensis* Donnell-Smithii). En donde se puede observar el comportamiento de la estimación de biomasa utilizando las tres formas (directo o real, con modelo general y específico), indicando que el

modelo matemático específico generado en el presente estudio se acerca más a la biomasa real estimada, lo cual se puede verificar en la figura 4.

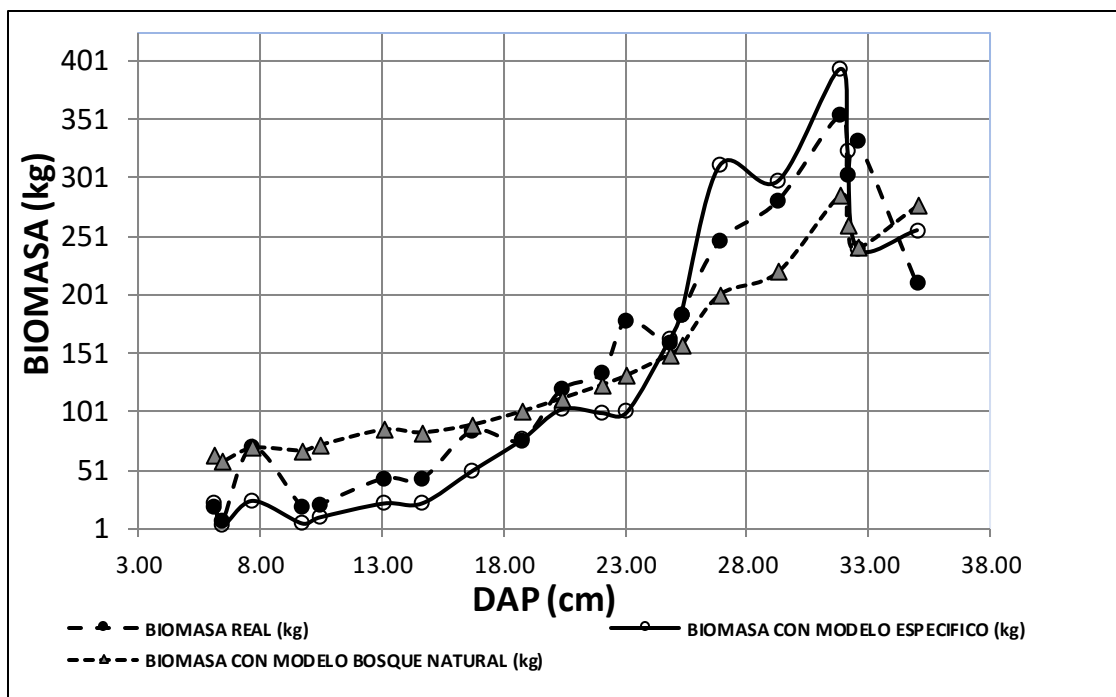


Figura 4. Comparación de la biomasa real estimada versus el modelo específico generado y el modelo de bosque natural.

6.1.6. Prueba de hipótesis estadística de medias poblacionales dependientes (o pareadas) a los valores estimados de biomasa.

Se realizó una prueba de hipótesis estadística de medias poblacionales dependientes a los valores estimados de biomasa mediante los modelos general, específico y el real estimado en campo, utilizando como estadístico de prueba la t de Student, con un nivel de significancia de 0.05, una hipótesis nula (H_0): $\mu = \mu$ e hipótesis alterna (H_a): $\mu \neq \mu$; obteniéndose como resultado valores de “ t ” observada menores al valor de “ t ” crítica (significancia 5%) de 2.093, por lo que se acepta la H_0 (cuadro 18a) indicando que no existen diferencias estadísticas al utilizar el modelo general o específico para estimar la biomasa en los árboles de San Juan en plantaciones forestales; sin embargo, al observar la figura 4 se puede apreciar que el modelo matemático específico generado es quien más se acerca a lo real estimado en campo.

6.2. DETERMINACIÓN DEL FACTOR DE CONVERSIÓN DE BIOMASA A CARBONO PARA EL SAN JUAN

6.2.1. Determinación del Factor de Expansión de Biomasa (FEB)

Se estimó el factor de expansión de biomasa dividiendo la biomasa total de los arboles estudiados dentro de la biomasa del fuste. Los resultados se presentan en el cuadro 11.

Cuadro 11. Factor de Expansión de Biomasa.

No. árbol	DAP (cm)	Biomasa en fuste (kg)	Biomasa total (kg)	Factor de Expansión de Biomasa
1	20.37	75.26	119.94	
2	16.71	41.49	84.76	
3	7.67	66.15	70.60	
4	6.12	7.52	20.06	
5	13.05	23.61	43.95	
6	10.42	9.67	21.86	
7	23.07	140.64	178.99	
8	25.3	103.58	183.73	
9	22.04	92.25	134.05	
10	24.82	89.91	159.73	
11	29.28	205.62	281.57	1.44
12	32.15	226.67	304.00	
13	18.72	49.28	76.86	
14	31.83	288.82	354.00	
15	26.89	211.87	246.76	
16	35.01	167.33	210.32	
17	32.56	181.36	332.38	
18	9.71	8.74	19.51	
19	6.43	3.53	7.49	
20	14.64	26.22	43.77	

En el cuadro 11 se observa que el factor de expansión de biomasa estimado para la especie forestal San Juan es 1.44, lo cual indica que el 44 % de la biomasa total del árbol se encuentra en la copa (ramas, ramillas y hojas) y el 56 % se encuentra en el fuste; sin embargo, al utilizar este factor para calcular la biomasa por árbol es necesario utilizar la densidad específica de la madera, el cual es 0.37 g/cc.

6.2.2. Determinación del factor de conversión de carbono

Se seleccionaron 6 árboles de San Juan (*Vochisya guatemalensis* Donnell-Smithi), obteniéndose sub-muestras de las partes vegetativas hojas, ramas, ramillas y fuste, las cuales fueron analizadas en el laboratorio del Centro de Estudios Ambientales

y Biodiversidad que pertenece a la Universidad del Valle de Guatemala (UVG), duplicando el número de muestras en 2 árbol para verificar la variación en un mismo árbol (anexo 10); el análisis consistió en realizarle la prueba de Carbono y Nitrogeno a las muestras y como resultado se tuvo la generación del Factor de Conversión de Carbono para la especie antes mencionada. Este factor se utilizó para estimar el carbono presente en todas las partes vegetativas que componen el árbol a partir de la biomasa total del árbol, los resultados se muestran en el cuadro 12.

Cuadro 12. Factor de conversión de carbono a partir de la biomasa total del árbol San Juan (*Vochysia guatemalensis* Donnell-Smithi).

No. muestra	Carbono orgánico sobre base seca (%)	No. Muestra	Carbono orgánico sobre base seca (%)	No. muestra	Carbono orgánico sobre base seca (%)	Factor de conversión de biomasa a carbono (%)
1	48.43	30	49.93	59	50.33	
2	47.82	31	48.94	60	52.3	
3	48.15	32	46.75	61	48.71	
4	40.53	33	48.65	62	49.48	
5	40.13	34	48.32	63	48.67	
6	48.26	35	46.99	64	48.23	
7	48.79	36	40.13	65	39.55	
8	48.6	37	49.08	66	40.46	
9	48.72	38	48.61	67	47.04	
10	50.04	39	40.65	68	50.46	
11	49.03	40	48.75	69	49.27	
12	45.83	41	48.78	70	44.08	
13	46.75	42	62.13	71	47.41	
14	39.83	43	43.08	72	47.64	
15	40.15	44	46.43	73	47.92	47.73
16	46.71	45	48.9	74	48.09	
17	47.02	46	50.21	75	46.83	
18	47.57	47	42.17	76	49.52	
19	47.17	48	42.46	77	51.55	
20	50.10	49	47.52	78	51.19	
21	47.18	50	48.66	79	51.21	
22	46.78	51	48.45	80	50.29	
23	48.78	52	49.26	81	51.54	
24	52.18	53	48.46	82	42.67	
25	43.1	54	48.99	83	64.21	
26	47.11	55	43.71	84	48.78	
27	51.31	56	41.79	85	45.57	
28	50.38	57	47.86			
29	50.09	58	49.18	86	50.12	

En el cuadro 12 se observan los resultados de la prueba de carbono realizada a las sub-muestras las partes vegetativas (Fuste, ramas, ramillas y hojas) de los árboles, la cual se realizó en el laboratorio del Centro de Estudios Ambientales y Biodiversidad que pertenece a la Universidad del Valle de Guatemala. El factor específico de conversión de biomasa a carbono determinado para el San Juan fue 47.73 %, sin embargo, se realizó un análisis de varianza (cuadro 19a) a los resultados (cuadro 13) de la prueba de carbono. Los resultados de las muestras evaluadas se muestran en el cuadro 13.

Cuadro 13. Determinación del Factor de conversión de biomasa a carbono por componente vegetal de los árboles evaluados.

% DE CARBONO POR PARTE VEGETATIVA EVALUADA				
No. Arbol	Fuste	Ramas	Ramillas	Hojas
6	47.91	46.11	53.22	43.56
8	46.14	46.21	48.72	46.19
9	42.35	46.38	47.61	49.87
16	48.13	48.55	49.26	40.33
18	46.29	47.10	48.15	39.99
20	49.25	50.59	49.44	45.11
Promedio	46.68	47.49	49.40	44.17

En el cuadro 13 se observan los resultados de la prueba de carbono obtenidos del análisis de las sub-muestras por cada parte vegetativa de los arboles evaluados. Lo cual indica que las ramillas son las que mayor carbono almacenan (49.40 %) y las hojas las que menor carbono almacenan (44.17 %). Estos factores de conversión de biomasa a carbono determinados por componente vegetal se utilizaron para la cuantificación de carbono total por árbol en el presente estudio. Así mismo se realizó el análisis de Varianza (ANDEVA) observar cuadro 19a. que indica que hay diferencias estadísticas entre los resultados de carbono por componente vegetal (Figura 5).

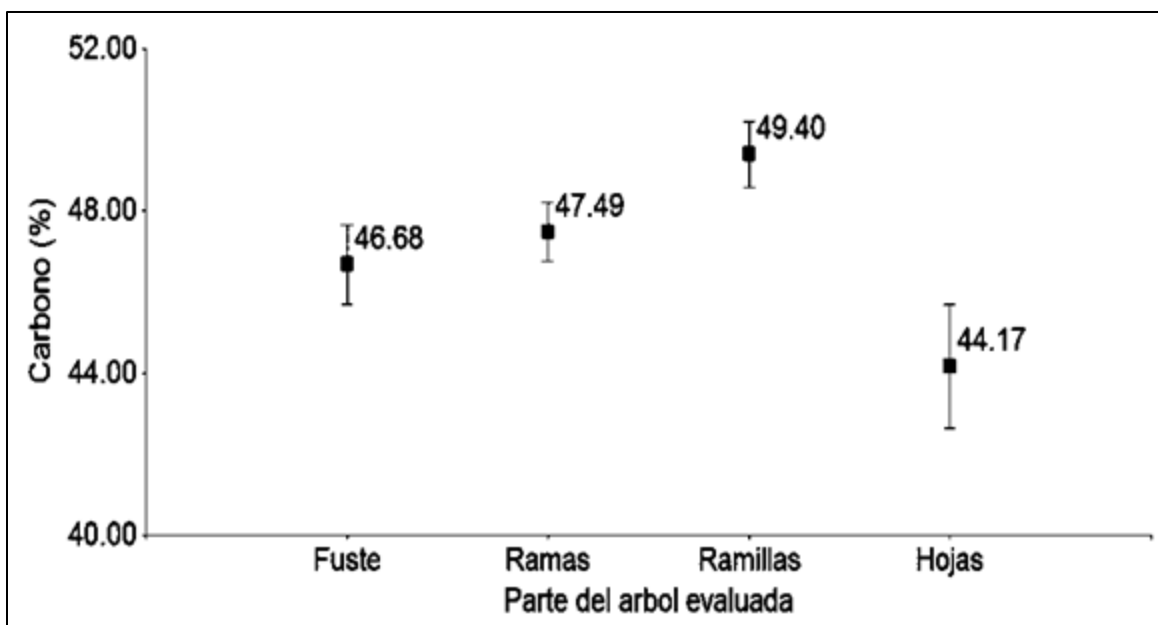


Figura 5. Grafica de comportamiento de medias

6.3. ESTIMACION DE CARBONO TOTAL POR ENCIMA DEL SUELO POR ARBOL

Se cuantificó el carbono por componente vegetal de los árboles de San Juan (*Vochysia guatemalensis* Donnell-Smithii) establecido en plantaciones forestales por el Programa de Incentivos Forestales (PINFOR) partiendo de las sub-muestras recopiladas en campo (fuste, ramas, ramillas y hojas) y analizadas en el laboratorio del Centro de Estudios Ambientales y Biodiversidad que pertenece a la Universidad del Valle de Guatemala. Se utilizaron los factores de conversión de carbono por componente vegetal descritos en el cuadro 13. Los resultados se presentan en el cuadro 14.

Cuadro 14. Cuantificación de carbono total por encima del suelo por componente vegetal.

No. árbol	DAP	Carbono en Fuste (kg)	Carbono de Ramas (kg)	Carbono en Ramillas (kg)	Carbono en Hojas (kg)	Carbono total por árbol (kg)
1	20.37	35.1460	13.2691	4.8946	3.0233	56.3329
2	16.71	19.3744	14.5431	4.0928	1.9338	39.9440
3	7.67	30.8921	0.9899	0.5009	0.5994	32.9822
4	6.12	3.5095	0.8631	2.6222	2.3948	9.3895
5	13.05	6.1770	5.2516	4.4253	4.7329	20.5868
6	10.42	4.5150	2.1332	1.6727	1.9090	10.2299
7	23.07	65.6798	9.5793	5.0922	3.4808	83.8320
8	25.3	48.3737	20.8473	7.7217	9.1158	86.0585
9	22.04	43.0822	11.9724	4.3773	3.4184	62.8503
10	24.82	41.9870	21.5536	6.5618	4.9340	75.0365
11	29.28	96.0255	25.8471	6.7564	3.4715	132.1005
12	32.15	105.8540	25.4567	6.3449	4.8160	142.4716
13	18.72	23.0133	7.1606	3.3963	2.4902	36.0604
14	31.83	134.8766	22.3079	5.3559	3.2606	165.8011
15	26.89	98.9410	10.7179	3.1359	2.6432	115.4379
16	35.01	78.1412	3.5131	3.6502	12.4693	97.7738
17	32.56	84.6928	54.0028	10.1660	7.4075	156.2690
18	9.71	4.0811	1.7414	2.0032	1.3463	9.1720
19	6.43	1.6466	0.7372	0.6822	0.4535	3.5195
20	14.64	12.2429	3.3796	2.3391	2.5221	20.4836

En el cuadro anterior se observa la distribución del carbono fijado en cada componente vegetal de los árboles evaluados, el cual indica que el fuste es quien más carbono fija, seguido por las ramas, asimismo se observa que el árbol con DAP de 31.83 centímetros contenía 165.80 kg de carbono, mientras que el de menor DAP (6.12 cm) registró un contenido de carbono capturado (9.38 kg), esto indicó que tanto el árbol con mayor DAP no registró mayor Carbono y el árbol de menor diámetro no registró menor contenido de carbono.

6.4. GENERACIÓN DEL MODELO MATEMATICO PARA LA ESTIMACIÓN DE BIOMASA Y CUANTIFICACIÓN DE CARBONO

Se utilizó el software estadístico denominado InfoStat versión 2008 para correlacionar las variables independientes DAP, altura y diámetro de la copa, con la variable dependiente Biomasa total de los árboles de San Juan estudiados y generar el modelo matemático que mejor estime la biomasa total y el carbono total por encima del suelo de los árboles estudiados. Se generaron diagramas de dispersión, análisis de correlación de Pearson, análisis de regresión lineal simple, análisis de regresión lineal con polinomios de grado 2; se describen a continuación:

6.4.1. Diagramas de dispersión y análisis de correlación de Pearson

Se realizó el análisis de correlación y diagramas de dispersión entre las variables independientes (DAP, altura y diámetro de copa) con la Biomasa total de los árboles estudiados, con el objeto de observar la tendencia y el grado de asociación entre ambas variables Según Pacay, (2011). Se generaron los diagramas de dispersión siguientes:

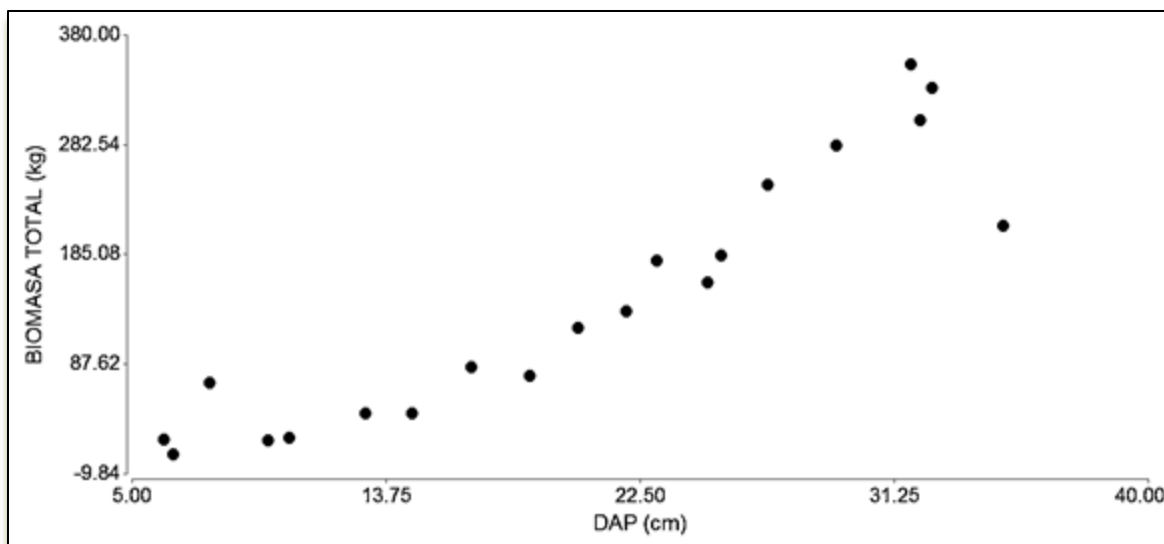


Figura 6. Diagrama de dispersión y correlación entre el DAP (cm) y la biomasa total del árbol

Se relacionó la variable independiente DAP (cm) y la variable dependiente Biomasa total del árbol (kg), indicando que existe relación lineal positiva entre ambas, es

decir, que a mayor DAP, mayor es la biomasa del árbol y viceversa; sin embargo los arboles No. 3 y 16 se encuentran fuera de la línea de tendencia.

Se realizó el análisis de correlación de Pearson entre las variables DAP y Biomasa total, el resultado fue que existe el 92 % de correlación entre ambas variables (cuadro 20a.).

Posteriormente se realizó el análisis de dispersión y correlación entre la altura y la Biomasa total.

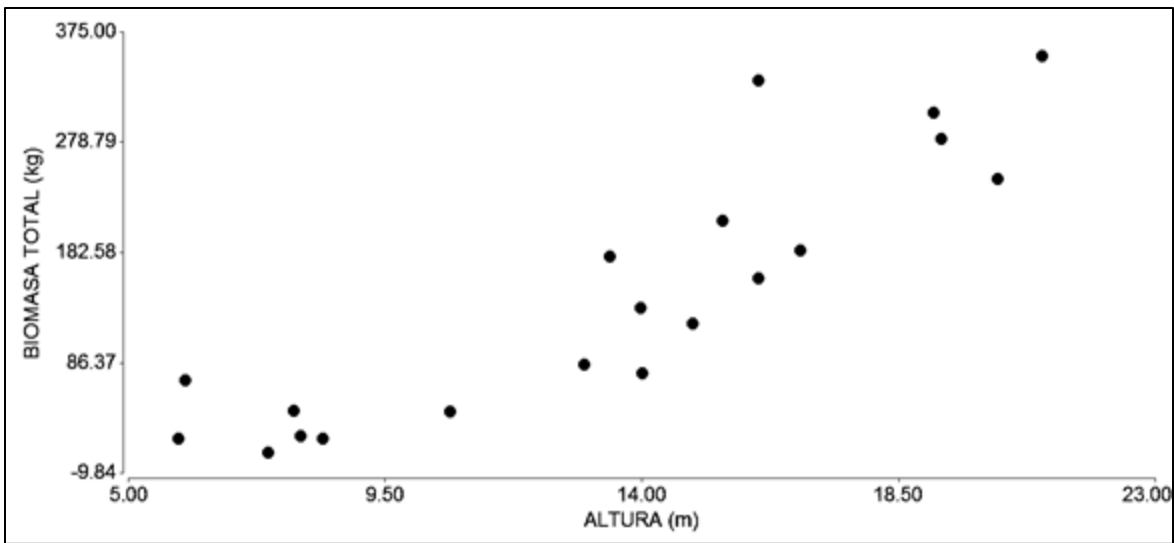


Figura 7. Diagrama de dispersión entre la Altura (m) y la biomasa total del árbol (kg).

En la figura 7 se observa que existe una relación positiva entre la altura y la Biomasa total de los árboles, es decir, que a medida que se incrementa la altura se incrementa la biomasa total.

El resultado del análisis de correlación entre ambas variables determinó que el coeficiente de correlación (R) es 0.89 (cuadro 21a.), esto demuestra que a medida que incrementa la variable independiente también la biomasa lo hace.

Además se realizó el análisis de correlación y diagrama de dispersión entre el diámetro de copa y la biomasa total.

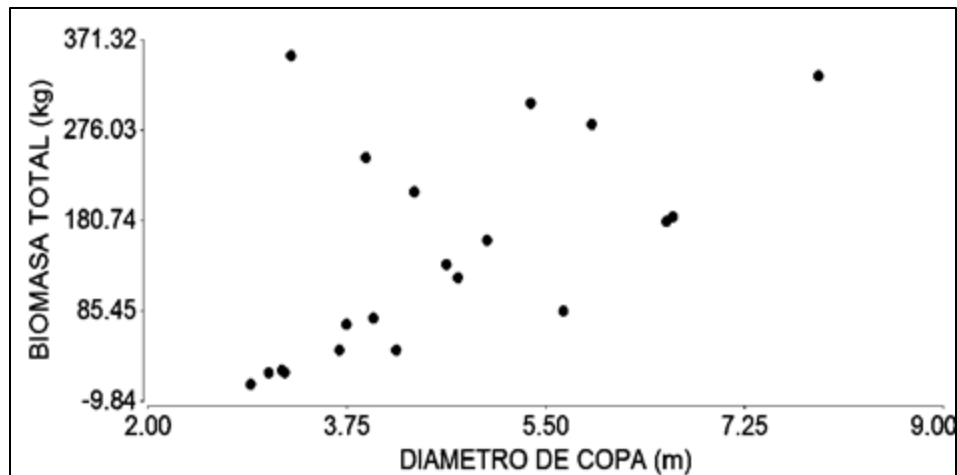


Figura 8. Diagrama de dispersión y correlación entre el diámetro de la copa (m) y la biomasa total del árbol (kg)

En la figura 8 se observa que no hubo un comportamiento positivo al relacionar el Diámetro de copa como variable independiente con la Biomasa total del árbol como variables dependiente, es decir, que a mayor diámetro de copa no incrementa el valor de la biomasa.

Se realizó el análisis de correlación de Pearson entre la variable independiente Diámetro de copa y la variable dependiente Biomasa total y como resultado se tuvo un coeficiente de correlación $R=0.56$ (cuadro 22a.) esto demuestra que existe una correlación débil entre las variables, es decir, que a medida que se incrementa el diámetro de la copa no sucede lo mismo con la cantidad de biomasa del árbol.

Posteriormente se procedió a realizar el análisis de regresión lineal simple:

6.4.2. Análisis de Regresión Lineal Simple

Se realizó el análisis de regresión lineal simple entre variables independientes DAP, Biomasa y Diámetro de copa con la variable dependiente Biomasa, para verificar estadísticamente el ajuste entre ambas, se realizó una prueba de hipótesis con una prueba de "t" student en donde la regla de decisión utilizada fue de que si $\beta=0$ no existe regresión lineal, lo cual se estableció como la hipótesis nula, y que si $\beta \neq 0$ si existe regresión lineal, lo cual se definió como la hipótesis alternativa, en donde β representa la pendiente de la recta en el modelo utilizando un nivel de confianza del 0.95 y un nivel de significancia de 0.05. Los resultados se observan en las figuras 9, 10 y 11.

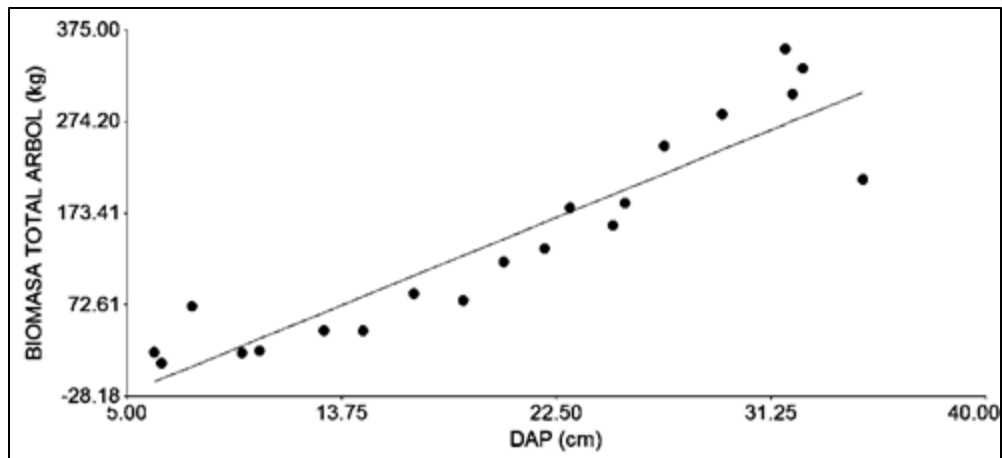


Figura 9. Diagrama de regresión lineal simple entre la variable independiente o regresora DAP y la variable dependiente biomasa total

En la figura 9 se observa la distribución de los datos del análisis de regresión lineal simple en donde el DAP fue la variable regresora, obteniéndose un coeficiente de determinación (R^2) de 0.85 esto significa que existe un buen ajuste de las variables al modelo generado, se observó que el valor de "P" es menor de 0.0001 (cuadro 23a). La ecuación generada es: $Y=79.79+11.04(x)$.

Luego se realizó el análisis de regresión lineal simple entre altura y la biomasa total.

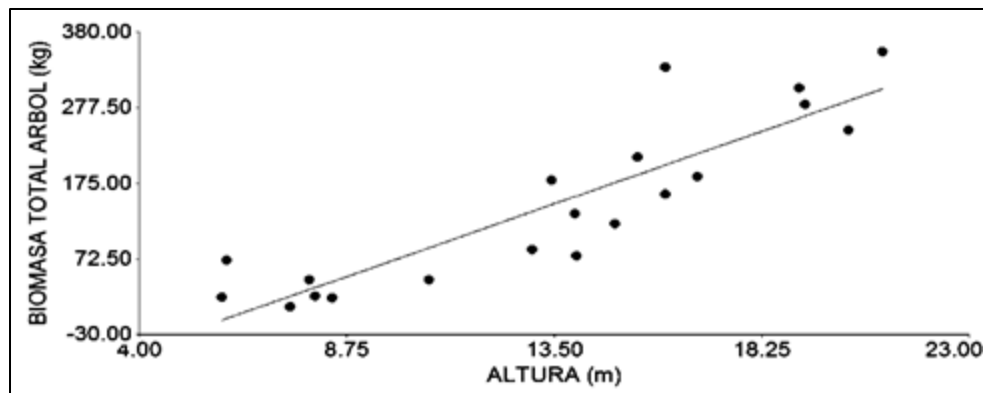


Figura 10. Diagrama de regresión lineal simple entre la variable independiente o regresora altura y la variable dependiente biomasa total

En la figura 10 se observa la distribución de los datos del análisis de regresión simple entre la Altura y la Biomasa, obteniendo un coeficiente de determinación (R^2) de 0.79 y un nivel de significancia menor a 0.0001, lo cual indica que existe un buen ajuste en el modelo lineal generado (cuadro 24a).

La ecuación generada es $Y = -132.43 + 20.71(x)$

Posteriormente se procedió a realizar el análisis de regresión lineal simple entre el diámetro de copa y la biomasa total

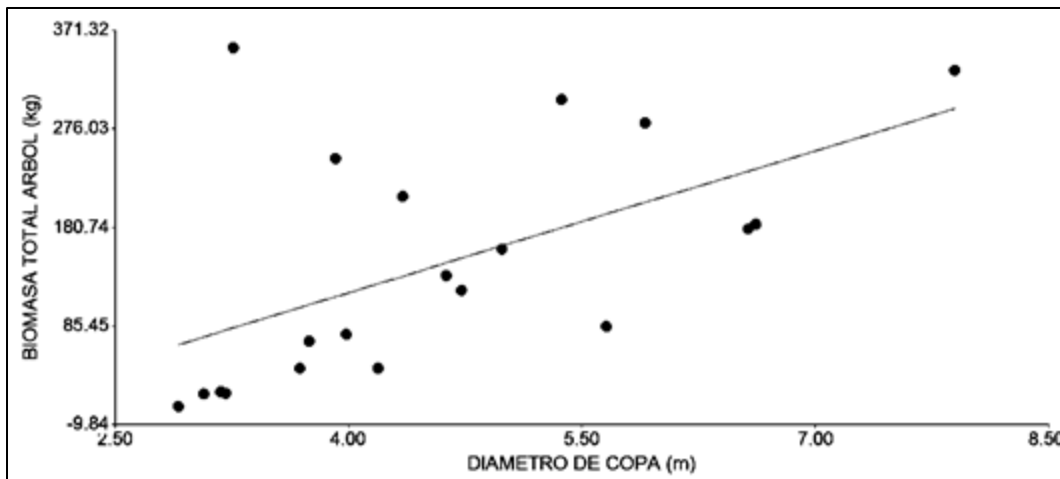


Figura 11. Diagrama de regresión lineal simple entre la variable independiente o regresora Diámetro de copa y la variable dependiente Biomasa

Se realizó el análisis de regresión lineal entre las variables diámetro de copa y biomasa total, se obtuvo un $P = 0.009$ y un coeficiente de determinación (R^2) de 0.32 (cuadro 25a.) indicando que aunque en la gráfica de dispersión se evidencia que la tendencia es lineal, el análisis dice lo contrario; es decir, no existe una representatividad aceptable en el modelo lineal generado $Y = -32.08 + 40.19(x)$.

Una vez realizado el análisis de regresión lineal simple entre la biomasa total y las variables independientes DAP, altura y diámetro de copa; se procedió a realizar el análisis de regresión lineal cuadrática:

6.4.3. Análisis de Regresión Lineal Cuadrática

Se realizó el análisis de regresión lineal cuadrática entre las variables independientes DAP, Altura y Diámetro de copa con la variable dependiente Biomasa total. Para comprobar estadísticamente que variables independientes se ajustaban con la variable independiente a través de una regresión lineal con polinomios de segundo grado, se realizaron pruebas de hipótesis a través de la

tabla de “t” de estudent, en donde la regla de decisión utilizada fue de que si $\beta=0$ no existe regresión lineal con polinomios de segundo grado, lo cual se estableció como la hipótesis nula, y que si $\beta \neq 0$ si existe regresión lineal con polinomios de segundo grado, lo cual se definió como la hipótesis alternativa, en donde β representa la pendiente de la recta en el modelo, utilizando un nivel de confianza de 0.95 y un nivel de significancia de 0.05. Los resultados se muestran en las figuras 12, 13 y 14.

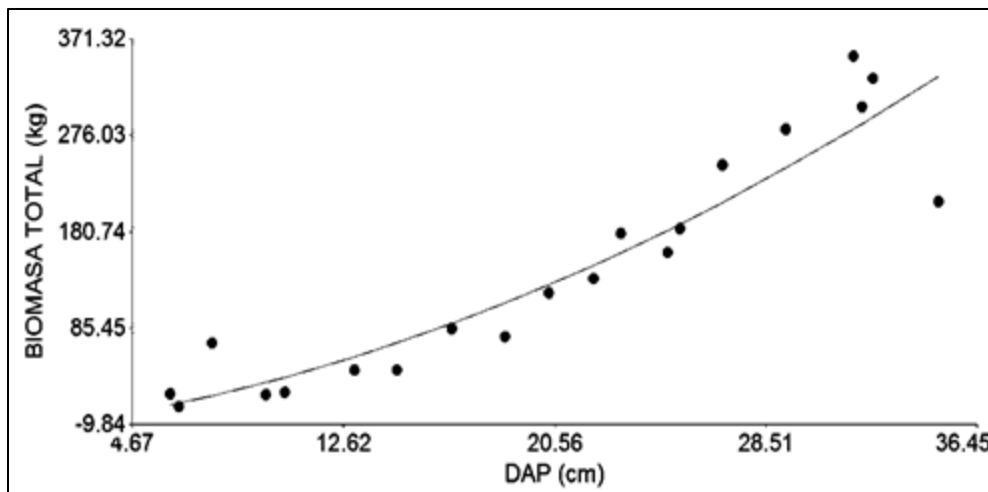


Figura 12. Diagrama de regresión lineal cuadrática entre el DAP y la biomasa total. Se realizó el análisis de regresión lineal cuadrática con el DAP como variable regresora versus la biomasa total, en la que se obtuvo un coeficiente de determinación (R^2) de 0.87 y un valor de significancia superior a 0.05, $P=0.1549$ (cuadro 26a.); esto indica que aunque el valor de R^2 sea alto, tomando en cuenta que el valor de P es superior a lo establecido, se determina que no existe una relación lineal cuadrática del modelo generado. La ecuación de regresión que se generó utilizando este procedimiento fue $Y= -16.50+0.20(X^2)$. Se continuó con el análisis de regresión lineal cuadrática entre la biomasa total y la altura de los árboles.

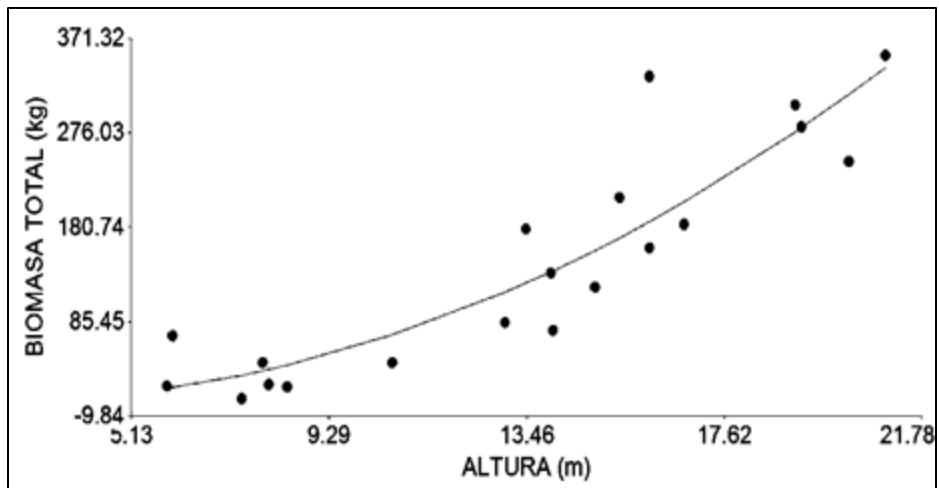


Figura 13. Diagrama de regresión lineal cuadrática entre la altura y biomasa total

En la figura 13 se observa la tendencia de los datos resultado del análisis de regresión lineal cuadrático entre la altura y la biomasa, en donde se obtuvo un coeficiente de determinación de 0.82 y un valor de $P= 0.1021$ (cuadro 27a.), indicando que desde el punto de vista estadístico no existe una relación lineal con polinomios de segundo grado. El modelo generado es $Y= -13.94+0.98(X^2)$.

Posteriormente se realizó el análisis de regresión lineal cuadrático entre la biomasa total y el diámetro de copa.

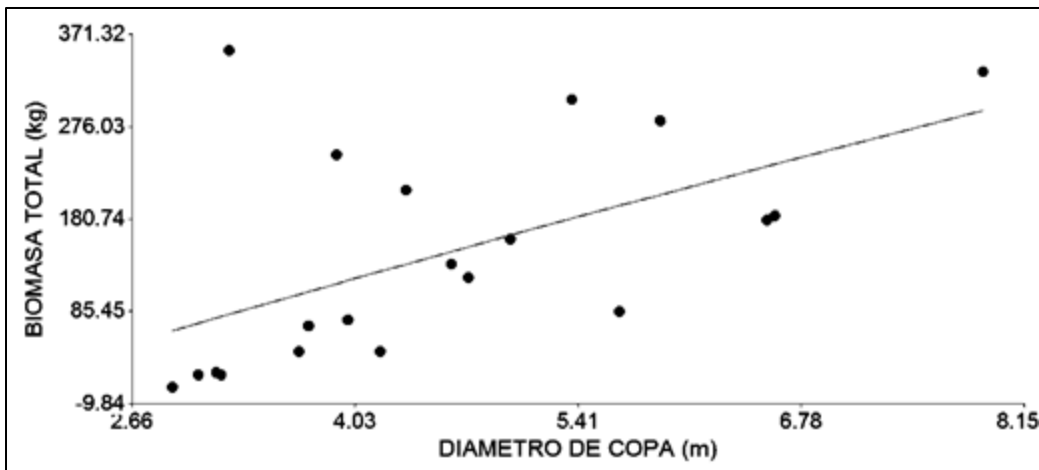


Figura 14. Diagrama de regresión lineal cuadrático entre el diámetro de copa y la biomasa total.

Según anexo 28a. Se observó que el Coeficiente de determinación es muy bajo ($R^2=0.32$) y el valor de $P=0.8530$ es superior a 0.05, lo que expresa que no existe

regresión lineal polinomial y el modelo generado no tiene una buena representatividad de los datos. La ecuación polinomial que se generó es $Y = -4.26 + 1.41(X^2)$.

6.4.4. Análisis de ajuste de modelos

Se analizaron los modelos generados para conocer el grado de ajuste entre las variables regresoras o independientes (DAP, altura y diámetro de copa) con la dependiente biomasa total. (cuadros 15 y 16).

Cuadro 15. Ajuste de modelos de regresión lineal evaluados.

VARIABLE REGRESORA	VARIABLE DEPENDIENTE	MODELO LINEAL SIMPLE	ESTIMADORES		
			R ²	VALOR DE P	CME
Diametro a la altura del pecho (DAP)	Biomasa total	$Y = -79.79 + 11.04(X)$	0.85	<0.0001	1978.39
Altura	Biomasa total	$Y = -13.94 + 0.98(X)$	0.79	<0.0001	2828.36
Diámetro de copa	Biomasa total	$Y = -32.08 + 40.89(X)$	0.31	<0.0102	9175.6

Cuadro 16. Ajuste de modelos de regresión lineal cuadráticos evaluados.

VARIABLE REGRESORA	VARIABLE DEPENDIENTE	MODELO LINEAL CON POLINOMIOS GRADO 2 o cuadrático	ESTIMADORES		
			R ²	VALOR DE P	CME
Diámetro a la altura del pecho (DAP)	Biomasa total	$Y = -16.50 + 0.20(X^2)$	0.87	0.1549	1853.14
Altura	Biomasa total	$Y = -13.94 + 0.98(X^2)$	0.82	0.1021	2547.2
Diámetro de copa	Biomasa total	$Y = -4.26 + 1.41(X^2)$	0.32	0.853	9644.23

En los cuadros 15 y 16 se observa que el modelo de regresión lineal simple es el que mejor se ajusta. El DAP y la Altura fueron las variables que mejor se ajustaron con un $R^2 = 0.85$, valor de P menor a 0.05 y $R^2 = 0.79$, valor de P menor a 0.05, respectivamente y con los valores de Cuadrado Medios del Error más bajos, mientras que el Diámetro de copa mostró un menor ajuste con un $R^2 = 0.31$, un valor de P mayor a 0.05 y un alto valor de Cuadrado Medio del Error 9,175.60.

6.4.5. Análisis de Regresión Lineal Múltiple

Se realizó el análisis de regresión lineal múltiple entre las variables independientes (DAP, altura, diámetro de copa) con las dependientes (biomasa total y biomasa del fuste) y poder generar el modelo matemático con un coeficiente de determinación (R^2) más cercano a 1, para lo cual se utilizó el Programa estadístico INFOSTAT, empleando el método de selección hacia atrás o descendente (Backward Eliminación), obteniendo lo siguiente:

Se generó el primer modelo matemático para estimación de biomasa por encima del suelo tomando en cuenta los 20 árboles, relacionando las variables regresoras (DAP, Altura y Diámetro de copa) con la Biomasa total, utilizando el método de análisis de INFOSTAT por Eliminación Backward, resultando un coeficiente de determinación (R^2) ajustado de 0.97 (cuadro 29a); sin embargo al analizar el gráfico de Predichos vs los residuos estudentizados de esta regresión, el modelo matemático generado no tomaba en cuenta los arboles 8 y 16 (figura 16), dejándolos fuera de los límites de confianza, por lo que se tomó la decisión de excluirlo de la muestra para mejorar el modelo.

Seguidamente se generó el segundo modelo matemático sin incluir los arboles 8 y 16, realizando el análisis de regresión lineal polinómica por el método Eliminación Backward del programa INFOSTAT, para lo cual se utilizó como variables independientes o regresoras el DAP, Altura y Diámetro de copa; dando como resultado un R^2 ajustado de 0.98 (cuadro 30a); sin embargo al analizar el gráfico de predichos versus residuos estudentizados de esta regresión, el modelo matemático resultante no tomaba en cuenta el árbol 3 (figura 17), dejándolo fuera de los límites de confianza del modelo.

Tomando en cuenta que no fue posible generar un modelo matemático para (*Vochysia guatemalensis* Donnell-Smithii) utilizando la variables dependiente biomasa total, se tomó la decisión de realizar el análisis de regresión lineal relacionando la biomasa del fuste con las independientes (DAP, altura y diámetro

de copa), indicando que por ser el fuste quien más biomasa contiene (69%) en relación a la biomasa total; la ecuación generada se ajustó más a los datos de los árboles evaluados.

Posteriormente se generó el tercer modelo matemático para estimación de biomasa por encima del suelo tomando en cuenta los 20 árboles, relacionando las variables regresoras (DAP, Altura y Diámetro de copa) con la Biomasa de Fuste, utilizando el método de análisis de INFOSTAT por Eliminación Backward, obteniendo un coeficiente de determinación (R^2) ajustado de 0.93 (cuadro 31a); sin embargo al analizar el gráfico de Predichos vrs los residuos estudentizados de esta regresión, el modelo matemático generado no tomaba en cuenta el árbol 7 (figura 18), dejándolo fuera de los límites de confianza, por lo que se tomó la decisión de excluirlo de la muestra para mejorar el modelo.

Utilizando el INFOSTAT se generó el cuarto modelo matemático para estimación de biomasa por encima del suelo tomando en cuenta los 19 árboles, relacionando las variables regresoras (DAP, Altura y Diámetro de copa) con la Biomasa de Fuste, utilizando el método de análisis de INFOSTAT por Eliminación Backward, resultando un coeficiente de determinación (R^2) ajustado de 0.96 (cuadro 32a); sin embargo al analizar el gráfico de Predichos versus los residuos estudentizados de esta regresión, el modelo matemático generado no tomaba en cuenta el árbol 3 (figura 19), dejándolo fuera de los límites de confianza, por lo que se tomó la decisión de excluirlo de la muestra para mejorar el modelo.

Finalmente se generó el modelo matemático mas ajustado para calcular la biomasa por encima del suelo de la especie San Juan tomando en cuenta 18 árboles, para lo cual se realizó el análisis de regresión lineal múltiple a través del programa INFOSTAT por Eliminación Backward, utilizando las variables regresoras DAP, altura y Diámetro de copa, obteniéndose el modelo matemático con los datos siguientes: Coeficiente de determinación $R^2=0.97$, lo cual significa que el 97 % de los datos se encuentran representados en el modelo; la constante o intercepto es

de 121.4544, la pendiente de la variable regresora altura total (Ht) es -26.3643 con valor de “P” de 0.0001, la pendiente de la variable regresora altura total² (Ht) es 1.3175 con valor de “P” < 0.0001, la pendiente de la variable DAP² (cm) es 0.1221 con “P” < 0.0001, siendo las tres menores a 0.05. Los resultados se observan en el cuadro 17, 33a. y figura 20.

Cuadro 17. Modelo matemático generado para estimación de biomasa del fuste del árbol de San Juan (*Vochysia guatemalensis* Donnell-Smithi) en plantaciones forestales mixtas.

Variable dependiente	Constante o intercepto	Pendiente por variable	Valor de P	Método de selección en InfoStat
Biomasa del Fuste	121.4544	Altura=-26.3643	0.0001	Eliminación Backward
		Altura ² =1.3175	< 0.0001	
		DAP ² =0.1221	< 0.0001	

Modelo matemático: $Bf=121.4544-26.3643(Ht)+1.3175(Ht)^2+0.1221(DAP)^2$

Nota: DAP: Diámetro a la altura del pecho (cm), Ht: Altura total del árbol (m) y Bf: Biomasa del fuste (kg)

Seguidamente se presenta un ejemplo para el cálculo de biomasa total utilizando el modelo matemático generado para el San Juan, la ecuación es $Bf=121.4544-26.3643(Ht)+1.3175(Ht)^2+0.1221(DAP)^2$. En donde las dimensiones del árbol son:

DAP=25.3 centímetros

Altura= 16.78 metros.

FEB =1.44

En donde:

Bf= Biomasa del fuste (kg)

FEB= Factor específico de biomasa (1.44)

Ht= Altura total (m)

DAP= Diámetro a la altura del pecho del árbol (cm)

$$Bf=121.4544-26.3643(Ht)+1.3175(Ht)^2+0.1221(DAP)^2$$

$$Bf=121.4544-26.3643(16.78) +1.3175(25.3)^2 + 0.1221 (28.3)^2$$

$$Bf=128.183 \text{ kg} \times 1.44$$

Biomasa total por árbol=184.58 kg biomasa/árbol de San Juan.

7. CONCLUSIONES

Se estimó la biomasa total por árbol de San Juan (*Vochysia guatemalensis* Donnell-Smithii), establecido en plantaciones forestales, encontrando que el árbol con menor concentración fue 7.48 kilogramos (kg) y 353.99 kg de biomasa para el árbol con mayores dimensiones; así mismo se estimó que el fuste es quien más biomasa en promedio concentró con un 69 % y seguido por las ramas con 19%, las ramillas y hojas con un 6 % cada una. Esto indica que la copa del árbol concentra un buen porcentaje de biomasa en relación al total, siendo ésta un indicador potencial de biomasa seca y por consiguiente carbono fijado.

Se determinó el factor de conversión de carbono para (*V. guatemalensis* Donnell-Smithii) el cual es 0.4773, indicando que el 47.73% de biomasa seca de los árboles evaluados corresponde a carbono; sin embargo para fines de este estudio se utilizaron los factores de conversión por componente vegetal (0.4668 del fuste, 0.4749 de las ramas, 0.4940 de ramillas y 0.4417 de las hojas), puesto que estadísticamente hay diferencias significativas por parte vegetativa de los árboles.

Se estimó el carbono total por encima del suelo fijado por los árboles de San Juan evaluados, indicando que 165.80 kg de carbono fijó uno de los árboles con mayores dimensiones y 9.38 kg el de menores dimensiones morfométricas, así mismo se determinó que el fuste es quien más carbono en promedio concentró con un 69 % y seguido por las ramas con 19%, las ramillas y hojas con un 6 % cada una. Esto indica que el fuste del árbol concentra un alto porcentaje de carbono en relación al total del árbol.

El modelo matemático generado para la estimación de biomasa del fuste específicamente para el San Juan es $B_f = 121.4544 - 26.3643(Ht) + 1.3175(Ht)^2 + 0.1221(DAP)$, el cual posee un Coeficiente de Determinación (R^2) de 0.97 y un valor de "P" menor a 0.05 para la constante y las variables (Altura, $Altura^2$ y DAP^2). El valor del Factor de Expansión de Biomasa estimado fue 1.44.

8. RECOMENDACIONES

El presente modelo matemático generado para la estimación de biomasa de los árboles de San Juan establecidos en plantaciones forestales mixtas deberá ser utilizado en árboles cuyo DAP oscile entre 6.12 cm y 35.01 cm, ya que dicho modelo fue determinado en función a este rango de diámetros.

Para la transformación de biomasa a carbono deberá utilizarse los Factores de Conversión determinados por componente vegetativo (0.4668 del fuste, 0.4749 de las ramas, 0.4940 ramillas y 0.4417 de hojas), puesto que estadísticamente presentan diferencias significativas.

El modelo matemático generado estima la biomasa del fuste, la cual deberá ser multiplicada por el Factor de Expansión de Biomasa (FEB) 1.44 para obtener el dato de Biomasa total de los árboles de San Juan, ya que el FEB agrega la biomasa contenida en la copa del árbol.

Las variables independientes que tomó en cuenta el programa estadístico InfoStat para la generación del modelo matemático para estimación de biomasa del fuste fueron el DAP y la altura, indicando que es necesario realizar correctamente las mediciones morfométricas en campo para estimar la biomasa y cuantificar el carbono fijado en las plantaciones forestales y poder aplicar a futuros mercados de carbono.

9. REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

- Alpizar, W. (1997). Proceso metodológico para la cuantificación de carbono de la biomasa en pie en bosque natural y sus estimaciones de no emisión y fijación. Oficina costarricense de implementación conjunta, Costa Rica. 60 p.
- Aguilar, R. (2004). Estimación del carbono fijado en plantaciones de Pinus carabaea var. Hondurensis en función de su edad, en Livingston, Izabal. Tesis Ing. Forestal. Guatemala, Universidad del Valle de Guatemala. 100 p.
- Ávila, G.; Jiménez, F., Beer, J., Gómez, M. & Ibrahim, M. (2001). Almacenamiento, Fijación de Carbono y Valoración de Servicios Ambientales en Sistemas Agroforestales en Costa Rica. Agroforestería en las Américas Vol. 8 N° 30 2001. Avances en Investigación. 4 p.
- Brown, S. (1997). Estimating Biomass and Biomass change of tropical forest. FAO, Estados Unidos. 55 p.
- Castellanos, E., Quilo, A., & Mato, R. (2010). Metodología para la Estimación del Contenido de Carbono en Bosques y Sistemas Agroforestales de Guatemala. Guatemala, Guatemala. 24 p.
- CATIE PROSEFOR. (1999). (Calophyllum brasiliense Camb.) Nota técnica sobre manejo de semillas forestales. FAO, Costa Rica. 58 p.
- Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza. (2003). Arboles de Centro América. CATIE, Turrialba, Costa Rica. 955 p.
- Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza. (2009). Variación Genética de Procedencia y Familias de Vochysia guatemalensis. CATIE, Heredia, Costa Rica. 170 p.
- CONSEFORMA. (2001). Cebo en la zona norte de Costa Rica. Primera edición. San José, Costa Rica. 40 p.

- Cubero, J.A. & Rojas, S.R. (1997). Fijación de carbono en plantaciones de melina *Gmelina arborea* Roxb., teca (*Tectona grandis* L.f.) y pochote (*Bombacopsis quinata* Jacq.) en los cantones de Hojarasca y Nicoya, Guanacaste, Costa Rica. Tesis. Lic. CC Forestales. Costa Rica, Universidad Nacional, Facultad de Ciencias de la Tierra y el Mar. 94 p.
- De Camino, M. & Morales, J. (2013). Las Plantaciones de Teca en América Latina: Mitos y Realidades. Turrialba, Costa Rica CATIE - FAO. 392 p.
- FAO (Evaluación de Recursos Forestales Mundiales). (2004). Términos y Definiciones. Actualización de la Evaluación en FAO. Roma. 36 p.
- FAO (Food and Agriculture Organization). (2013). Antología de Conocimiento para la Evaluación de los Recursos Forestales Nacionales. Recreaciones para Estimación y la Supervisión. 28 p.
- FAO (Evaluación de Recursos Forestales Mundiales). (2015). Evaluación de los Recursos Forestales Mundiales 2015. Compendio de datos FAO. Roma, 253 p.
- Federici, S., Tubiello, F., Salvatore, M., Jacobs, H., & Schmidhuber, J. (2015). New Estimates of CO2 Forest Emissions and Removals: In Forest Ecology and Management Editado por Kenneth Mac Dicken 1990–2015. Roma . 89-98 p.
- Fundación Solar, GT. 2000. Elementos técnicos para inventarios de carbono en el uso del suelo. (Documento PDF). Editado por Lilian Márquez. Guatemala, Guatemala. Consultado el día 15 de Junio 2017. 36 p. Disponible en <http://capas.org>
- FSC, (1996). Principios y Criterios para el Manejo de Bosques Naturales. Forest Stewardship Council, Estados Unidos. 250 p.

Imaña-Encinas, J., Jiménez, J., Rezende, A., Rainier, C., Antunes, O., & Serpa de Meria, M., (2014). Conceptos Dasométricos en los inventarios fitosociológicos. Brasilia, Brasil/Linares México. Universidade de Brasilia/Universidad Autónoma de Nuevo León, 82 p

Instituto Nacional de Bosques (2011). Base de datos sobre proyectos PINFOR, región forestal II-6, Ixcán, Quiché. Guatemala. Consultado 25 Sep. 2012.

Instituto Nacional de Bosques (INAB). (2014). Lineamientos Técnicos de Manejo Forestal. Guatemala. 62 p.

Instituto Nacional de Bosques (INAB). (2015). Lineamientos Técnicos de Manejo Forestal. (en línea). Guatemala. 47 p.

Lee, G. (2002). Estudio preliminar para la Estimación de Biomasa y cuantificación de carbono para *Vochysia guatemalensis*, *Calophyllum brasiliense*, *Cybistax donnell-Smithii* en bosques naturales de Guatemala. Tesis de ingeniero Agrónomo, Guatemala, Universidad de San Carlos de Guatemala. 75 p.

López, E. (2009). Estadística texto universitario (documento electrónico). Última edición. Guatemala, Guatemala. Universidad San Carlos de Guatemala. 229 p.

Lopez, E., & González B., (2016). Estadística. Fundamentos y Aplicaciones en Agronomía y Ciencias afines. Facultad de Agronomía. Universidad de San Carlos de Guatemala. Guatemala. 274 p.

López,H. (2017). Estimación de Carbono aéreo en Plantaciones de Teca *Tectona grandis* L.F. de Catorce y Quince Años de Edad, Alta Verapaz. Guatemala. Tesis de Grado. 93 p.

Nájera, A., Pereira, L., & Chapas, J., (2010). Lineamientos Técnicos de Manejo Forestal Sostenible para el Manejo de los Bosques Pino Encino de Mesoamérica. Guatemala. 44 p. Disponible en <http://www.infobosques.com/descargas/biblioteca/407.pdf>

Montepeque, M. (2007). Estimación de Biomasa y Contenido de Carbono en Plantaciones De *Eucalyptus camaldulensis* Dehnh. Y Actividades de conservación de los Recursos Naturales, en la Empresa Pantaleón S.A. Siquinalá, Escuintla. Tesis de Ingeniero Agrónomo, Guatemala, Universidad de San Carlos de Guatemala. 139 p.

Pacay, F. (2011). Generación de un modelo matemático para la estimación de biomasa y cuantificación de Carbono en la especie Nogal *Juglans olanchana* Standl y L.O. Williams, en bosques naturales del corredor biológico, del bosque nuboso, en Purulhá Baja Verapaz. Tesis de Ingeniero Forestal, Universidad Rafael Landívar. 88 p.

Panel Intergubernamental de Expertos sobre Cambio Climático (IPCC). (2007). Summary for policymakers. En S. Solomon, D. Qin, M. Manning, Z. Chen, M. Marquis, K.B. Averyt, M. Tignor y H.L. Miller, Eds. Climate change 2007: Climate change impacts, adaptation and vulnerability. Working group II contribution to the fourth assessment report of the intergovernmental panel on climate change. Cambridge y Nueva York: Cambridge University Press.

Panel Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC). (2011). El Cambio Climático. (en línea). Wembley. Consultado el 24 de Junio de 2017, Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático disponible en: <https://www.ipcc.ch/pdf/climate-changes-2001/synthesis-spm/synthesis-spmes.pdf>

- Quilo, A. (2006). Estimacion del carbono almacenado por el sistema agroforestal de salvia (*buddleia megalocephala*), y papa (*Solanum toberosum*), ubicado en el municipio de san Jose Ojetenam, San marcos. Tesis de ingeniero forestal, Guatemala, Universidad del valle de Guatemala. 60 p.
- Di Rienzo J.A, Casanoves. F, Balsarini M.G, Gonzales. L, Tablada. M, & Robledo. C.W. (2010). InfoStat versión 2010. Grupo InfoStat, FCA, Universidad de Córdoba, Argentina.
- Sagui, N. (2011). Generación de un modelo matemático para la estimación de biomasa y carbono para *Pinus tecunumanii* eguiluz & j.p perry, en bosques naturales de la Reserva de Biósfera Sierra de las Minas rbsm, San Jerónimo, Baja Verapaz. Tesis de Ingeniero Forestal, Universidad Rafael Landivar. 88 p.
- Silvestre, P. (2010). Características de sitio que determinan el crecimiento y productividad de la especie San Juan (*Vochysia guatemalensis* donnell-smithii), en Plantaciones Forestales mixtas de tres a nueve años de edad, en la Franja Transversal del Norte de la Región II del INAB, las Verapaces e Ixcán, Guatemala. Tesis de Ingeniero Forestal, Universidad Rafael Landivar. 136 p.
- Solís, C. & Moya, R. (s.f.). *Vochysia guatemalensis* en Costa Rica. San José, Costa Rica. 100 p.
- Teobalddelli, M., & Somogyi, Z. (2009). Generalized Functions of Biomass Expansion Factors for Conifers and Broad Leaved by Stand age, Growing Stock and Site Index.
- Walker, W. (2011). Guia de Campo para la Estimación de Biomasa y Carbono Forestal. Massachusetts, USA. 49 p.

10. ANEXOS

ANEXO 1. BOLETA DE CAMPO PARA EL REGISTRO DE INFORMACIÓN

1. Datos generales

Nombre del investigador: _____

Nombre del propietario de la

Plantación: _____

Fecha:

_____ Hora: _____ Lugar: _____

Ubicación Geografía (coordenadas UTM): _____ Altitud (msnm) _____

2. Datos dasométricos del árbol

Especie: _____ Arbol No: _____ Altura directa total (m): _____

Diámetro de la Copa (m): _____ Longitud del fuste (m): _____ Altura del tocón (m): _____

3. Datos de las hojas

Peso fresco de las muestras (kg): _____

Código de la muestra: _____

4. Datos de las muestras de ramas, ramillas, hojas y fuste

SUBMUESTRA	PESO FRESCO DE LAS MUESTRAS (kg)			
	RAMAS	RAMILLAS	HOJAS	FUSTE
1				
2				
3				
PROMEDIO (kg)				

OBSERVACIONES: _____

ANEXO 2. BOLETA DE LABORATORIO PARA EVALUACION DE BIOMASA

1. Datos generales

Nombre del investigador: _____

Nombre del propietario de la

Plantación: _____

Fecha:

_____ Hora: _____ Lugar: _____

Ubicación Geografía (coordenadas UTM): _____ Altitud (msnm) _____

2. Análisis del fuste

2.1. Análisis del volumen de la muestra del fuste

Código de muestra	Volumen 1 (cm ³)	Volumen 2 (cm ³)	Volumen final (cm ³)

2.2. Secado de las muestras del fuste

Código de muestra	Temperatura de horno	Peso inicial (g)	Peso 1 (g)	Peso 2 (g)	Peso 3 (g)	Peso 4 (g)	Peso 5 (g)	Peso seco final (g)
Promedio								

3. Secado de las muestras de hojas

Código de muestra	Temperatura de horno	Peso inicial (g)	Peso 1 (g)	Peso 2 (g)	Peso 3 (g)	Peso 4 (g)	Peso 5 (g)	Peso seco final (g)
Promedio								

4. Secado de las muestras de ramas

Código de muestra	Temperatura de horno	Peso inicial (g)	Peso 1 (g)	Peso 2 (g)	Peso 3 (g)	Peso 4 (g)	Peso 5 (g)	Peso seco final (g)
Promedio								

5. Secado de las muestras de ramillas

Código de muestra	Temperatura de horno	Peso inicial (g)	Peso 1 (g)	Peso 2 (g)	Peso 3 (g)	Peso 4 (g)	Peso 5 (g)	Peso seco final (g)
Promedio								

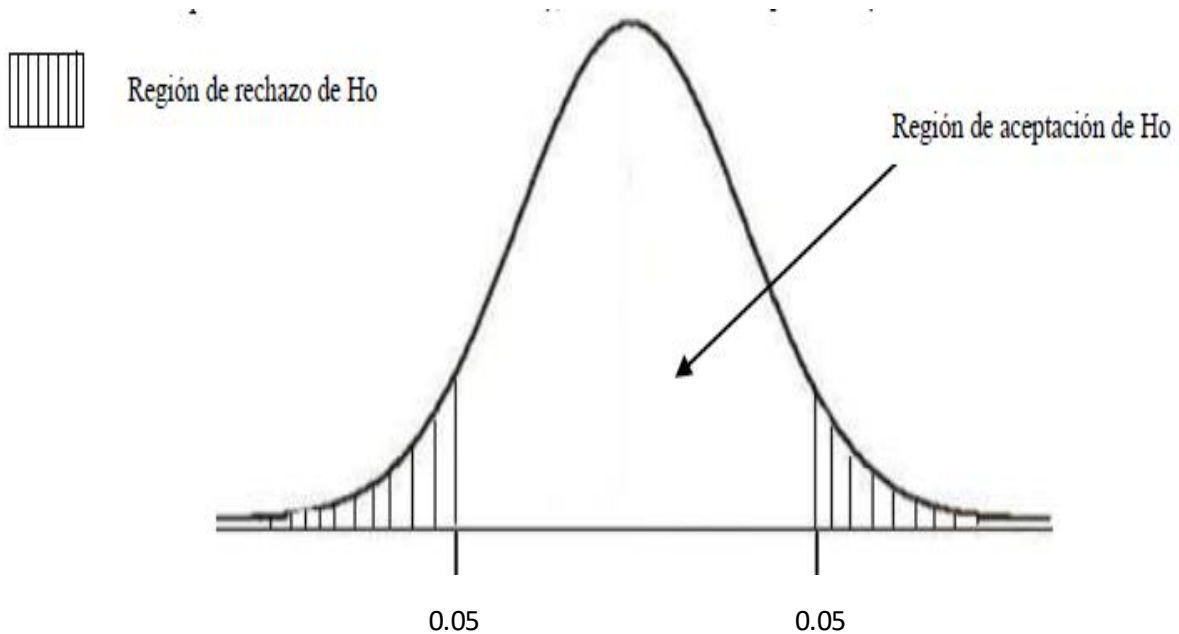
OBSERVACIONES: _____

ANEXO 3. RESULTADO DEL ANALISIS DE PRUEBA DE MEDIAS DEPENDIENTES PAREADAS

Cuadro 18a . Análisis de la prueba de medias dependientes pareadas a la biomasa estimada utilizando las tres formas: biomasa estimada en campo, con modelo general y modelo específico.

Prueba T (muestras apareadas)									
Obs(1)	Obs(2)	N	media(dif)	Media(1)	Media(2)	DE(dif)	T	Bilateral	
BIOMASA CON MODELO ESPECIF..	BIOMASA REAL (kg)	20	-8.62	136.10	144.72	37.83	-1.02	0.3210	
BIOMASA CON MODELO ESPECIF..	BIOMASA CON MODELO EN BOSQ..	20	-7.02	136.10	143.11	55.81	-0.56	0.5805	
BIOMASA REAL (kg)	BIOMASA CON MODELO EN BOSQ..	20	1.60	144.72	143.11	46.71	0.15	0.8797	

Figura 15 Región de aceptación y rechazo de la hipótesis nula.



Cuadro 19a. Análisis de varianza realizado a pruebas de carbono por componente vegetal de los árboles evaluados.

Análisis de la varianza					
Variable	N	R ^s	R ^s Aj	CV	
Carbono	24	0.39	0.29	5.53	
Cuadro de Análisis de la Varianza (SC tipo III)					
F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
Modelo.	84.50	3	28.17	4.18	0.0189
Parte	84.50	3	28.17	4.18	0.0189
Error	134.87	20	6.74		
Total	219.37	23			
Test: Tukey Alfa=0.05 DMS=4.19645					
Error: 6.7437 gl: 20					
Parte	Medias	n	E.E.		
Hojas	44.17	6	1.06	A	
Fuste	46.68	6	1.06	A	B
Ramas	47.49	6	1.06	A	B
Ramillas	49.40	6	1.06		B
Medias con una letra común no son significativamente diferentes (p > 0.05)					

ANEXO 4. ANÁLISIS DE CORRELACIÓN PARA CADA VARIABLE DASOMETRICA

Cuadro 20a. Análisis de Correlación de Pearson entre el DAP y la Biomasa total.

Correlación de Pearson: Coeficientes\probabilidades		
	Dap (cm)	BIOMASA TOTAL (kg)
Dap (cm)	1.00	6.8E-09
BIOMASA TOTAL (kg)	0.92	1.00

Cuadro 21a. Análisis de Correlación de Pearson entre la altura y la biomasa total.

Coeficientes de correlación		
Correlación de Pearson: Coeficientes\probabilidades		
	ALTURA (m)	BIOMASA TOTAL (kg)
ALTURA (m)	1.00	1.7E-07
BIOMASA TOTAL (kg)	0.89	1.00

Cuadro 22a. Análisis de Correlación de Pearson entre el diámetro de copa y la biomasa total.

<i>Correlación de Pearson: Coeficientes\probabilidades</i>		
	DIAMETRO DE COPA (m)	BIOMASA TOTAL (kg)
DIAMETRO DE COPA (m)	1.00	0.01
BIOMASA TOTAL (kg)	0.56	1.00

ANEXO 5. ANALISIS DE REGRESION LINEAL SIMPLE

Cuadro 23a. Análisis de Regresión Lineal simple entre el DAP y la biomasa total.

Análisis de regresión lineal							
Variable	N	R ²	R ² Aj	ECMP	AIC	BIC	
BIOMASA TOTAL (kg)	20	0.85	0.84	2621.08	212.45	215.44	

Coefficientes de regresión y estadísticos asociados									
Coef	Est.	E.E.	LI(95%)	LS(95%)	T	p-valor	CpMallows	VIF	
const	-79.79	24.19	-130.62	-28.97	-3.30	0.0040			
Dap (cm)	11.04	1.08	8.76	13.32	10.18	<0.0001	99.24	1.00	

Cuadro de Análisis de la Varianza (SC tipo III)					
F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
Modelo.	205052.55	1	205052.55	103.65	<0.0001
Dap (cm)	205052.55	1	205052.55	103.65	<0.0001
Error	35610.94	18	1978.39		
Total	240663.49	19			

Cuadro 24a. Regresión Lineal Simple entre altura y biomasa total.

Análisis de regresión lineal							
Variable	N	R ²	R ² Aj	ECMP	AIC	BIC	
BIOMASA TOTAL (kg)	20	0.79	0.78	3439.49	219.60	222.59	
Coeficientes de regresión y estadísticos asociados							
Coef	Est.	E.E.	LI(95%)	LS(95%)	T	p-valor	CpMallows VIF
const	-132.43	35.86	-207.78	-57.08	-3.69	0.0017	
ALTURA (m)	20.71	2.53	15.40	26.02	8.19	<0.0001	64.61 1.00
Cuadro de Análisis de la Varianza (SC tipo III)							
F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor		
Modelo.	189753.06	1	189753.06	67.09	<0.0001		
ALTURA (m)	189753.06	1	189753.06	67.09	<0.0001		
Error	50910.44	18	2828.36				
Total	240663.49	19					

Cuadro 25a. Regresión Lineal Simple entre el diámetro de copa y la biomasa total.

Análisis de regresión lineal							
Variable	N	R ²	R ² Aj	ECMP	AIC	BIC	
BIOMASA TOTAL (kg)	20	0.32	0.28	10848.68	243.03	246.02	
Coeficientes de regresión y estadísticos asociados							
Coef	Est.	E.E.	LI(95%)	LS(95%)	T	p-valor	CpMallows VIF
const	-32.08	64.75	-168.11	103.95	-0.50	0.6263	
DIAMETRO DE COPA (m)	40.19	13.89	11.00	69.37	2.89	0.0097	8.98 1.00
Cuadro de Análisis de la Varianza (SC tipo III)							
F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor		
Modelo.	76370.32	1	76370.32	8.37	0.0097		
DIAMETRO DE COPA (m)	76370.32	1	76370.32	8.37	0.0097		
Error	164293.18	18	9127.40				
Total	240663.49	19					

ANEXO 6. ANALISIS DE REGRESION LINEAL CUADRATICO O CON POLINOMIOS DE GRADO 2

Cuadro 26a. Análisis de Regresión Lineal cuadrático o con polinomios de grado 2 entre el DAP y la biomasa total

Análisis de regresión lineal							
Variable	N	R ²	R ² Aj	ECMP	AIC	BIC	
BIOMASA TOTAL (kg)	20	0.87	0.85	3574.04	212.00	215.98	
Coeficientes de regresión y estadísticos asociados							
Coef	Est.	E.E.	LI(95%)	LS(95%)	T	p-valor	CpMallows VIF
const	-16.50	48.53	-118.90	85.90	-0.34	0.7380	
Dap (cm)	3.04	5.47	-8.50	14.59	0.56	0.5855	2.35 27.19
Dap (cm) ²	0.20	0.13	-0.08	0.48	1.49	0.1549	4.15 27.19
Cuadro de Análisis de la Varianza (SC tipo I)							
F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor		
Modelo.	209160.10	2	104580.05	56.43	<0.0001		
Dap (cm)	205052.55	1	205052.55	110.65	<0.0001		
Dap (cm) ²	4107.55	1	4107.55	2.22	0.1549		
Error	31503.39	17	1853.14				
Total	240663.49	19					

Cuadro 27a. Análisis de regresión lineal cuadráticos o con polinomios de grado 2 entre la altura y la biomasa total

Análisis de regresión lineal							
Variable	N	R ²	R ² Aj	ECMP	AIC	BIC	
BIOMASA TOTAL (kg)	20	0.82	0.80	3403.65	218.36	222.35	
Coeficientes de regresión y estadísticos asociados							
Coef	Est.	E.E.	LI(95%)	LS(95%)	T	p-valor	CpMallows VIF
const	13.94	91.27	-178.63	206.50	0.15	0.8805	
ALTURA (m)	-4.93	15.03	-36.63	26.78	-0.33	0.7471	2.16 39.22
ALTURA (m) ²	0.98	0.57	-0.22	2.17	1.73	0.1021	4.88 39.22
Cuadro de Análisis de la Varianza (SC tipo I)							
F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor		
Modelo.	197361.01	2	98680.50	38.74	<0.0001		
ALTURA (m)	189753.06	1	189753.06	74.49	<0.0001		
ALTURA (m) ²	7607.95	1	7607.95	2.99	0.1021		
Error	43302.48	17	2547.20				
Total	240663.49	19					

Cuadro 28a. Análisis de regresión lineal cuadrático o con polinomios de grado 2 entre el diámetro de la copa y la biomasa total

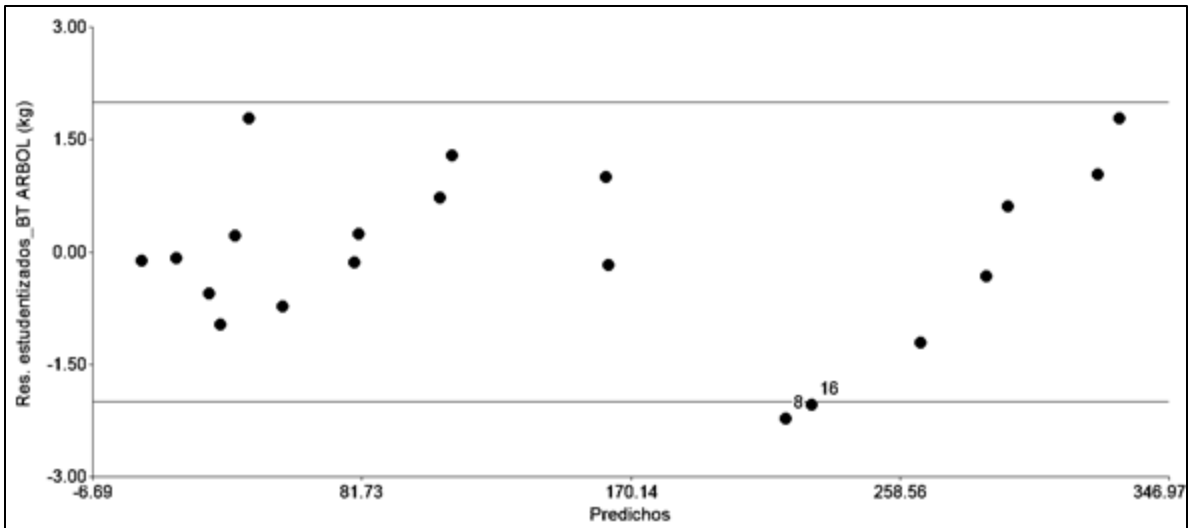
Análisis de regresión lineal									
Variable	N	R ²	R ² Aj	ECMP	AIC	BIC			
BIOMASA TOTAL (kg)	20	0.32	0.24	12258.20	244.99	248.97			
Coeficientes de regresión y estadísticos asociados									
Coef	Est.	E.E.	LI(95%)	LS(95%)	T	p-valor	CpMallows	VIF	
const	-4.26	162.16	-346.39	337.86	-0.03	0.9793			
DIAMETRO DE COPA (m)	26.90	72.04	-125.09	178.90	0.37	0.7135	2.19	25.45	
DIAMETRO DE COPA (m)^2	1.41	7.49	-14.40	17.22	0.19	0.8530	2.09	25.45	
Cuadro de Análisis de la Varianza (SC tipo I)									
F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor				
Modelo.	76711.61	2	38355.80	3.98	0.0383				
DIAMETRO DE COPA (m)	76370.32	1	76370.32	7.92	0.0119				
DIAMETRO DE COPA (m)^2	341.29	1	341.29	0.04	0.8530				
Error	163951.88	17	9644.23						
Total	240663.49	19							

ANEXO 7. ANÁLISIS DE REGRESIÓN LINEAL MÚLTIPLE

Cuadro 29a. Análisis de regresión lineal múltiple utilizando el método Eliminación Backward, relacionando las variables independientes con la biomasa de 20 árboles.

Análisis de regresión lineal									
Variable	N	R ²	R ² Aj	ECMP	AIC	BIC			
ET AREOL (kg)	20	0.98	0.97	1267.93	181.22	188.19			
Eliminación backward. Máximo p-valor para retener: 0.15									
Número original de regresoras: 6, regresoras retenidas en el modelo 5									
Coeficientes de regresión y estadísticos asociados									
Coef	Est.	E.E.	LI(95%)	LS(95%)	T	p-valor	CpMallows	VIF	
const	256.26	57.36	133.25	379.28	4.47	0.0005			
ALTURA (m)	-44.04	7.98	-61.16	-26.92	-5.52	0.0001	33.47	78.81	
ALTURA (m)^2	1.84	0.26	1.28	2.41	6.99	<0.0001	50.68	60.77	
D COPA (m)	-42.48	26.48	-99.28	14.31	-1.60	0.1309	7.47	70.57	
D COPA (m)^2	5.89	2.43	0.67	11.11	2.42	0.0297	10.53	63.85	
DAP (cm)	8.20	1.29	5.44	10.97	6.37	<0.0001	42.97	7.80	
Error cuadrático medio: 357.770181									

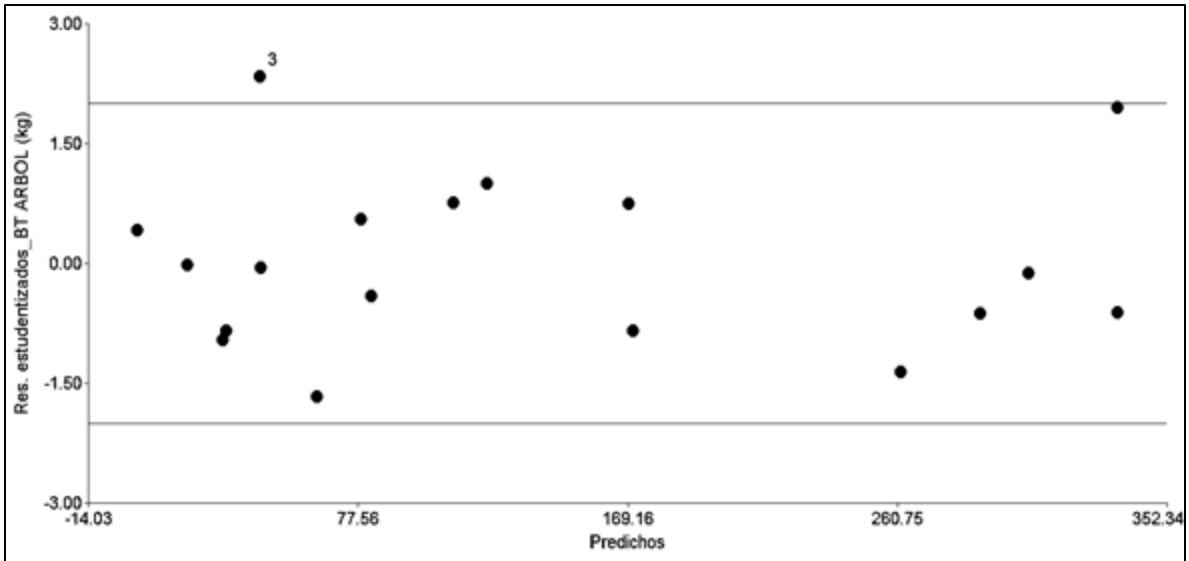
Figura 16. Diagrama de regresión lineal múltiple por Eliminación Backward entre el DAP, altura y diámetro copa versus biomasa total de 20 árboles.



Cuadro 30a. Análisis de regresión lineal múltiple utilizando el método Eliminación Backward, relacionando las variables independientes con la biomasa total de 18 árboles.

Análisis de regresión lineal									
Variable	N	R ²	R ² Aj	ECMP	AIC	BIC			
BT ARBOL (kg)	18	0.99	0.98	631.98	154.17	160.40			
Eliminación backward. Máximo p-valor para retener: 0.15									
Número original de regresoras: 6, regresoras retenidas en el modelo 5									
Coeficientes de regresión y estadísticos asociados									
Coef	Est.	E.E.	LI (95%)	LS (95%)	T	p-valor	CpMallows	VIF	
const	237.03	44.58	139.91	334.15	5.32	0.0002			
ALTURA (m)	-45.09	6.22	-58.64	-31.54	-7.25	<0.0001	53.60	77.70	
ALTURA (m) ²	1.75	0.21	1.29	2.22	8.29	<0.0001	68.50	64.25	
D COPA (m)	-36.56	20.49	-81.21	8.08	-1.78	0.0996	8.02	62.84	
D COPA (m) ²	5.04	1.95	0.79	9.30	2.58	0.0241	11.23	61.14	
DAP (cm)	10.58	1.99	6.25	14.91	5.33	0.0002	31.27	26.50	
Error cuadrático medio: 211.623664									

Figura 17. Diagrama regresión lineal múltiple por el método Eliminación Backward entre el DAP, altura y diámetro copa versus biomasa total de 18 árboles.



Cuadro 31a. Análisis de regresión lineal múltiple entre las variables independientes con la biomasa del fuste de 20 árboles por el método Eliminación.

Análisis de regresión lineal

Variable	N	R ²	R ² Aj	ECMP	AIC	BIC
BFUSTE (kg)	20	0.95	0.93	766.63	186.25	191.23

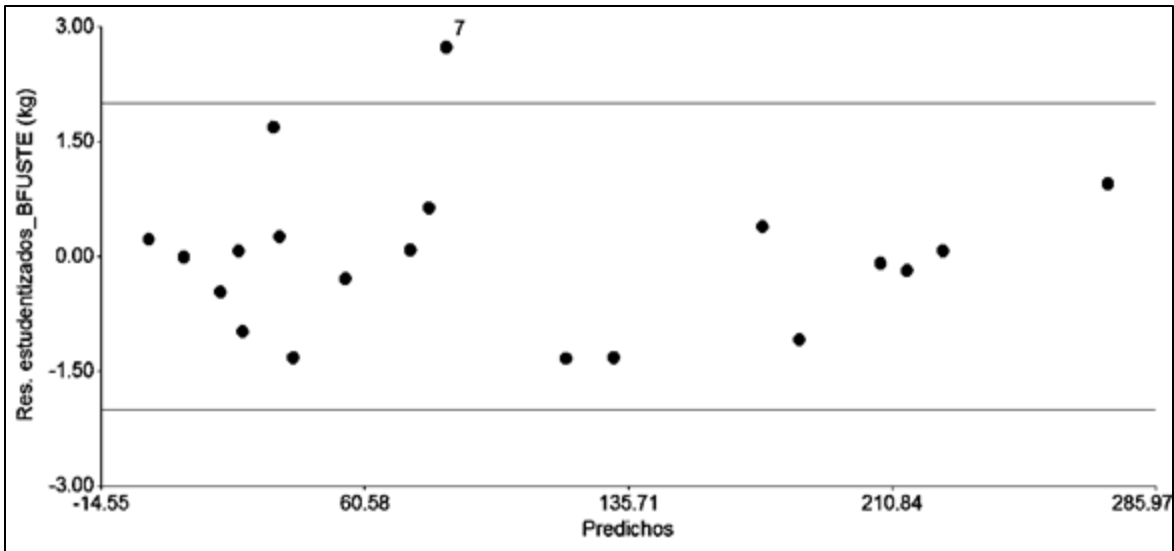
Eliminación backward. Máximo p-valor para retener: 0.15
 Número original de regresoras: 6, regresoras retenidas en el modelo 3

Coefficientes de regresión y estadísticos asociados

Coef	Est.	E.E.	LI(95%)	LS(95%)	T	p-valor	CpMallows	VIF
const	163.30	43.42	71.25	255.36	3.76	0.0017		
ALTURA (m)	-40.61	8.02	-57.61	-23.61	-5.06	0.0001	27.19	57.88
ALTURA (m)^2	1.66	0.26	1.11	2.21	6.37	<0.0001	41.19	43.08
DAP (cm)	7.23	1.41	4.25	10.20	5.14	0.0001	27.95	6.76

Error cuadrático medio: 491.638066

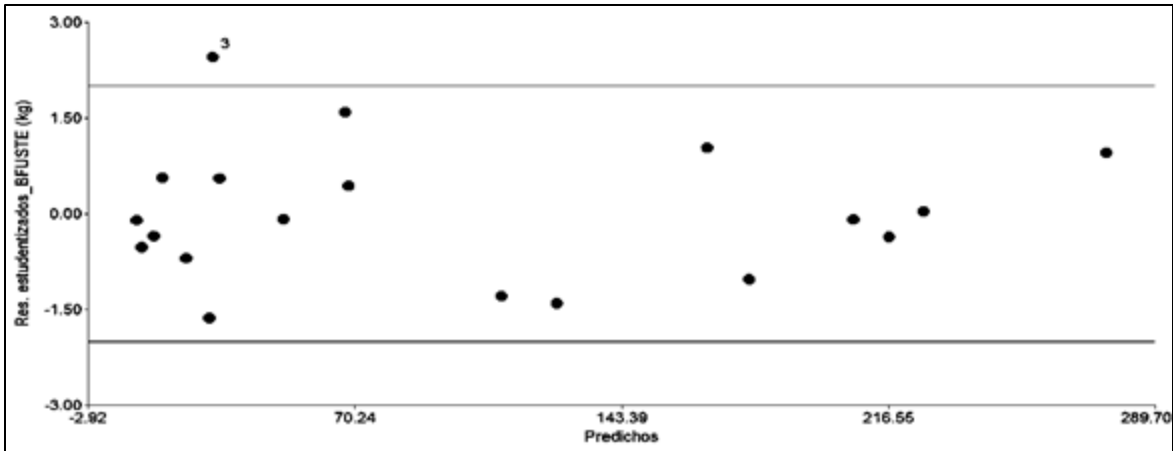
Figura 18. Diagrama regresión por el método de Eliminación Backward, entre el DAP, altura y diámetro de copa versus la biomasa del fuste, utilizando los datos de 20 árboles.



Cuadro 32a. Análisis de Regresión Lineal Múltiple entre las variables independientes con la biomasa del fuste utilizando el método de Eliminación Backward, incluyendo datos de 19 árboles

Análisis de regresión lineal									
Variable	N	R ²	R ² Aj	ECMP	AIC	BIC			
BFUSTE (kg)	19	0.97	0.96	500.21	166.41	171.13			
Eliminación backward. Máximo p-valor para retener: 0.15									
Número original de regresoras: 6, regresoras retenidas en el modelo 3									
Coeficientes de regresión y estadísticos asociados									
Coef	Est.	E.E.	LI(95%)	LS(95%)	T	p-valor	CpMallows	VIF	
const	163.22	32.16	94.66	231.78	5.07	0.0001			
ALTURA (m)	-32.16	5.34	-43.55	-20.77	-6.02	<0.0001	37.04	45.28	
ALTURA (m)^2	1.49	0.19	1.08	1.91	7.72	<0.0001	58.97	41.88	
DAP (cm)^2	0.13	0.02	0.09	0.17	6.47	<0.0001	42.26	3.89	
Error cuadrático medio: 278.817507									

Figura 19. Diagrama regresión lineal múltiple por el método de Eliminación Backward, entre las variables independientes con la dependiente biomasa del fuste, utilizando los datos de 19 árboles.



Cuadro 33a. Análisis de Regresión Múltiple entre las variables independientes versus la biomasa del fuste por el método Eliminación Backward incluyendo datos de 18 árboles.

Análisis de regresión lineal

Variable	N	R ²	R ² Aj	ECMP	AIC	BIC
BFUSTE (kg)	18	0.9822	0.9784	311.4986	149.8976	154.3495

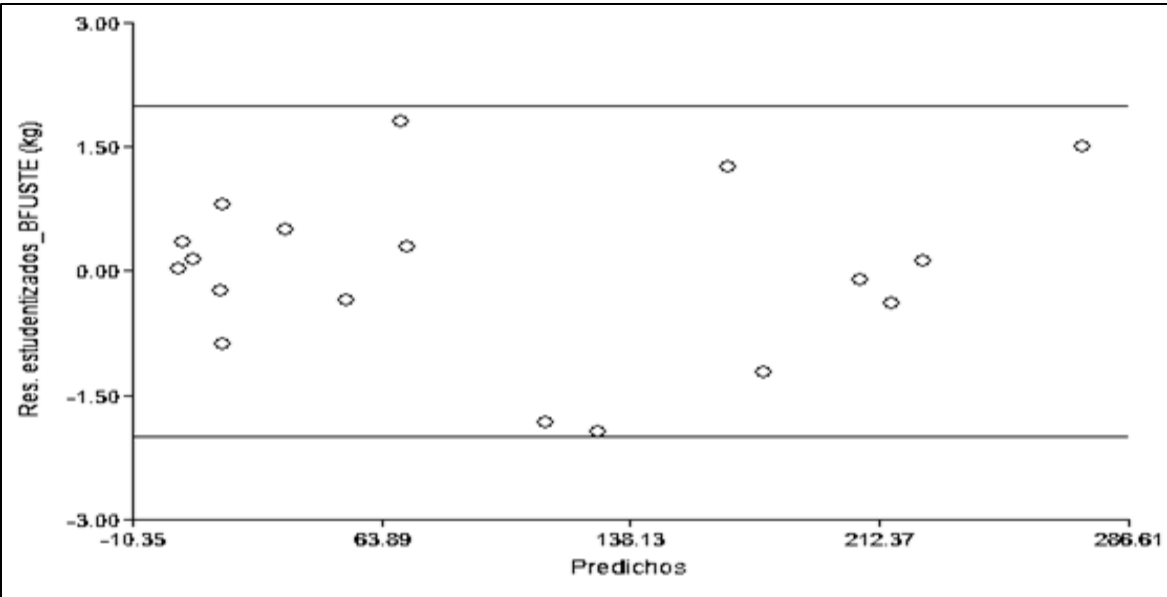
Eliminación backward. Máximo p-valor para retener: 0.15
 Número original de regresoras: 6, regresoras retenidas en el modelo 3

Coefficientes de regresión y estadísticos asociados

Coef	Est.	E.E.	LI (95%)	LS (95%)	T	p-valor	CpMallows	VIF
const	121.4544	29.1265	58.9843	183.9246	4.1699	0.0009		
ALTURA (m)	-26.3643	4.6750	-36.3912	-16.3374	-5.6394	0.0001	32.7493	47.1067
ALTURA (m)^2	1.3175	0.1654	0.9628	1.6721	7.9675	<0.0001	62.3163	43.2456
DAP (cm)^2	0.1221	0.0158	0.0882	0.1561	7.7187	<0.0001	58.6724	3.6462

Error cuadrático medio: 178.667551

Figura 20. Diagrama regresión lineal múltiple por el método de Eliminación Backward, entre las variables independientes con la biomasa del fuste, utilizando datos de 18 árboles.



ANEXO 8. RESULTADOS DE LA PRUEBA DE CARBONO



**CENTRO DE ESTUDIOS
AMBIENTALES Y DE BIODIVERSIDAD**
INSTITUTO DE INVESTIGACIONES
UNIVERSIDAD DEL VALLE DE GUATEMALA

18 AVENIDA 11-95, ZONA 15 VISTA HERMOSA III
CONTACTO: 2368-8353 EMAIL: cea@uvg.edu.gt
<http://www.uvg.edu.gt/investigacion/ceab/index.html>

Laboratorio de Análisis de Carbono
Centro de Estudios Ambientales y de Biodiversidad
Universidad del Valle de Guatemala

Guatemala, 11 de enero de 2016

Estudiante Gerson Morales

Presente

Por este medio hacemos entrega de los resultados del análisis del contenido de Carbono en 86 muestras vegetales, solicitado al Laboratorio de Análisis de Carbono del Centro de Estudios Ambientales y Biodiversidad de la Universidad del Valle de Guatemala. El cuadro 1 incluye la información de resultados, todos procesadas y determinados en nuestro laboratorio.

El Carbono orgánico está expresado como porcentaje peso/peso y fue determinado con un analizador elemental de carbono y nitrógeno (Flash EA 1112), después de haber secado y pulverizado las muestras.

El cuadro 1 muestra los resultados.

Cuadro No 1. Resultados del Análisis de Carbono en 86 muestras vegetales.

NO.	ID Origina	ID Nuevo	Carbono Orgánico (Base seca) (%)	Nitrógeno (Base seca) (%)
1	160-01	1 160-1	48.43	0.76
2	160-02	2 160-2	47.82	0.77
3	160-03	3 160-3	48.15	0.77
4	160-05	4 160-5	40.53	1.84
5	160-06	5 160-6	40.13	1.78
6	160-07	6 160-7	48.26	0.76
7	160-08	7 160-8	48.79	0.76
8	160-09	8 160-9	48.60	0.83
9	160-10	9 160-10	48.72	0.90
10	160-11	7 160-11	50.04	0.91
11	160-12	6 160-12	49.03	0.96
12	18Q-01	1 18Q-1	45.83	0.13
13	18Q-03	2 18Q-3	46.75	0.93
14	18Q-04	3 18Q-4	39.83	2.48
15	18Q-06	4 18Q-6	40.15	2.55
16	18Q-07	18Q-7	46.71	1.08
17	18Q-08	6 18Q-8	47.02	1.04
18	18Q-09	7 18Q-9	47.57	1.07
19	18Q-10	8 18Q-10	47.17	1.12



**CENTRO DE ESTUDIOS
AMBIENTALES Y DE BIODIVERSIDAD**

INSTITUTO DE INVESTIGACIONES
UNIVERSIDAD DEL VALLE DE GUATEMALA

18 AVENIDA 11-95, ZONA 15 VISTA HERMOSA III
CONTACTO: 2368-8353 EMAIL: cea@uvg.edu.gt
<http://www.uvg.edu.gt/investigacion/ceab/index.html>

NO.	ID Origina	ID Nuevo	Carbono Orgánico (Base seca) (%)	Nitrógeno (Base seca) (%)
20	18Q-11	5 18Q-11	50.10	1.12
21	18Q-12	11 18Q-12	47.18	1.31
22	205-01	1 205-1	46.78	0.29
23	205-02	2 205-2	48.78	0.53
24	205-03	3 205-3	52.18	0.64
25	205-04	4 205-4	43.10	2.04
26	205-06	5 205-6	47.11	1.93
27	205-07	6 205-7	51.31	0.59
28	205-08	7 205-8	50.38	0.68
29	205-09	8 205-9	50.09	0.76
30	205-10	9 205-10	49.93	0.62
31	205-11	4 205-11	48.94	0.85
32	6F01	1 6F1	46.75	0.76
33	6F02	2 6F2	48.65	0.50
34	6F03	3 6F3	48.32	0.56
35	6F04	4 6F4	46.99	0.88
36	6F06	5 6F6	40.13	2.29
37	6F07	6 6F7	49.08	0.69
38	6F08	7 6F8	48.61	0.60
39	6F09	8 6F9	40.65	2.32
40	6F10	9 6F10	48.75	0.74
41	6F-11	13 6F-11	48.78	0.81
42	6F-12	14 6F-12	62.13	0.60
43	8H-01	1 8H-1	43.08	0.98
44	8H-02	2 8H-2	46.43	0.37
45	8H-03	3 8H-3	48.90	0.83
46	8H-04	4 8H-4	50.21	0.89
47	8H-06	5 8H-6	42.17	2.80
48	8H-07	6 8H-7	42.46	2.74
49	8H-08	7 8H-8	47.52	0.99
50	8H-09	8 8H-9	48.66	0.85
51	8H-10	9 8H-10	48.45	0.83
52	8H-11	3 8H-11	49.26	0.87
53	8H-12	2 8H-12	48.46	1.17
54	8H-13	10 8H-13	48.99	1.34
55	8H-15	11 8H-15	43.71	2.82
56	8H-16	12 8H-16	41.79	2.60
57	8H-17	13 8H-17	47.86	1.01
58	8H-18	14 8H-18	49.18	0.81
59	8H-19	15 8H-19	50.33	0.75
60	8H-20	16 8H-20	52.30	0.56
61	8H-21	17 8H-21	48.71	0.90
62	8H-22	18 8H-22	49.48	1.07
63	8H-23	19 8H-23	48.67	1.03



**CENTRO DE ESTUDIOS
AMBIENTALES Y DE BIODIVERSIDAD**

INSTITUTO DE INVESTIGACIONES
UNIVERSIDAD DEL VALLE DE GUATEMALA

18 AVENIDA 11-95, ZONA 15 VISTA HERMOSA III
CONTACTO: 2368-8353 EMAIL: cea@uvg.edu.gt
<http://www.uvg.edu.gt/investigacion/ceab/index.html>

NO.	ID Origina	ID Nuevo	Carbono Orgánico (Base seca) (%)	Nitrógeno (Base seca) (%)
64	8h-24	A 8h-24	48.23	1.04
65	9I-01	1 9I-1	39.55	2.06
66	9I-02	2 9I-2	40.46	2.13
67	9I-03	3 9I-3	47.04	0.76
68	9I-04	4 9I-4	50.46	0.94
69	9I-06	5 9I-6	49.27	0.70
70	9I-07	6 9I-7	44.08	0.84
71	9I-08	7 9I-8	47.41	0.66
72	9I-09	8 9I-9	47.64	0.79
73	9I-10	9 9I-10	47.92	0.93
74	9I-11	10 9I-11	48.09	0.75
75	9I-12	12 9I-12	46.83	0.97
76	XX01	1 XX1	49.52	0.65
77	XX02	2 XX2	51.55	0.55
78	XX03	3 XX3	51.19	0.58
79	XX04	4 XX4	51.21	0.58
80	XX05	5 XX5	50.29	0.58
81	XX06	6 XX6	51.54	0.91
82	XX07	7 XX7	42.67	2.39
83	XX09	8 XX9	64.21	3.78
84	XX10	9 XX-10	48.78	0.84
85	XX11	10 XX-11	45.57	0.73
86	XX12	8 XX-12	50.12	0.85

Cualquier consulta no dude en comunicarse.
Sin otro particular, me despido.

Atentamente,

Licda. Gabriela Alfaro Marroquín
Coordinadora Laboratorio de Análisis de Carbono
Centro de Estudios Ambientales y de Biodiversidad
Universidad del Valle de Guatemala

galfaro@uvg.edu.gt

ANEXO 9. COMPARACIÓN DE BIOMASA ESTIMADA EN 2 ARBOLES DONDE SE DUPLICARON LAS MUESTRAS.

	ARBOL 3				ARBOL 6			
PARTE VEGETAL DEL ARBOL	Código	BIOMASA TOTAL FUSTE(kg)	Código	BIOMASA TOTAL FUSTE (kg)	Código	BIOMASA TOTAL FUSTE (kg)	Código	BIOMASA TOTAL FUSTE (kg)
Muestras de fuste	3C-1	66.152	X	64.77	6F-1	9.668	XX1	10.162
	3C-2		Y		6F-2		XX2	
	3C-3		Z		6F-3		XX3	
Muestras de hojas	3C-4	1.356	X1	1.985	6F-4	4.319	XX7	3.933
	3C-5		X2		6F-5		XX8	
	3C-6		X3		6F-6		XX9	
Muestras de ramas	3C-7	2.084	X4	2.104	6F-7	4.491	XX4	4.4023
	3C-8		X5		6F-8		XX5	
	3C-9		X6		6F-9		XX6	
Muestras de ramillas	3C-10	1.014	X7	2.551	6F-10	3.386	XX10	3.494
	3C-11		X8		6F-11		XX11	
	3C-12		X9		6F-12		XX12	

ANEXO 10. FACTOR DE CONVERSIÓN DE CARBONO OBTENIDOS EN LABORATORIO DE LA UNIVERSIDAD DEL VALLE DE GUATEMALA, CORRESPONDIENTES A 2 ARBOLES CON MUESTRAS DUPLICADAS.

ARBOL 8					ARBOL 6			
	CODIGO	% CARBONO	MUESTRA DUPLICADA	% CARBONO	CODIGO	% CARBONO	MUESTRA DUPLICADA	% CARBONO
FUSTE	8H-01	43.08	8H-16	41.79	6F-01	46.75	XX-01	49.52
	8H-02	46.43	8H-17	47.86	6F-02	48.65	XX-02	51.55
	8H-03	48.9	8H-18	49.18	6F-03	48.32	XX-03	51.19
HOJAS	8H-04	50.21	8H-13	48.99	6F-04	46.99	XX-07	42.67
	8H-06	42.17	8H-15	43.71	6F-06	40.13	XX-09	64.21
RAMAS	8H-07	42.46	8H-19	50.33	6F-07	49.08	XX-04	51.21
	8H-08	47.52	8H-20	52.3	6F-08	48.61	XX-05	50.29
	8H-09	48.66	8H-21	48.71	6F-09	40.65	XX-06	51.54
RAMILLAS	8H-10	48.45	8H-22	49.48	6F-10	48.75	XX-10	48.78
	8H-11	49.26	8H-23	48.67	6F-11	48.78	XX-11	45.57
	8H-12	48.46	8H-24	48.23	6F-12	62.13	XX-12	50.12