



UNAP

**Facultad de
Ciencias Forestales**

ESCUELA DE FORMACION PROFESIONAL DE INGENIERIA FORESTAL

T E S I S

**CARACTERÍSTICAS BIO-COMBUSTIBLES DE LA MADERA TOSTADA
Y CARBÓN DE PLANTACIONES *Vochysia lomatophyla* “quillosa”
DE DIFERENTES EDADES, PUERTO ALMENDRA,
IQUITOS-PERÚ**

Para optar el título de:

INGENIERO FORESTAL

Autor:

MIGUEL RUIZ AHUANARI

IQUITOS - PERU

2017

ACTA DE SUSTENTACIÓNDE TESIS Nº 773

Los miembros del Jurado que suscriben, reunidos para evaluar la sustentación de tesis presentado por el Bachiller MIGUEL RUIZ AHUANARI, titulada: "CARACTERISTICAS DE BIO-COMBUSTIBLES DE LA MADERA TOSTADA Y CARBÓN DE PLANTACIONES *Vochysia lomatophylla* "Quillosa" DE DIFERENTES EDADES, PUERTO ALMENDRA, IQUITOS-PERÚ", formuladas las observaciones y analizadas las respuestas,

la declaramos:

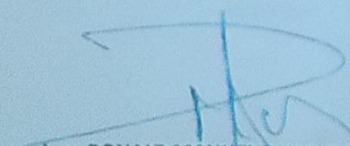
Con el calificativo de:

En consecuencia queda en condición de ser calificado:


Y, recibir el Título de Ingeniero Forestal.

APROBADO
BIENO
ARTO


Iquitos, 23 de febrero 2017



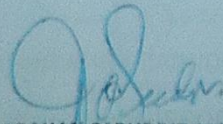
Ing. RONALD MANUEL PANDURO TEJADA, Dr.
Presidente



Ing. PEDRO ANGEL ANGULO RUIZ, M.Sc.
Miembro



Ing. JARLIN ARELLANO VALDERRAMA
Miembro



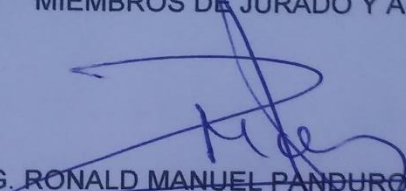
Ing. ABRAHAM CABUDIVO MOENA, Dr.
Asesor

TESIS


CARACTERÍSTICAS BIO-COMBUSTIBLES DE LA MADERA TOSTADA Y
CARBÓN DE PLANTACIONES *Vochysia lomatophyla* "quillosa" DE
DIFERENTES EDADES, PUERTO ALMENDRA, IQUITOS-PERÚ.

(Aprobado el 23 de febrero d 2017, según Acta de sustentación N° 773)

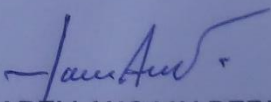
MIEMBROS DE JURADO Y ASESOR



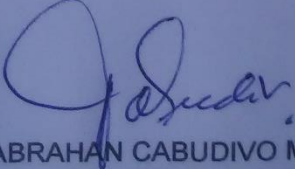
ING. RONALD MANUEL PANDURO TEJADA, Dr.
Reg. CIP N° 35493
Presidente



ING. PEDRO ANGEL ANGULO RUIZ, M. Sc.
Reg. CIP N° 40933
Miembro



ING. JARLIN ARELLANO VALDERRAMA
Reg. CIP N° 65945
Miembro



ING. ABRAHAM CABUDIVO MOENA, Dr.
Reg. CIP N° 40295
ASESOR

DEDICATORIA

A mis queridos padres
Segundo Miguel y Nancy,
quienes fueron un apoyo
material y emocional

A mis maestros, quienes nunca
desistieron al enseñarme,
aun sin importar algunas
veces no ponía atención.

A todas las personas que me apoyaron
para concluir el presente trabajo,
por su apoyo incondicional.

AGRADECIMIENTO

- * Al finalizar un trabajo tan arduo y lleno de dificultades al desarrollar la tesis, es inevitable concentrar la mayor parte del mérito en el aporte y participación de personas que han participado y facilitado para que el presente trabajo llegue a buen fin.

- * Agradecer de manera especial y sincera al Ingeniero Abrahán Cabudivo Moena, docente principal de la Facultad de Ciencias Forestales-UNAP, por su capacidad de guiarme, ayudarme a ejecutar y hacer realidad mis ideas mediante su asesoría.

INDICE

	Pág.
Dedicatoria	ii
Agradecimiento	iii
Lista de cuadros	vi
Lista de figuras	viii
Lista de fotos	ix
Resumen	x
I. INTRODUCCION	1
II. EL PROBLEMA	2
2.1 Descripción del problema	2
2.2 Definición del problema	2
III. HIPOTESIS	3
3.1 Hipótesis general	3
3.2 Hipótesis nula	3
IV. OBJETIVOS	4
4.1 Objetivo general	4
4.2 Objetivos específicos	4
V. VARIABLES	5
5.1 Identificación de variables, indicadores e índices	5
5.2 Operacionalización de variables	5
VI. REVISION DE LITERATURA	6
VII. MARCO CONCEPTUAL	15
VIII. MATERIALES Y METODO	17

8.1 Lugar de colección de las muestras	17
	Pág.
8.2 Materiales y equipo	17
8.3 Métodos	18
8.3.1 Tipo de investigación	18
8.3.2 Población y muestra	18
8.3.3 Diseño de la investigación	19
8.3.4 Análisis estadístico	19
8.3.5 Procedimiento	19
8.4 Técnicas de presentación de resultados	21
IX. RESULTADOS	22
9.1 Rendimiento bio-combustible madera tostada y carbón de plantaciones <i>V. lomatophyla</i>	22
9.2 Capacidad de carbono fijo en el producto bio-combustible de la madera tostada y carbón de plantaciones <i>V. lomatophyla</i> .	25
9.3 Poder calorífico del producto bio-combustible de la madera tostada y carbón de plantaciones <i>V. lomatophyla</i>	28
X. DISCUSION	31
XI. CONCLUSIONES	33
XII. RECOMENDACIONES	34
XIII. BIBLIOGRAFIA	35
ANEXO	

LISTA DE CUADROS

Nº	Título	Pág.
1	Población y muestras seleccionadas	18
2	Diseño de evaluación de las características bio-combustibles de madera tostada y carbón de plantaciones de <i>Vochysia lomatophylla</i>	19
3	Rendimiento bio-combustible madera tostada y carbón de plantaciones de <i>V. lomatophylla</i>	23
4	Análisis de varianza de rendimiento de bio-combustibles	24
5	Prueba de Duncan del rendimiento interacción Edad – Bio-combustible de <i>V. lomatophylla</i>	24
6	Amplitud de límites estandarizados de Duncan para rendimientos de la interacción Edad-bio-combustibles	24
7	Carbono fijo del producto bio-combustible madera tostada y carbón de plantaciones de <i>V. lomatophylla</i>	26
8	Análisis de varianza del carbono fijo de bio-combustibles	27
9	Prueba de Duncan del carbono fijo interacción Edad – Bio-combustible de <i>V. lomatophylla</i>	27
10	Amplitud de límites estandarizados de Duncan para carbono fijo interacción Edad-bio-combustibles	27
11	Poder calorífico de la madera tostada y carbón de <i>V. lomatophylla</i>	29
12	Análisis de varianza del poder calorífico de bio-combustibles	30
13	Prueba de Duncan del poder calorífico interacción Edad – Bio-combustible de <i>V. lomatophylla</i>	30
14	Amplitud de límites estandarizados de Duncan para poder calorífico	

interacción Edad-bio-combustibles

30

LISTA DE CUADROS

Nº	Título	Pág.
15	Calculo del rendimiento de bio-combustibles de <i>V. lomatophylla</i>	42
16	Calculo del carbono fijo de bio-combustibles de <i>V. lomatophylla</i>	43
17	Calculo de poder calorífico de bio-combustibles de <i>V. lomatophylla</i>	44

LISTA DE FIGURAS

Nº	Título	Pág.
1	Rendimiento bio-combustible de plantaciones <i>V. lomatophylla</i>	23
2	Carbono fijo de bio-combustible de plantaciones <i>V. lomatophylla</i>	26
3	Poder calorífico de madera tostada y carbón de <i>V. lomatophylla</i>	29
4	Mapa de ubicación del CIEFOR-Puerto Almendra	40
5	Ubicación de las plantaciones números 3, 15 y 64 de quillosa	44

LISTA DE FOTOS

Nº	Título	Pág.
1	Muestras de madera	47
2	Tamaño de muestras Tamaño de muestras	47
3	Pesado de muestra	47
4	Mufla a 20°C	47
5	Mufla a 260°C	47
6	Mufla a 290°C	47
7	Ambiente de la mufla	47
8	Crisol + muestra	50
9	Molido de muestra	47
10	Muestra molida	47
11	Muestra de carbón	47
12	Muestra tostada	47
13	Mostrando el laboratorio	48
14	Materiales usados en los ensayos	48
15	Pesando muestras obtenidas	48
16	Mufla eléctrica usada en ensayos	48
17	Extrayendo muestras de la mufla	48
18	Midiendo el volumen de la muestra	48

RESUMEN

En el presente estudio se cuantificó el rendimiento, carbono fijo y poder calorífico de productos bio-combustibles madera tostada y carbón de plantaciones *Vochysia lomatophyla* Standl “quillosa” en Puerto Almendra.

Las muestras para los ensayos se colectaron en las plantaciones N° P-64, P-03 y P-15 de *V. lomatophyla* Standl “quillosa” de 17 años, 25 años y 36 años respectivamente; y los ensayos termoquímicos, se llevaron a cabo en el Laboratorio de química y Energía de Productos Forestales, ubicados ambos en el CIEFOR Puerto Almendra de la Facultad de Ciencias Forestales de la UNAP, Iquitos, Perú. En una mufla eléctrica hasta 280°C se tostaron y hasta 300°C se carbonizaron las muestras de madera. Analizando la variable edad, los resultados muestran que el mayor rendimiento bio-combustible en madera tostada fue en la plantación de 36 años con 75,14% seguido de la plantación de 25 años con 73,30% y de 17 años con 65,07%; mientras que en carbón fue de 34,46%, 33,11% y 29,98% respectivamente. Con respecto al carbono fijo, el mayor porcentaje fue determinado en la plantación de 36 años, seguido de 25 Años y 17 años con 62,43%, 62,05% y 55,10% respectivamente. Mientras que el mayor poder calorífico, se ha determinado en la plantación de 36 años con 6749,99 kcal/kg seguido de 25 años con 6545,84 kcal/kg y de 17 años con 6440,33 kcal/kg.

Palabras claves: Termoquímica, biocombustible, carbono fijo, poder calorífico.

I. INTRODUCCION

Teniendo en cuenta que el gobierno peruano se ha planteado cero talas para el 2021, esta acción es por el compromiso de reducir la contaminación por CO₂ al medio ambiente; es necesario promover el conocimiento acerca de plantaciones establecidas.

La Universidad Nacional de la Amazonia Peruana a través del Centro de Investigación y Enseñanza Forestal-CIEFOR Puerto Almendra, tiene instalado aproximadamente 18 has en plantaciones de diferentes especies y edades, por lo que es necesario evaluar energéticamente, porque las poblaciones rurales y suburbanas de las ciudades siguen utilizando a la madera como leña y carbón. Los estudios sobre el potencial energético con fines combustibles de árboles especialmente en plantaciones de *Vochysia lomatophyla* Standl. “quillosa” de 17 años, 25 años y 36 años de edad traería como efecto en la toma de decisiones identificando el turno adecuado para el aprovechamiento integral de la madera, así impulsar inversiones en negocios para atender a la industria del secado de la madera, ladrilleras y para uso doméstico.

El aporte del estudio es muy importante en los aspectos ecológicos, económicos y sociales dentro de la transición de la silvicultura mundial en base del desarrollo sostenible, porque, conociendo el turno adecuado para el aprovechamiento integral de la madera con fines combustibles por cada plantación, es posible gestionar inversiones en plantaciones y obtener rentabilidad económica en un turno conocido en el tiempo, que ayuden a trabajar para la ampliación de áreas de plantaciones y contribuir en la reducción de la deforestación de bosques naturales.

II. EL PROBLEMA

2.1 Descripción del problema

En el Centro de Investigación y Enseñanza Forestal de la Universidad Nacional de la Amazonia Peruana (UNAP), existen plantaciones de diferentes especies y edades; sin embargo, existen pocos estudios con certeza científica referentes al potencial energético con fines combustibles, especialmente en plantaciones de *Vochysia lomatophyla* Standl “quillosa” de diferentes edades. La no cuantificación de estas plantaciones traería como efecto la tardanza y/o freno en la toma de decisiones identificando el turno adecuado para el aprovechamiento integral de la madera.

Para evitar que los bosques naturales se sigan deforestando es necesario conocer el turno de aprovechamiento tecnológico para uso energético de las plantaciones, de esta manera, el manejo tiene que volverse más rentable (Prince y Waage, 2007); por eso es necesario que la UNAP y las comunidades rurales puedan obtener beneficios de los emergentes mercados con la finalidad de financiar la conservación y el desarrollo sostenible a nivel local.

2.2 Definición del problema

Problema general

¿Será posible conocer las características bio-combustibles de la madera tostada y carbón de plantaciones *Vochysia lomatophyla* Standl “quillosa” de 17 años, 25 años y 36 años de edad en Puerto Almendra, Iquitos-Perú?

III. HIPOTESIS

3.1 Hipótesis general

Las características bio-combustibles de la madera tostada y carbón de plantaciones *Vochysia lomatophyla* Standl “quillosa” de 17 años, 25 años y 36 años de edad son diferentes en Puerto Almendra, Iquitos-Perú

3.2 Hipótesis alterna

Las características bio-combustibles de la madera tostada y carbón de plantaciones *Vochysia lomatophyla* Standl “quillosa” de 17 años, 25 años y 36 años de edad son diferentes significativamente en Puerto Almendra, Iquitos-Perú

3.3 Hipótesis nula

Las características bio-combustibles de la madera tostada y carbón de plantaciones *Vochysia lomatophyla* Standl “quillosa” de 17 años, 25 años y 36 años de edad no son diferentes significativamente en Puerto Almendra, Iquitos-Perú

IV. OBJETIVOS

4.1 Objetivo general

Describir las características bio-combustibles de la madera tostada y carbón de plantaciones *Vochysia lomatophyla* Standl “quillosa” de 17 años, 25 años y 36 años de edad en Puerto Almendra, Iquitos-Perú.

4.2 Objetivos Específicos

- Cuantificar el rendimiento bio-combustible de la madera tostada y carbón de plantaciones *Vochysia lomatophyla* Standl “quillosa” de 17 años, 25 años y 36 años de edad en Puerto Almendra, Iquitos-Perú.
- Determinar el porcentaje de carbono fijo del producto bio-combustible madera tostada y carbón de plantaciones *Vochysia lomatophyla* Standl “quillosa” de 17 años, 25 años y 36 años de edad en Puerto Almendra, Iquitos-Perú
- Determinar el poder calorífico del producto bio-combustible de la madera tostada y carbón de plantaciones *Vochysia lomatophyla* Standl “quillosa” de 17 años, 25 años y 36 años de edad en Puerto Almendra, Iquitos-Perú.

V. VARIABLES

5.1 Identificación de variables, indicadores e índices

Las variables identificadas para describir en el presente estudio son muestras de: **A Variable independiente: Edad de plantaciones** de *Vochysia lomatophyla* Standl “quillosa” de 17 años, 25 años y 36 años de edad instaladas en el Centro de Investigación y Enseñanza Forestal Puerto Almendra y **B: Variable dependiente: Características Bio combustible** Madera tostada y carbón. Mientras que los indicadores a evaluar fueron la medición de la densidad de la madera tostada, densidad del carbón, carbono fijo en madera tostada y carbón, poder calorífico de la madera tostada y carbón.

5.2 Operacionalización de las variables

VARIABLES	INDICADORES	INDICES
A. Variable independiente	➤ Rendimiento de madera tostada	%
Edad de la Plantación	➤ Rendimiento de carbón	%
- 17 años	➤ Densidad de la madera tostada	Kg/m ³
- 25 años	➤ Densidad del carbón	Kg/m ³
- 36 años	➤ Carbono fijo madera tostada	%
B. Variable dependiente	➤ Carbono fijo del carbón	%
Características Bio-	➤ Poder calorífico madera tostada	Kcal/kg
Combustibles de la	➤ Poder calorífico del carbón	Kcal/kg
- Madera tostada		
- Carbón		

VI. REVISION DE LITERATURA

6.1 Antecedentes

Los combustibles a base de madera representan aproximadamente el 7% del suministro total de la energía mundial pero en los países en desarrollo representa un promedio del 15% (FAO 1983; Hall *et al.* 1992). Una de las vías más interesantes de aprovechamiento de los residuos forestales y agrícolas leñosos es su valorización energética mediante el empleo de procesos termoquímicos: combustión, gasificación y pirolisis (Goldstein, 1981). Por otro lado, la población mayormente rural de la selva baja de la amazonia obtiene energía principalmente de biomasa, sean estos de leña o carbón, porque, tienen disponibles los recursos boscosos; por lo que resulta barato obtener energía; que queda demostrado dos aspectos claves para valorizarlo energéticamente, que son su disponibilidad y su poder calorífico. El primero está garantizado en la región amazónica (Gonzales, 2008).

Doat (1985), menciona que la madera tostada es producido con un rendimiento ponderal que se sitúa alrededor de las $\frac{3}{4}$ partes del total de la madera inicial, comparando al rendimiento registrado de la carbonización industrial que es de 30-32% y los de la carbonización artesanal que esta entre el 15-25%. En donde el mejor valor calorífico del nuevo producto en comparación de la madera y del carbón es a partir del cálculo de los rendimientos energéticos de la transformación “torrefacción” que se sitúan entre el 80 y 86 % valores que dan la carbonización en rendimientos energéticos llegando a 60%; este punto es muy importante, porque la madera tostada conserva una gran parte de energía potencial de la madera

inicial. El mismo autor manifiesta, desde el punto de vista de las características físico-químico la madera tostada presenta los siguientes: cenizas 0,5-1%; contenido de volátiles 60-70%; poder calorífico 5200 a 6000Kcal/kg; madera anhidra 4600-4800 kcal/kg; madera seca al aire 3700-3800 Kcak/kg y madera verde 2200-2400 Kcal/kg; mientras que el carbón tiene 6500-8000 Kcal/kg. Por su parte Rodríguez (2003) concluye que mejores características físico-químico-energética de leña seca al aire, leña tostada y carbón de residuos de aserrío fueron en *Micrandra spruceana* “siringa masha” y *Vochisia vismifolia* “quillosa” maderas obtenidas de bosque natural, estas especies tienen madera de densidad media.

Doat (1985), describe los resultados de los ensayos de torrefacción de la madera realizados con once especies de bosques tropicales, teniendo lo siguiente: rendimiento ponderal de madera seca 68%-78%; poder calorífico 5050 Kcak/kg – 5700 Kca/kg; rendimiento energético 76% - 86%; características químicas de productos: cenizas 0,35% - 1,25%; materias volátiles 68,70% - 71,20%; Carbono fijo 28,30% - 30,90%.

Cabudivo (1990) en un estudio sobre rendimiento y análisis químico inmediato del carbón de tres especies tropicales concluye que para obtener un carbón de alta pureza es necesario carbonizar en un tiempo prolongado de 4 horas y a temperatura más de 400°C en reactores de 0,40 cm de diámetro con 0,60 de largo. Por su parte FAO (1983), Briane y Doat (1985) afirman que las características del carbón de madera como su masa específica puede variar entre 0,20 – 0,60 t/m³; y está fuertemente correlacionada con las propiedades de la madera inicial; es decir, una madera densa dará un carbón denso.

Donayre y Cabudivo (2015) realizando ensayos referente a rendimientos energéticos de la madera tostada y carbón de tres especies del arboretum El huayo, concluye que el mayor rendimiento en madera tostada a los 280°C fue en la madera de “shimbillo negro” *M. limbatum* con 75,76%, seguido de “pucuna caspi” *I. tricornis* con 74,53% y “huira caspi” *N. yapurensis* con 65,47%. Mientras que en carbón, a los 350°C en “huira caspi” *N. yapurensis* con 35,65%, “pucuna caspi” *I. tricornis* con 34,73% y “shimbillo negro” *M. limbatum* con 33,97%. El mayor poder calorífico fue en el carbón de shimbillo negro a los 350°C con 8423,84 kcal/kg seguido de huira caspi con 8331,91 kcal/kg y Pucuna caspi con 8300,29 kcal/kg. Mientras que el mayor valor en poder calorífico en madera tostada, se ha encontrado en shimbillo negro a los 280°C con 5298,77 kcal/kg seguido de huira caspi con 5203,13 kcal/kg y Pucuna caspi con 4863,60 kcal/kg; obteniendo el mayor rendimiento energético en Pucuna caspi en madera tostada a los 280°C con 97,86%; seguido de huira caspi con 90,65% y shimbillo negro con 90,27%. De manera similar, en el carbón a 350°C, el mayor rendimiento energético se ha obtenido en Pucuna caspi con 57,63%; seguido de huira caspi con 57,12% y shimbillo negro con 56,78%.

García-Rojas *et al.* (2009), realizando ensayos sobre el poder calorífico de la madera y el carbón de *Eucalyptus saligna* Smith a diferentes alturas del fuste comercial han determinado que el mayor valor calorífico obtenido fue en la parte más baja del fuste del árbol (madera: baja 20,33 kj/g; media 20,25 kj/g y alta 20,22 kj/g; carbón: baja 32,54 kj/g; media 32,30 kj/g y alta 32,24 kj/g), se observa el menor valor para la parte alta del fuste del árbol lo que se relaciona con el menor porcentaje de carbono fijo. Existen diferencias

significativas entre los valores caloríficos de los carbones, entre la parte baja, media y alta. Por su parte Remigio (1983) en su estudio de carbón procedente de cuatro maderas del Perú, determino las características siguientes: densidad aparente $0,34 \text{ g/cm}^3$ - $0,55 \text{ g/cm}^3$; mientras que el poder calorífico superior de 8000 kcal/kg - 8665 kcal/kg . Rivera (1997) y Remigio (1983) realizando un análisis químico del carbón de maderas peruanas determinaron la humedad en 5,2%; materias volátiles entre 11,8% y 14,7%; cenizas entre 3,9% y 5,7% y carbono fijo entre 74,4% y 79,1%. Por otro lado Taranco, Cabudivo y Da Cunha (1991) mencionan que la calidad del carbón depende de la especie de la madera, dimensiones, y temperatura de carbonización, tiempo y método de carbonización. La especie es el factor más importante porque la densidad del carbón depende de la densidad de la madera. Las dimensiones influyen mucho, porque la madera en pedazos pequeños produce carbón más denso, tiene menos tendencia a deteriorarse durante la carbonización. La carbonización lenta quiebra menos carbón que los métodos rápidos. La temperatura influye en el peso por metro cubico y en el porcentaje de carbono fijo. Los mismos autores realizando ensayos de carbonización con cinco especies de la amazonia peruana-brasileña con cinco árboles y a tres niveles de altura del fuste y con contenido de humedad entre 13% y 15% obtuvieron rendimientos entre 32% y 41,92%.

6.2 Marco teórico

6.2.1 Madera como fuente de energía

Un conocimiento de la potencialidad y versatilidad de la madera como fuente de combustible es un pre-requisito indispensable para el análisis económico de los proyectos que envuelven la conversión o utilización del bosque para

la producción de energía. La madera como combustible posee la ventaja de ser renovable, tiene bajo contenido de cenizas y cantidades ínfimas de óxidos. Es voluminoso y presenta bajo poder calorífico; y para la transformación de la madera a fuentes secundaria de energía es utilizada diversos procesos, especialmente la pirolisis, gasificación e hidrolisis (Martins, 1980). La pirolisis es el proceso por el cual la madera es quemada en ambiente cerrado con exclusión de aire, presentando las siguientes etapas: I) etapa Endotérmica (secado) de 100°C–200°C producto Agua. II) etapa Endotérmica 170°C – 270°C dióxido de carbono (CO₂), monóxido de carbono (CO), agua (H₂O), Ácido acético (CH₃CO₂H), Metanol (CH₃OH), acetona (CH₃CHO) y alquitrán; III) etapa Exotérmica 270°C–280°C dióxido de carbono (CO₂), monóxido de carbono (CO), agua (H₂O); hidrogeno (H₂), metano (CH₄); Metanol (CH₃OH), acetona (CH₃CHO), Ácido acético (CH₃CO₂H) y alquitrán; IV) etapa Exotérmica 240°C-400°C Hidrocarbonetos; hidrogeno (H₂), monóxido de carbono (CO) y dióxido de carbono (CO₂) (Earl 1975).

La gasificación de la madera o del carbón vegetal es producida en los procesos de pirolisis mediante el empleo de cantidades controladas de aire o mezcladas con oxígeno y vapor de agua en proporciones variadas. Mientras que en la hidrolisis, consiste en el ataque de agua en medio ácido, sobre los componentes celulósicos de la madera los cuales son convertidos en azúcares. Después de la separación de la lignina insoluble a solución de azúcares es sometida a fermentación con levadura *Saccharomyces cerevisiae* para producir etanol y dióxido de carbono. En el proceso hidrolítico la proporción relativa de celulosa y hemicelulosa y la cantidad de

lignina determinaran el curso de la hidrólisis y el rendimiento de azúcares reductores (Martins, 1980)

6.2.2 Tostado y carbonizado de la madera

El tostado es un método para el mejoramiento de las propiedades de la madera como combustible. Consiste en el calentamiento lento de la biomasa en atmósfera inerte y a una temperatura máxima de 280 °C (Fonseca, *et al.* 1998). Se produce un producto sólido uniforme con bajo contenido de humedad y alto poder calorífico comparado con la madera inicial. El proceso puede ser llamado también pirólisis moderada, con remoción de los productos que producen el humo y la formación de productos sólidos que retienen aproximadamente el 70 % del peso inicial y entre 80-90 % del contenido de energía (Arcate, 2000).

Tito *et al.* (2011) describe al tostado de la madera cuando se calienta, en primer lugar se produce el secado. El calentamiento remueve además nuevas cantidades de agua producto de las reacciones químicas a través del proceso de termo condensación, el cual ocurre por encima de 160 °C, así como la formación de CO y CO₂. A temperaturas entre 180-270 °C tiene lugar una reacción exotérmica, y a continuación la degradación de la hemicelulosa. La madera comienza a tostarse y desprende humedad, CO₂ y grandes cantidades de ácido acético con algunos fenoles. Estos compuestos tienen bajo valor energético. Por eso, Doat (1985), indica que para comprender que es el tostado y/o la torrefacción de madera es necesario conocer la teoría de la carbonización y sus diferentes mecanismos que tiene el proceso de carbonización total de la madera, por ello, Batista citado por Rivera (1987) manifiesta que el comportamiento de la madera durante el proceso de

carbonización puede ser representado por la sumatoria de los comportamientos aislados de sus tres componentes principales: celulosa, hemicelulosa y lignina. La madera tostada puede sustituir al carbón vegetal en gran número de aplicaciones, como combustible para cocinas de leña, domésticas para calentamiento de residencias, producción de madera pelletizada y en briquetas para uso comercial y doméstico (Bourgeois y Doat 1985; Girard y Shah 1991; Battacharya *et al.* 1995). Puede ser usada como combustible en la industria, con un intervalo entre 30 y 35% de carbono fijo, es un excelente agente reductor (Girard y Shah 1991) y puede ser mezclada con carbón mineral y quemada en una caldera de carbón mineral pulverizado. Una ventaja importante de la madera tostada, en comparación con la madera original, es su uniformidad. Debido al bajo contenido de humedad, la calidad del combustible es mejor y el costo del transporte menor. Las propiedades de este producto deberían implicar un mejoramiento en la operación de los gasificadores, donde la estabilidad del proceso es importante (Bourgeois y Doat 1985).

6.2.3 Carbono fijo en la madera tostada y carbón

El carbono fijo es elemento químico sólido y no metálico que se encuentra en todos los compuestos orgánicos y en algunos inorgánicos. En su estado puro se presenta como diamante o grafito la cual está representado por unas mallas paralelas distantes unas de otras de 0,36 mm esta red está formado por hexágonos de 0,142 mm de lado, teniendo un carbono en cada ángulo y algunos radicales periféricos que están situados al exterior de las moléculas. Sin embargo el mecanismo exacto de esta malla hexagonal del carbono a partir de los compuestos de la madera no está aún dilucidado (Briane y Doat

citado por Rivera, 1987). Mientras que la **Ceniza**: Es el resultado del calentamiento al rojo vivo, con presencia de aire, hasta quemar completamente toda sustancia combustible de un cuerpo (ABNT 1985)

6.2.4 Poder calorífico de la madera y del carbón

Con referencia a la determinación del poder calorífico superior del carbón vegetal Guimaraes, Aguielino y Batista (1982), manifiesta que existen dos métodos para la determinación del poder calorífico de carbón vegetal. Un método directo y el indirecto. La determinación por el método directo es utilizando una bomba calorimétrica y la determinación por el método indirecto es calculando a partir del análisis químico elemental, es decir conociendo la composición elemental como el carbono, hidrógeno y oxígeno. El mismo autor (1982), menciona que al observar en la práctica la dificultad de tener las proporciones cuantitativas de la composición química elemental del carbón, realizaron algunos cálculos encontrando ecuaciones y correlaciones, entonces sugieren que utilizando el análisis químico inmediato del carbón se puede calcular el poder calorífico superior, el cual ha sido propuesto y han sido utilizadas en varios trabajos aplicando la fórmula de Gouthal, porque permite calcular el poder calorífico superior del carbón vegetal conociendo el contenido del análisis químico inmediato, por ser un análisis ligero y que no exige de muchos instrumentos sofisticados, siendo que el porcentaje de contenido de materias volátiles no sobrepasen el 40% en el carbón.

Para el estudio de las características bio-combustibles de la madera tostada y el carbón de *Vochysia lomatophyla* “quillosa” de 17 años, 25 años y 36 años, se ha establecido una ecuación basada en resultados previos Cordero

et al. (2001), que correlaciona el poder calorífico de diversas materiales biomásicos con sus contenidos en materia volátil y carbono fijo.

Con referencia a las propiedades químicas, VIAN citado por Cabudivo (1990), manifiesta que para expresar la composición de carbones son de uso ordinario dos tipos de análisis: Mediato e inmediato. En el análisis mediato, se hace las determinaciones de cada uno de los principales elementos químicos como el carbono, hidrogeno, oxigeno, nitrógeno, etc., y en el análisis inmediato se hace las determinaciones de cada uno de los principales grupos de constituyentes definidos como: contenido de humedad, materias volátiles, cenizas y carbono fijo. Además, agrega que los contratos y especificaciones para el mercado del carbón se fundamentan frecuentemente sobre este último método de análisis.

VII. MARCO CONCEPTUAL

Calor: Energía que tiene un objeto debido al movimiento de sus átomos y moléculas que están constantemente vibrando, moviéndose y chocando unas con otras (INE, 2007)

Carbón: Material sólido, ligero, negro y muy combustible, que resulta a partir de la destilación o de la combustión incompleta de la leña u otros cuerpos orgánicos (Cabudivo, 1990).

Carbonización: Proceso que se aplica a un cuerpo orgánico a una determinada temperatura en un ambiente cerrado para obtener como residuo carbón (Doat 1985)

Carbono fijo: Elemento químico sólido y no metálico que se encuentra en todos los compuestos orgánicos y en algunos inorgánicos. En su estado puro se presenta como diamante o grafito (Rivera, 1987).

Ceniza: Es el resultado del calentamiento al rojo vivo, con presencia de aire, hasta quemar completamente toda sustancia combustible de un cuerpo (ABNT 1985)

Combustión: Reacción química en la que un elemento combustible se combina con otro comburente (generalmente oxígeno en forma de O_2 gaseoso), desprendiendo calor y produciendo un óxido (INE, 2007)

Densidad: Relación entre la masa y el volumen de una sustancia o cuerpo (Remigio, 1983)

Energía: Propiedad acumulativa que se conserva, pero que puede transformarse y / o pasar de un cuerpo a otro mediante trabajo, calor o un flujo de sustancias (INE, 2007).

Energía de la Biomasa: energía renovable originada, gracias a la luz del sol y mediante la fotosíntesis por la materia vegetal y los hidratos de carbono sintetizados por las plantas (INE, 2007))

Endotérmico: Cuando un cuerpo requiere de calentamiento exterior (Doat, 1985).

Exotérmico: Cuando un cuerpo genera calor propio (Doat, 1985).

Lignina: Polisacárido pero que se sitúa entre las fibras de la celulosa de algunas células. Se encarga de dar la dureza y la consistencia a la madera (Rivera 1987).

Madera: Material biológico, anisotrópico e higroscópico, compuesto principalmente por moléculas de celulosa y lignina (Martins, 1980)

Materia volátil: Son todos los residuos líquidos y alquitranados que no fueron eliminados completamente durante el proceso de carbonización (Doat, 1985)

Pirolisis: Reducir a carbón un cuerpo orgánico con fines de extracción de aceites en el laboratorio (Doat, 1985)

Poder calorífico: Cantidad de energía desprendida en la reacción de combustión, referida a la unidad de masa de combustible (Martins, 1980)

Poder calorífico inferior (PCI): Cantidad total de calor desprendido en la combustión completa de 1 kg de combustible sin contar la parte correspondiente al calor latente del vapor de agua de la combustión, ya que no se produce cambio de fase, y se expulsa como vapor (Martins, 1980)

Poder calorífico superior (PCS): Cantidad total de calor desprendido en la combustión completa de 1 Kg de combustible cuando el vapor de agua originado en la combustión está condensado y se contabiliza, por consiguiente, el calor desprendido en este cambio de fase. (Martins, 1980).

VIII. MATERIALES Y METODOS

8.1 Lugar de ejecución

El presente estudio se realizó en el “Laboratorio de Química y Energía de Productos Forestales”, instaladas en el Centro de Investigación y Enseñanza Forestal (CIEFOR) –Puerto Almendra, ubicado al margen derecho del río Nanay a 22 Km de distancia en dirección Sur-Oeste desde la ciudad de Iquitos; geográficamente se encuentra ubicado en las coordenadas 3° 49´ 40’’ Latitud Sur y 73° 22´ 30’’ Longitud Oeste, a una altitud aproximada de 122 msnm (Cabudivo, *et al.* 2011).

Clima

Climatológicamente presenta precipitación media anual está en 2979,3 mm; la temperatura media anual es de 26,4 °C; las temperaturas máximas y mínimas promedio anuales alcanzan 31,6 °C y 21,6 °C, respectivamente; la humedad relativa media anual es de 82,1 %. El área de estudio se localiza en Bosque Húmedo Tropical (bh – T), (Cabudivo *et al.* 2011).

8.2 Materiales y equipo

Materiales

De Campo

Libreta de campo, wincha, botas, machete, bolsas de plástico, rafia, capota, etiquetas plásticas, chinches, cámara fotográfica, GPS Garmin,

De Laboratorio

Estufa eléctrica, balanza mecánica, vernier o pie de rey, balanza de precisión con aproximación de $\pm 0.0001g$, desecador con sal higroscópica “silicagel”,

mufla eléctrica, con capacidad máxima de 1200 °C, crisoles de porcelana, pinza metálica, placas petri de vidrio, mortero de loza.

De Gabinete

Papel bond A4, computadora, USB, calculadora, impresora, cartuchos de tinta, plumón indeleble.

8.3 Método

8.3.1 Tipo y nivel de investigación

El presente estudio es del tipo descriptivo comparativo y el nivel de investigación es básico.

8.3.2 Población y muestra

La población del estudio estuvo conformada por todos los árboles de las plantaciones de *Vochysia lomatophyla* “quillosa” de 17 años, 25 años y 36 años de edad, que se encuentran establecidas en el CIEFOR Pto Almendra, según inventario realizado por (Espíritu *et al.* 2015).

Las muestras de madera para realizar los ensayos de carbonización fueron obtenidas de ramas de tres árboles por cada plantación de 17 años, 25 años y 36 años. (Espíritu *et al.*, 2015), ver figura 5 y 6 del anexo.

Cuadro 01: Población y muestras seleccionadas

N°	Especie	Parcela	Edad	Arboles
1	<i>Vochysia lomatophyla</i>	P-3	25	62
2	<i>Vochysia lomatophyla</i>	P-15	36	10
3	<i>Vochysia lomatophyla</i>	P-64	17	18

8.3.3 Diseño de la investigación

Para evaluar las características bio-combustibles de la madera tostada y carbon de *Vochysia lomatophyla* de diferentes edades en Puerto Almendra, se tuvo el siguiente diseño:

Cuadro 2: Diseño de evaluación de las características bio-combustibles de madera tostada y carbón de plantaciones de *Vochysia lomatophyla*

Plantación	Edad (años)	Bio-combustible
<i>Vochysia lomatophyla</i>	17	Madera tostada
	25	Madera tostada
	36	Madera tostada
<i>Vochysia lomatophyla</i>	17	Carbón
	25	Carbón
	36	Carbón

8.3.4 Análisis estadístico

Las comparaciones de las características bio-combustibles en *Vochysia lomatophyla* fueron establecidas mediante la aplicación del ANVA con nivel de significación de 0,05. Además, se realizó la prueba estadística de amplitud de límites de significación de Duncan al $\alpha = 0,05$ para comparar el nivel de significancia de diferentes edades y tipo de bio-combustibles.

8.3.5 Procedimiento

a) Obtención de muestras de madera de los arboles

En cada plantación de 17 años, 25 años y 36 años, se inició con la numeración de todos los arboles libres de defectos naturales visibles, a

continuación se procedió a elegir tres (03) arboles al azar para obtener muestras de madera para ensayos y obtener madera tostada y carbón.

b) Ensayos de carbonización

Para obtención de madera tostada y carbón se realizó de acuerdo al siguiente detalle: Para obtener madera tostada se utilizó una mufla eléctrica hasta una temperatura constante de 280°. Para obtener el carbón se utilizó una mufla eléctrica hasta una temperatura constante de 300°C.

c) Rendimiento de los bio-combustibles

$$R\% = (P2/P1) * 100$$

Dónde:

R% = Rendimiento de los bio-combustibles, en porcentaje.

P1 = Peso de la muestra inicial, en gramos.

P2 = Peso de la madera tostada y/o carbón, en gramos.

d) Determinación de la densidad básica de la madera tostada y el carbón

Se realizó con muestras obtenidas de los ensayos de madera tostada y carbón. Para determinar el volumen de las probetas se utilizó el método de medición directa mediante el uso del vernier, consistente en medir el largo x ancho x espesor de las probetas, se calculó mediante la siguiente expresión:

$$Db = Psm/Vhm$$

Dónde.

Db = Densidad madera tostada y/o carbón, en kg/m³.

Psm = Peso seco de la madera tostada y/o carbón, en kg

Vm = Volumen de la madera tostada y/o carbón, en m³

e) Determinación del carbono fijo en madera tostada y carbón

El carbono fijo es uno de los componentes más activos en la muestra, en la combustión genera calor. El contenido de carbono fijo es una medida

indirecta, es calculado por diferencia de 100% menos la suma de las otras determinaciones realizadas (ABNT 1985), ver anexo.

El contenido de carbono fijo se calcula según la siguiente expresión:

$$Cf\% = 100 - (H\% - Mv\% - Cz\%)$$

Dónde:

Cf% = Carbono fijo de la madera tostada y carbón en porcentaje.

H% = Humedad de la madera tostada y/o carbón en porcentaje.

MV% = Materia volátil de la madera tostada y/o carbón en porcentaje.

Cz% = Cenizas de la madera tostada y/o carbón en porcentaje

f) Poder calorífico de la madera tostada y carbón

El poder calorífico superior fue calculado indirectamente a través de los resultados del análisis químico inmediato, aplicando la fórmula de Gouthal mencionado por (Guimaraes *et al.* 1982)

$$PCs = (82C + AV) \text{ Kcal/kg}$$

Donde:

PCs = Poder calorífico superior, kcal/kg

C = Contenido de carbono fijo, en porcentaje

V = Contenido de materias volátiles, en porcentaje

A = Coeficiente dado por la relación $V/V+C$

8.4 Técnica de presentación de resultados

Los resultados son presentados en cuadros de doble entrada y en figuras, los cuales permiten interpretar los ensayos y elaborar la discusión y las conclusiones correspondientes.

IX. RESULTADOS

9.1 Rendimiento bio-combustible madera tostada y carbón de plantaciones *V. lomatophyla*.

En el cuadro 3 y en la figura 1, se presentan los resultados de los rendimientos bio-combustible de madera tostada y carbón de plantaciones *V. lomatophyla* N° 64, 3 y 15 de 17 años, 25 años y 36 años respectivamente, ubicadas en las instalaciones del CIEFOR-Puerto Almendras, según la figura 5 del Anexo.

Los resultados referente a la variable Edad, se ha determinado el mayor rendimiento en bio-combustible en madera tostada fue en la plantación de *V. lomatophyla* Standl "quillosa" de 36 años con 75,14% seguido de la plantación de 25 años con 73,30% y de 17 años con 65,07%. Mientras que en carbón fue de 34,46%, 33,11% y 29,98% respectivamente.

En el cuadro 4 el análisis de varianza presenta la significancia a una probabilidad de 0,05 solamente en la variable Bio-combustible. Sin embargo, al realizar la prueba de Duncan que se presenta en el cuadro 5 muestra diferencia significativa solamente entre las edades de 25 años y 17 años en carbón para la interacción Edad- Bio-combustible.

Cuadro 3. Rendimiento bio-combustible madera tostada y carbón de plantaciones de *V. lomatophylla*

A. Edades	B. Bio-combustibles		Total
	Madera tostada (%)	Carbón (%)	
<i>V. lomatophylla</i> 17 años	65,20	30,42	
	65,10	30,20	
	64,92	29,32	
Total	195,22	89,94	285,16
Promedio	65,07	29,98	
<i>V. lomatophylla</i> 25 años	73,23	33,42	
	73,50	33,10	
	73,18	32,80	
Total	219,91	99,32	319,23
Promedio	73,30	33,11	
<i>V. lomatophylla</i> 36 años	74,89	34,17	
	74,63	34,11	
	75,89	35,10	
Total	225,41	103,38	328,79
Promedio	75,14	34,46	
Total general	640,54	292,64	933,18
Promedio general	71,17	32,52	

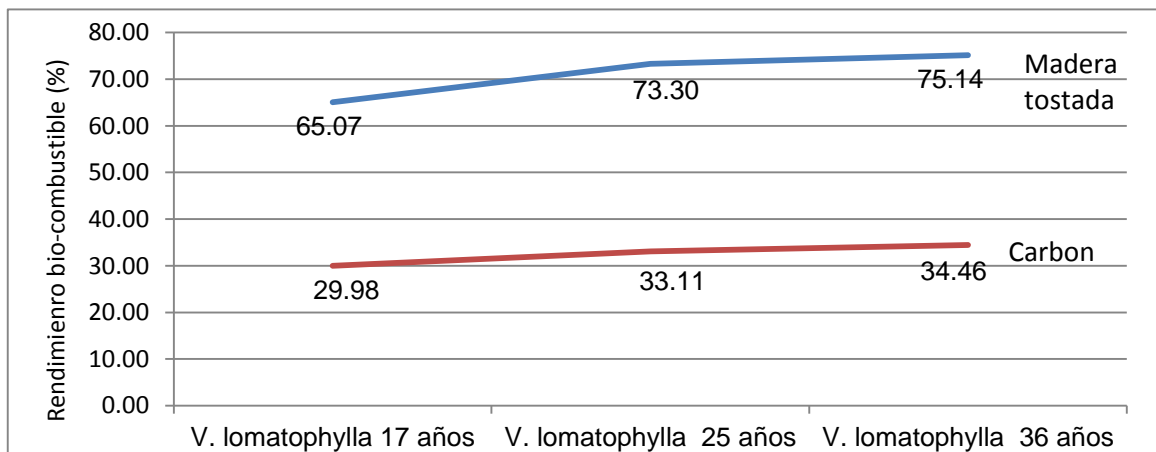


Figura 1. Rendimiento bio-combustible de plantaciones *V. lomatophylla*

Cuadro 4. Análisis de varianza de rendimiento de bio-combustibles

F.V	G.L	S.C	C.M	F.C	F _{t0,05}
Tratamientos	5	6928,177	1385,635	2,963	3,11*
Edades (A)	2	175,319	87,659	0,187	3,89*
Bio-combustibles (B)	1	6724,134	6724,134	14,381	4,75**
Interacción (A - B)	2	28,724	14,362	0,031	3,11*
Error	12	5610,983	467,582		
Total	17	12539,159			

*No significativo

** Significativo

Cuadro 5. Prueba de Duncan del rendimiento interacción Edad – Bio-combustible de *V. lomatophylla*

Orden	Edades	Bio-combustibles	Rendimiento (%)	Significancia
1	36 años	Madera tostada	75,14	
2	25 años	Madera tostada	73,30	
3	17 años	Madera tostada	65,07	
4	36 años	Carbón	34,46	
5	25 años	Carbón	33,11	
6	17 años	Carbón	29,98	

Cuadro 6. Amplitud de límites estandarizados de Duncan para rendimientos de la interacción Edad-bio-combustibles

Valores de P	2	3	4	5	6
AES (D)	3,08	3,23	3,33	3,36	3,40
Sx=12.484					
ALS (D)	38,45	40,32	41,57	41,95	42,45

9.2 Capacidad de carbono fijo en el producto bio-combustible de la madera tostada y carbón de plantaciones *V. lomatophyla*.

En el cuadro 7 y en la figura 2, se presentan los resultados del carbono fijo del producto bio-combustibles madera tostada y carbón de las plantaciones N° 64, 3 y 15 de 17 años, 25 años y 36 años respectivamente según la figura 6 del Anexo.

Los resultados referente a la variable Edad, se ha determinado el mayor porcentaje de carbono fijo para *V. lomatophyla* de 36 años con 72,01 % seguido de *V. lomatophyla* de 25 años con 71,13 % y *V. lomatophyla* de 17 años con 66,94 %.

Con respecto a la variable Bio-combustible: madera tostada y carbón, existe un alto porcentaje promedio de carbono fijo en carbón con 80,19 % seguido de madera tostada con 59,86 %.

En el cuadro 8 el análisis de varianza presenta significancia a una probabilidad de 0,05 solamente en la variable Bio-combustible: madera tostada y carbón. Sin embargo, al realizar la Prueba de Duncan para la interacción Edad- Bio-combustible en el cuadro 9 y su Amplitud de límites estandarizados de Duncan cuadro 10, no presenta significancia.

Cuadro 7. Carbono fijo del producto bio-combustible madera tostada y carbón de plantaciones de *V. lomatophylla*

A. Edad	B. Bio-combustibles		Total general
	Madera tostada (%)	Carbón (%)	
<i>V. lomatophylla</i> 17 años	55,75	78,80	
	54,39	78,81	
	55,15	78,71	
Total	165,29	236,32	401,61
Promedio	55,10	78,77	
<i>V. lomatophylla</i> 25 años	62,14	80,28	
	62,28	80,27	
	61,74	80,05	
Total	186,16	240,60	426,76
Promedio	62,05	80,20	
<i>V. lomatophylla</i> 36 años	62,45	81,57	
	62,38	81,65	
	62,45	81,56	
Total	187,28	244,78	432,06
Promedio	62,43	81,59	
Total general	538,73	721,70	1260,43
Promedio general	59,86	80,19	

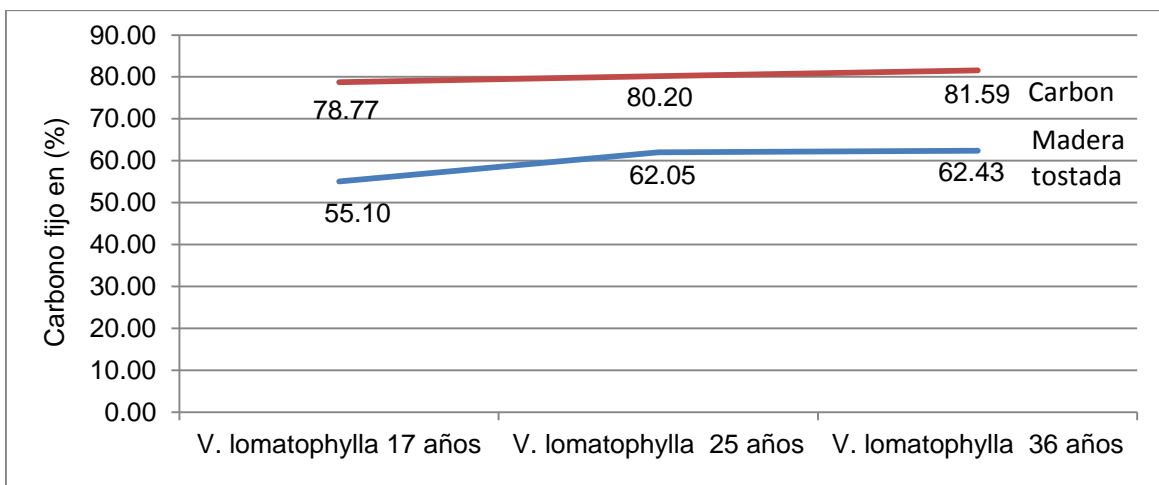


Figura 2. Carbono fijo de bio-combustible de plantaciones *V. lomatophylla*

Cuadro 8. Análisis de varianza del carbono fijo de bio-combustibles

F.V	G.L	S.C	C.M	F.C	Ft _{0.05}
Tratamientos	5	1974,022	394,804	1,214	3,11*
Edades (A)	2	88,228	44,114	0,136	3,89*
Bio-combustibles (B)	1	1859,809	1859,809	5,721	4,75**
Interacción (A - B)	2	25,985	12,993	0,040	3,11*
Error	12	3901,136	325,095		
Total	17	5875,158			

*No significativo

**Significativo

Cuadro 9. Prueba de Duncan del carbono fijo interacción Edad – Bio-combustible de *V. lomatophylla*

Orden	Edades	Bio-combustibles	Carbono fijo (%)	Significancia
1	36 años	Carbón	81,59	
2	25 años	Carbón	80,20	
3	17 años	Carbón	78,77	
4	36 años	Madera tostada	62,43	
5	25 años	Madera tostada	62,05	
6	17 años	Madera tostada	55,10	

Cuadro 10. Amplitud de límites estandarizados de Duncan para carbono fijo interacción Edad-bio-combustibles

Valores de P	2	3	4	5	6
AES (D)	3,08	3,23	3,33	3,36	3,40
Sx= 10,410					
ALS (D)	32,06	33,62	34,66	34,98	35,39

9.3 Poder calorífico del producto bio-combustible de la madera tostada y carbón de plantaciones *V. lomatophyla*.

En el cuadro 11 y en la figura 3, se presentan los resultados del poder calorífico del producto bio-combustibles madera tostada y carbón de las plantaciones N° 64, 3 y 15 de 17 años, 25 años y 36 años respectivamente según la figura 5 del Anexo.

Los resultados referente a la variable Edad, se ha determinado el mayor poder calorífico para *V. lomatophyla* de 36 años con 7542,24 kcal/kg seguido de *V. lomatophyla* de 25 años con 7521,95 kcal/kg y *V. lomatophyla* de 17 años con 7436,75 kcal/kg.

Con respecto a la variable Bio-combustible, existe alto poder calorífico promedio en carbón con 8505,75 kcal/kg seguido de madera tostada con 6578,72 kcal/kg.

En el cuadro 12 el análisis de varianza no presenta significancia a una probabilidad de 0,05 en todas las fuentes de variabilidad. Esto es confirmado al realizar la Prueba de Duncan para la interacción Edad- Bio-combustible en el cuadro 13 y su Amplitud de límites estandarizados de Duncan cuadro 14, no presenta significancia estadísticamente.

Cuadro 11. Poder calorífico de la madera tostada y carbón de plantaciones de *V. lomatophylla*

Factor A. Edades	Factor B. Bio-combustibles		Total general
	madera tostada (kcal/kg)	Carbón (kcal/kg)	
<i>V. lomatophylla</i> 17 años	6463,75	8433,88	
	6415,23	8433,62	
	6442,00	8432,02	
Total Promedio	19320,98 6440,33	25299,52 8433,17	44620,50
<i>V. lomatophylla</i> 25 años	6549,48	8497,96	
	6555,76	8496,14	
	6532,28	8500,10	
Total Promedio	19637,52 6545,84	25494,20 8498,07	45131,72
<i>V. lomatophylla</i> 36 años	6747,65	8596,94	
	6756,01	8559,20	
	6746,30	8601,92	
Total Promedio	20249,96 6749,99	25758,06 8586,02	46008,02
Total general Promedio general	59208,46 6578,72	76551,78 8505,75	135760,24

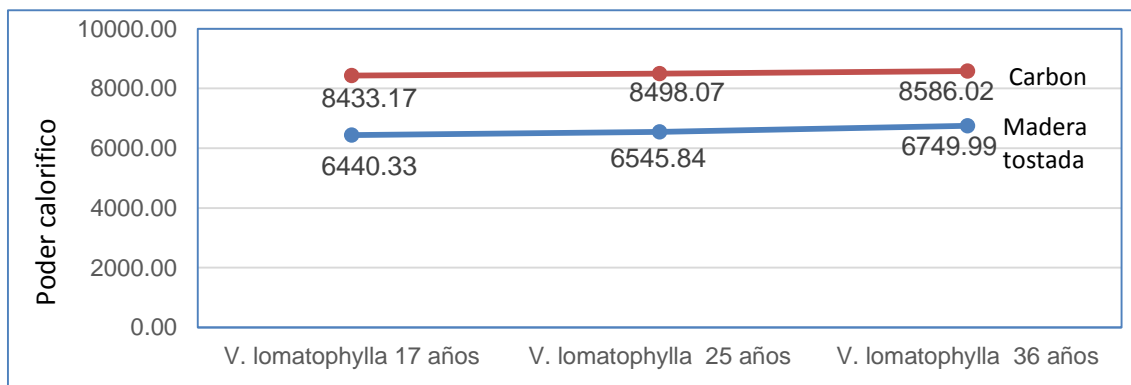


Figura 3. Poder calorífico de madera tostada y carbón de *V. lomatophylla*

Cuadro 12. Análisis de varianza del poder calorífico de bio-combustibles

F.V	G.L	S.C	C.M	F.C	F _{t0.05}
Tratam	5	16894607,59	3378921,52	0,890	3,11*
Edades (A)	2	164136,13	82068,06	0,022	3,89*
Bio-combustibles (B)	1	16710601,00	16710601,00	4,404	4,75*
Interaccion (A - B)	2	19870,47	9935,23	0,003	3,11*
Error	12	45533413,91	3794451,16		
Total	17	62428021,50			

*No significativo

**Significativo

Cuadro 13. Prueba de Duncan del poder calorífico interacción Edad – Bio-combustible de *V. lomatophylla*

Orden	Edades	Bio-combustibles	Poder calorífico (kcal/kg)	Significancia
1	36 años	Carbón	8586,02	
2	25 años	Carbón	8498,07	
3	17 años	Carbón	8433,17	
4	36 años	Madera tostada	6749,99	
5	25 años	Madera tostada	6545,84	
6	17 años	Madera tostada	6440,33	

Cuadro 14. Amplitud de límites estandarizados de Duncan para poder calorífico interacción Edad-bio-combustibles

Valores de P	2	3	4	5	6
AES (D)	3,08	3,23	3,33	3,36	3,40
Sx= 1124,641					
ALS (D)	3463,89	3632,59	3745,05	3778,79	3823,78

X. DISCUSION

Referente a los rendimientos de los bio-combustibles la edad de 17 años, 25 años y 36 años de la plantación de *V. lomatophyla* es la que influencia para tener un mayor o menor rendimiento en madera tostada o carbón; es decir, a mayor edad de la plantación mayor es el rendimiento bio-combustible, para esta investigación 36 años, 25 años y 17 años con rendimientos de 54,80%, 53,21% y 47,53% respectivamente, se aprecia en el cuadro 3. Estos resultados se deben cuando las plantaciones tienen mayor edad la madera está compuesto de mayor lignificación en las paredes celulares por lo tanto, tendrán mayor densidad como mencionan (Rodríguez y Cabudivo 2004). Referente a la madera tostada se tuvo mayor rendimiento (71,17%) con respecto al carbón (32,52%), este resultado se debe principalmente porque la madera tostada es obtenida a temperatura máxima de 280°C la madera no se destruye solamente se degrada la hemicelulosa y es evaporado el agua libre, agua higroscópica con liberación de grandes cantidades de CO₂, ácido acético con algunos fenoles Tito *et al.* (2011), quedando como producto final la madera tostada, guardando una buena consistencia Doat (1985), Lo que no ocurre con el carbón, que es obtenida a mayor temperatura 300°C los componentes de la madera hemicelulosa, celulosa y parte de la lignina se destruye obteniendo como residuo el carbón, por lo tanto menor peso y menor rendimiento. De acuerdo al análisis de varianza solamente en la variable Bio-combustible: madera tostada y carbón existe significancia; sin embargo al realizar las comparaciones mediante la prueba de Duncan, solamente es significativo el rendimiento del carbón obtenido de madera de 25 años y 17 años, se aprecia en el cuadro 4 y 5.

Referente a la densidad del producto bio-combustible, es interesante mencionar que la madera de mayor edad es la que tiene mayor densidad tanto en madera tostada como en carbón; es una característica muy importante de este bio-combustible porque a mayor densidad concentrara mayor carbono fijo y generara mayor poder calorífico (Rodríguez y Cabudivo 2004; Donayre y Cabudivo 2015). Realizando el análisis de varianza al 0,05 de probabilidad toda la fuente variabilidad es no significativo cuadro 4, al realizar las comparaciones entre las variables mediante la prueba de Duncan solamente es significativo el biocombustible de 17 años en carbón cuadro 5; porque el carbón obtenido de la madera de menor edad es la que tiene mayor porosidad en su estructura porque al ser sometido a alta temperatura los componentes que está constituido la madera fácilmente se han transformado en líquidos piroleñosos lo tanto, menor tienen menor peso.

Con respecto al carbono fijo los resultados obtenidos presentan mayor carbono fijo en plantaciones de mayor edad, sean en carbón o en madera tostada. Se deben principalmente por tener mayor porcentaje de lignificación en las paredes celulares. Sin embargo, cuando se realiza las comparaciones entre tratamientos mediante la prueba de Duncan, el resultado no son significativo estadísticamente cuadro 9.

Con referencia al poder calorífico, el mayor poder calorífico presenta el carbón en todas las edades seguido de la madera tostada cuadros 7 y 9, esto se debe fundamentalmente porque el carbón tiene menos porcentaje de materia volátil y alto porcentaje de carbono fijo cuadro 9. Sin embargo, al realizar las comparaciones entre los tratamientos mediante la prueba de Duncan al 0,05 de probabilidad muestran que no es significativo, es decir, los resultados obtenidos es indiferente entre el carbón de 8586.02 kcal/kg de poder calorífico como también la madera tostada de 6440,33 kcal/kg.

XI. CONCLUSIONES

1. El mayor rendimiento en bio-combustible en madera tostada fue en la plantación de *V. lomatophyla* Standl “quillosa” de 36 años con 75,14% seguido de la plantación de 25 años con 73,30% y de 17 años con 65,07%. Mientras que en carbón fue de 34,46%, 33,11% y 29,98% respectivamente.
2. El mayor porcentaje de carbono fijo en bio-combustibles en madera tostada para *V. lomatophyla* Standl “quillosa” de 36 años tiene 62,43% seguido de la plantación de 25 años con 62,05% y de 17 años con 55,10%. Mientras que existe un alto porcentaje de carbono fijo en carbón con 81,59%; 80,20% y 78,77% respectivamente.
3. El mayor poder calorífico se ha determinado en *V. lomatophyla* Standl “quillosa” de 36 años con 6749,99 kcal/kg seguido de la plantación de 25 años con 6545,84 kcal/kg y de 17 años con 6440,33 kcal/kg. Mientras que en carbón, existe alto poder calorífico promedio con 8586,02 kcal/kg; 8498,07 kcal/kg; y 8433,17 kcal/kg respectivamente.
4. De acuerdo al análisis estadístico se rechaza la hipótesis nula y acepta la hipótesis alterna, existiendo diferencia significativa en el rendimiento bio-combustible de la madera tostada con respecto al carbón de *V. lomatophylla* Standl “quillosa” de 17 años, 25 años y 36 años Puerto Almendra, Iquitos-Perú.

XII. RECOMENDACIONES

1. Utilizar madera tostada de *V. lomatophylla* de 36 años, 25 años y 17 años por poseer altos rendimiento porcentual, densidad, porcentaje de carbono fijo y poder calorífico con respecto al producto de carbón.
2. Es necesario hacer ensayos a nivel semiindustrial y/o industrial con estas maderas para conocer su rendimiento y su producción.
3. A los concesionarios forestales, realizar la transformación en bio-combustibles la especie *V. lomatophylla* de 36 años, 25 años y 17 años, en madera tostada y/o carbón de los residuos de extracción.
4. Realizar transferencia de tecnología en las comunidades con la finalidad de que la población use como combustible el producto madera tostada.

XIII. BIBLIOGRAFIA

- ARCATE, J. 2000. New process for torrefied wood manufacturing. *Bioenergy update*. No. 4, vol, 2, April 2000.
(<http://www.techtp.com/Bioenergy%20Update%20.pdf>).
- ASOCIACION BRASILEIRA DE NORMAS TECNICAS/ABNT. 1985. Carbón vegetal. Análisis inmediato. Método de ensayo N° NBR 8112. Sistema de Metrología Normalización y Calidad Industrial. Rio de Janeiro. 6 pág.
- BATTACHARYA, S., JUNGTIYNONT, S.; SANTIBUPPAKUL, P. AND SINGAMSETTI, V. 1995. Some aspects of screw press briquetting. *Int. Workshop on Biomass Briquetting*, New Dehli, 3-5 April, RUYTER, H. P. «Coalification model», *Fuel* 61.
- BOURGEOIS, J. AND DOAT J. 1985. Torrefied wood from temperate and tropical species: Advantages and prospects. *Bioenergy 84*. Proceedings of an Int. Conf. on bionergy in Göteborg, Vol.3, 1985. pp.153-159, Elsevier Applied Science Publishers.
- BRIANE D; et DOAT J. 1985. Guide Technique de LaCarbonisation. La Fabrication du Charbon de Bois. AgenceFrancaise Pour La Maitrise de Energia. Association Bois de Fuecentre TechniqueForestier Tropical. France. 180 pág.
- CABUDIVO, A.; VALDERRAMA H.; PANDURO R.; ESPIRITU J.; ÂNGULO P.; VÁSQUEZ C.; MEDER B.; ARELLANO J.; MORI W.; ESCOBAR J. 2011. Turno tecnológico de aprovechamiento de la madera de *Simarouba amara* “marupa” y *Cedrelinga cateniformis* “tornillo” de diferentes edades en Puerto Almendra, Iquitos-Perú. Proyecto de Investigación. UNAP. Iquitos. 30 pág.

- CABUDIVO A.1990. Rendimiento y Análisis Químico Inmediato del carbón de Tres Especies Forestales Tropicales de la zona de Genaro Herrera. UNAP. Facultad de Ingeniería Forestal. Tesis para optar el título de Ingeniero Forestal. Iquitos. 67 pág.
- CORDERO T.; MÁRQUEZ F.; RODRÍGUEZ-MIRASOL J.; RODRÍGUEZ J. 2001. Predicting heating values of lignocellulosics and carbonaceous materials from proximate análisis. *Fuel* 80 (11): 1567-1571.
- DOAT, J. 1985. Un Nouveau Produit Energetique pour les Pays en Developpement le Bois Torrefie. En Revue boiset Forests des Tropiques N° 8, 2° trimestre. 1985.
- DONAYRE G. y CABUDIVO A. 2015. Rendimiento energético de la madera tostada y carbón de tres especies forestales del arboretum “El huayo” Puerto Almendra, Iquitos-Perú. UNAP. Facultad de Ciencias Forestales. Artículo científico. Iquitos-Perú. 54 pág.
- EARL, D. 1975. Forest energy and economic development. Oxford. Claredon Press. 128 pág.
- ESPIRITU J.; REATEGUI R.; ANGULO P.; MACEDO L. y DONAYRE M. 2015. Valoración económica del secuestro de CO₂ y su stock de carbono en las plantaciones del CIEFOR- Pto. Almendra, Iquitos-Perú. Oficina General de Investigación-UNAP. Artículo Científico. Iquitos. 16 pág.
- FAO. 1983. Métodos Simples para Fabricar Carbón Vegetal. Subdirección de Productos de la Industria Mecánica de la Madera. Dirección de Industrias Forestales. Departamento de Montes. Roma. 154 pag.
- GARCÍA-ROJAS L.; MÁRQUEZ-MONTESINO F.; AGUIAR-TRUJILLO L.; ARAUSO-PÉREZ J.; CARBALLO-ABREU L.; OREA IGARZA U.; ZANZI R.

2009. Rendimiento de los productos de la descomposición térmica de la madera de *Eucalyptus salignas* Smith a diferentes alturas del fuste comercial. *Revista Chapingo Serie Ciencias Forestales y del Ambiente* 15(2): 147-154.
- GIRARD P. AND SHAH N. 1991. «Developments on Torrefied Wood an Alternative to Charcoal», from REUR Technical Series No. 20, Charcoal Production and Pyrolysis Technologies, pp.101-114, publ. by the Food and Agriculture Organization of the United Nations.
- GOLDSTEIN L. 1981. Procesos termoquímicos. Combustión–Pirolisis - Gasificación. *Productos Forestales* 31 (10):63.
- GONZALES H. 2008. La madera como fuente de energía en el Perú. Universidad Nacional Agraria La Molina. Diapositivas. Lima. 28.
- GUIMARAES M; AGUINELIO P. y BATISTA J. 1982. Propriedades Controle de qualidade do Carvao vegetal. Fundacao Centro Tecnologico de Minas Gerais/ CETEC.SPT/008. Pags 75-90. Belo Horizonte.
- HALL D.; ROBILLO-CALLE F.; GROOT P. 1992. Lessons from case studies in developing countries. *Energy policy*. 62 pág.
- INSTITUTO NACIONAL DE ECOLOGIA-INE. 2007. Glosario ecológico. Instituto Nacional de Ecología. Andalucía. 132 pág.
- MARTINS H. 1980. Madeira como fonte de energia. En: *Uso da madeira para fins energéticos*. Fundacao Centro Tecnologico de Minas Gerais/CETEC. Belo horizonte. Serie de Publicacoes Tecnicas. Pp. 9-26.
- PRINCE J. y WAAGE S. 2007. Negociando por los servicios de la naturaleza. *Forest Trends*. The Katoomba group. Ecosystem Marketplace. Traducción al español Octubre 2007. Lima. 61 pág.

- REMIGIO D. 1983. Rendimiento y calidad de carbón y análisis del líquido piroleñoso de cuatro maderas del Perú. Tesis Ingeniero Forestal. Universidad Nacional Agraria La Molina. Facultad de Ciencias Forestales. Lima. 78 pág.
- RIVERA P. 1987. Estudio de las características físico-química de la madera y el carbón de once especies tropicales de Madre de Dios. Tesis Ingeniero Forestal. Universidad Nacional Agraria La Molina. Facultad de Ciencias Forestales. Lima. 94 pág.
- RODRIGUEZ C. y CABUDIVO A. 2004. Evaluación de las características Físico-químico y Energética de leña seca al aire, leña tostada y carbón de residuos de aserrío de tres especies forestales en Puerto Almendra. UNAP. Facultad de Ingeniería Forestal. Artículo Científico. Iquitos. 15 pág.
- TARANCO M; CABUDIVO A; y DA CUNHA M. 1991. Alternativas energéticas de veintiocho especies forestales de la amazonia peruano-brasileño. Serie técnica N° 2. Editado por la Red Nacional de Información Forestal. Lima-Perú. 46 pág.
- TITO D.; GONZALEZ L.; BEATON P.; ZANZI, R. 2011. Torrefacción de residuos agrícolas y forestales. Centro Nacional de Electromagnetismo Aplicado. Universidad de Oriente. Universidad de Barcelona. Department of Chemical Engineering and Technology, Chemical Reaction Engineering. Royal Institute de Technology Stockholm. Sweden. 10 pág.

A N E X O

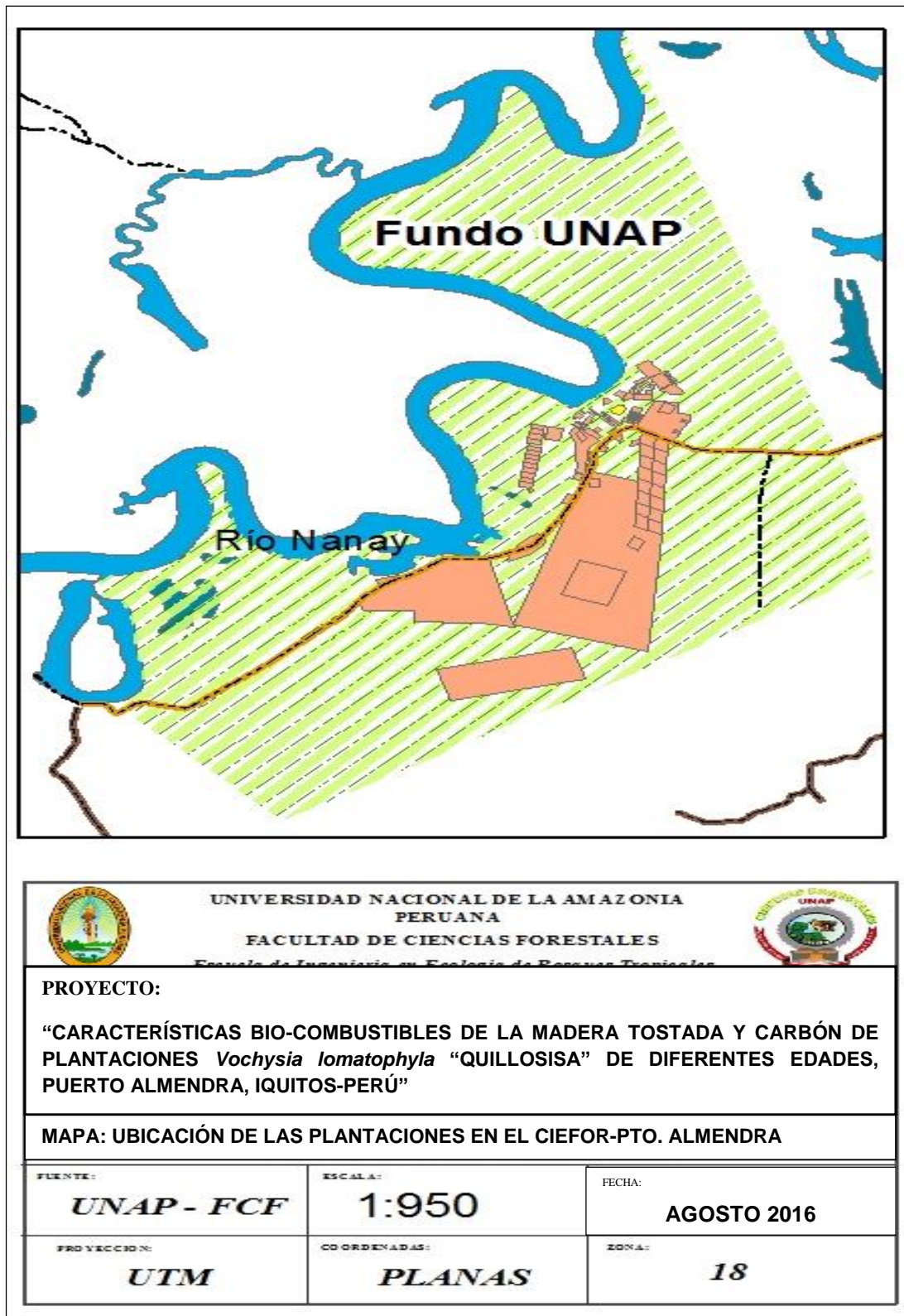


Figura 4: Mapa de ubicación del CIEFOR-Puerto Almendra

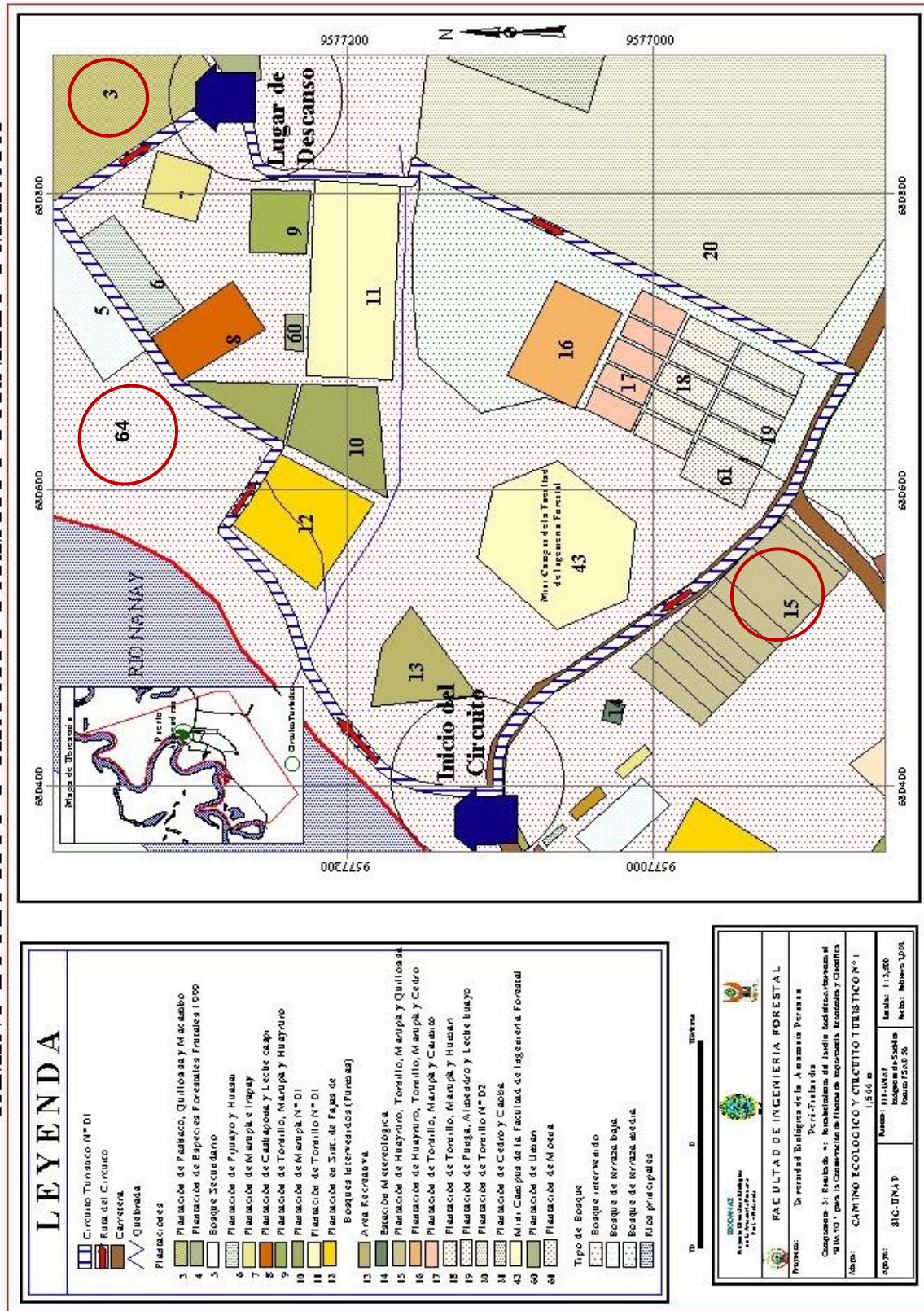


Figura 5: Ubicación de las plantaciones números 3, 15 y 64 de quillosa

Cuadro 15. Calculo del rendimiento de bio-combustibles de plantaciones de *V. lomatophylla*

Plantación	Edad plantación (años)	Densidad básica madera (Kg/m ³)	madera		Rendimiento (m. tostada) (%)	Densidad (m. tostada) (Kg/m ³)	madera		Rendimiento (carbón)	Densidad carbón (Kg/m ³)
			inicial g.	tostada g.			inicial (g.)	carbón (g.)		
<i>V. lomatophylla</i>	17	400	1,00	0,6520	65,20	295	1,00	0,3042	30,42	190
		400	1,00	0,6510	65,10	295	1,00	0,3020	30,20	190
		400	1,00	0,6492	64,92	294	1,00	0,2932	29,32	189
Total Promedio					195,22 65,07	884 295			89,94 29,98	
<i>V. lomatophylla</i>	25	440	1,00	0,7323	73,23	320	1,00	0,3342	33,42	240
		440	1,00	0,7350	73,50	322	1,00	0,3310	33,10	240
		440	1,00	0,7318	73,18	320	1,00	0,3280	32,80	239
Total Promedio					219,91 73,30	962 321			99,32 33,11	
<i>V. lomatophylla</i>	36	449	1,00	0,7489	74,89	439	1,00	0,3417	34,17	249
		449	1,00	0,7463	74,63	438	1,00	0,3411	34,11	249
		449	1,00	0,7589	75,89	442	1,00	0,3510	35,10	250
Total Promedio					225,41 75,14	1319 440			103,38 34,46	

Cuadro 16. Calculo del carbono fijo de bio-combustibles de plantaciones de *V. lomatophylla*

Plantación	Edad plantación (años)	Densidad básica madera (Kg/m ³)	Madera tostada				Carbón			
			Humedad (%)	Materia volátil (%)	Ceniza (%)	Carbono fijo (%)	Humedad (%)	Materia volátil (%)	Ceniza (%)	Carbono fijo (%)
<i>V. lomatophylla</i>	17	400	1,25	42,05	0,95	55,75	2,35	17,90	0,91	78,84
		400	1,25	43,45	0,91	54,39	2,36	17,92	0,91	78,81
		400	1,24	42,66	0,95	55,15	2,36	17,98	0,95	78,71
Total Promedio			3,74	128,16	2,81	165,29	7,07	53,80	2,81	236,36
			1,25	42,72	0,94	55,10	2,36	17,93	0,94	78,77
<i>V. lomatophylla</i>	25	440	0,50	36,35	1,01	62,14	1,31	17,60	1,01	80,08
		440	0,48	36,22	1,02	62,28	1,31	17,40	1,02	80,27
		440	0,51	36,74	1,01	61,74	1,34	17,60	1,01	80,05
Total Promedio			1,49	109,31	3,04	186,16	3,96	52,60	3,04	240,40
			0,50	36,44	1,01	62,05	1,32	17,53	1,01	80,13
<i>V. lomatophylla</i>	36	449	0,25	36,15	1,15	62,45	0,83	16,45	1,15	81,57
		449	0,04	36,46	1,12	62,38	0,88	16,35	1,12	81,65
		449	0,28	36,12	1,15	62,45	0,79	16,50	1,15	81,56
Total Promedio			0,57	108,73	3,42	187,28	2,50	49,30	3,42	244,78
			0,19	36,24	1,14	62,43	0,83	16,43	1,14	81,59

Cuadro 17. Calculo de poder calorífico de bio-combustibles de plantaciones de *V. lomatophylla*

Plantación	Ensayos	madera tostada					Carbón				
		Carbono fijo (C) (%)	Materia volátil (V) (%)	V/V+C	Valor de (A)	Poder calorífico (kcal/kg)	Carbono fijo (C) (%)	Materia volátil (V) (%)	V/V+C	Valor de (A)	Poder calorífico (kcal/kg)
<i>V. lomatophylla</i> 17 años	1	55,75	42,05	0,43	45	6463,75	78,84	17,90	0,19	110	8433,88
	2	54,39	43,45	0,44	45	6415,23	78,81	17,92	0,19	110	8433,62
	3	55,15	42,66	0,44	45	6442,00	78,71	17,98	0,19	110	8432,02
Total Promedio						19320,98 6440,33					25299,52 8433,17
<i>V. lomatophylla</i> 25 años	1	62,14	36,35	0,37	40	6549,48	80,08	17,40	0,18	111	8497,96
	2	62,28	36,22	0,37	40	6555,76	80,27	17,40	0,18	110	8496,14
	3	61,74	36,74	0,37	40	6532,28	80,05	17,60	0,18	110	8500,10
Total Promedio						19637,52 6545,84					25494,20 8498,07
<i>V. lomatophylla</i> 36 años	1	62,45	36,15	0,37	45	6747,65	81,57	16,45	0,17	116	8596,94
	2	62,38	36,46	0,37	45	6756,01	81,65	16,35	0,17	114	8559,20
	3	62,45	36,12	0,37	45	6746,30	81,56	16,50	0,17	116	8601,92
Total Promedio						20249,96 6749,99					25758,06 8586,02

ANÁLISIS INMEDIATO

Norma de la Asociación Brasileira de Normas Técnicas (ABNT 1985).

Humedad (H)

En un crisol previamente seco sin tapa se pesa 1 gramo de muestra, luego colocarlo en una estufa previamente calentado a 105+/- 2 °C, se dejará por dos horas hasta peso constante, se retira las muestras de la estufa, se enfría en un desecador y se determina el peso final (ABNT, 1985). La humedad se calculará de acuerdo con la siguiente expresión:

$$H\% = \frac{A - B}{A - C} \times 100$$

Donde:

A : Crisol + masa de la muestra original, en g.

B : crisol + masa seca, en g.

C : crisol vacío, en g.

Materia volátil (MV)

En un crisol con tapa previamente seca se pesa 1 gramo de muestra exento de humedad, se coloca sobre la puerta de la mufla previamente calentada a 900 +/-10°C permaneciendo en esa posición durante 3 minutos luego se introduce al interior de la mufla y se deja en esa posición por 7 minutos con la puerta cerrada, se retira la muestra, se enfría en un desecador y se pesa la masa final (ABNT, 1985).

La materia volátil se determina según la siguiente expresión:

$$MV\% = \frac{100 (B - F) - H (B - G)}{(B - G)}$$

Donde:

B: Masa del crisol + muestra original, en g.

F: Masa del crisol + muestra después de tratada, en g.

G: Masa del crisol vacío, en g.

H: Humedad, en porcentaje.

Ceniza (C)

En un crisol sin tapa previamente seco se pesa 1 gramo de muestra exento de humedad, se coloca en una mufla previamente calentada a $700 \pm 10^\circ\text{C}$. Se deja el crisol en la mufla hasta que la muestra se quemé completamente. Luego se retira y se enfría en un desecador, se pesa la masa final (ABNT, 1985). El contenido de cenizas se calcula según la siguiente expresión:

$$C\% = \frac{F - G}{B - G} \times 100$$

Donde:

F: masa del crisol + cenizas

G: masa del crisol vacío

B: masa del crisol + muestra original

Carbono Fijo (Cf)

El contenido de carbono fijo se calcula según la siguiente expresión:

$$Cf\% = 100 - (H\% - Mv\% - Cz\%)$$

Actividades de extracción de madera rolliza



Foto 1. Muestras de madera



Foto 2. Tamaño de muestras



Foto 3. Pesado de muestra



Foto 4. Mufla a 20°C



Foto 5. Mufla a 260°C



Foto 6. Mufla a 290°C



Foto 7. Ambiente de la mufla



Foto 8. Crisol + muestra



Foto 9. Molido de muestra



Foto 10. Muestra molida



Foto 11. Muestra carbón



Foto 12. Muestra tostada



Foto 13. Mostrando el laboratorio



Foto 14. Materiales usados en los ensayos



Foto 15. Pesando muestras obtenidas



Foto 16. Mufla eléctrica usada en ensayos



Foto 17. Extrayendo muestras de la mufla



Foto 18. Midiendo el volumen de la muestra