

**Madre de Dios Capital de la Biodiversidad**  
**UNIVERSIDAD NACIONAL AMAZÓNICA DE MADRE DE DIOS**  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
ESCUELA ACADÉMICO PROFESIONAL DE INGENIERÍA FORESTAL Y  
MEDIO  
AMBIENTE



**TÍTULO**

“EVALUACIÓN DEL RENDIMIENTO Y CALIDAD DEL CARBÓN VEGETAL, A PARTIR DE RESIDUOS DE LA ESPECIE *Dypterix odorata* (Aublet) Willd (SHIHUAHUACO), PRODUCIDOS EN HORNO ARTESANAL DE ASERRÍN TIPO HORIZONTAL, TAMBOPATA-MADRE DE DIOS”

TESIS PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL DE INGENIERO FORESTAL Y MEDIO AMBIENTE

**TESISTAS**

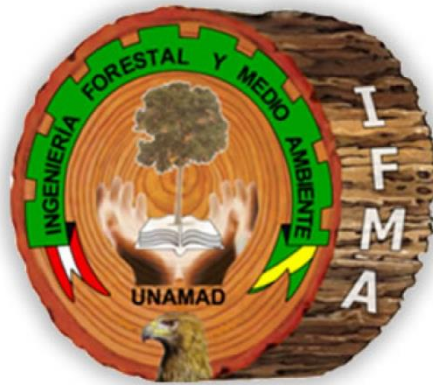
Bach. Yaneth Luisa Chañi Paucar

Bach. Jair Rengifo Rodríguez.

PUERTO MALDONADO-PERÚ

2017

**Madre de Dios Capital de la Biodiversidad**  
**UNIVERSIDAD NACIONAL AMAZÓNICA DE MADRE DE DIOS**  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
ESCUELA ACADÉMICO PROFESIONAL DE INGENIERÍA FORESTAL Y  
MEDIO  
AMBIENTE



**TÍTULO**

“EVALUACIÓN DEL RENDIMIENTO Y CALIDAD DEL CARBÓN VEGETAL, A PARTIR DE RESIDUOS DE LA ESPECIE *Dypterix odorata* (Aublet) Willd (SHIHUAHUACO), PRODUCIDOS EN HORNO ARTESANAL DE ASERRÍN TIPO HORIZONTAL, TAMBOPATA-MADRE DE DIOS”

TESIS PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL DE INGENIERO FORESTAL Y MEDIO AMBIENTE

**TESISTAS**

Bach. Yaneth Luisa Chañi Paucar

Bach. Jair Rengifo Rodríguez.

PUERTO MALDONADO- PERÚ

2017

## **DEDICATORIA**

*A Dios, por guiarnos en la vida, cuidarnos y perdonarnos nuestras debilidades y porque siempre está presente en cada instante de nuestra vida.*

*A nuestros padres, por todo el apoyo incondicional brindado y mostrado en todo momento, nos dieron ánimos en los tiempos difíciles y en los tropiezos nunca perdieron la fe en nosotros ayudándonos a seguir nuestro camino y lograr nuestras metas, contribuyendo en nuestra formación personal y profesional.*

*A mis hermanos, amigos y a nuestros compañeros por el apoyo brindado, por sus consejos e incondicional amistad.*

*Yaneth Luisa Chañi Paucar y Jair Rengifo Rodríguez*

## **AGRADECIMIENTOS**

*Nuestro más profundo agradecimiento a las personas e instituciones que contribuyeron significativamente al desarrollo de la presente investigación, a los cuales queremos expresar nuestra gratitud.*

*A la Universidad Nacional Amazónica de Madre de Dios, "UNAMAD", Facultad de Ingeniería por la formación académica profesional durante los años de estudios.*

*De manera especial y sincera a nuestro Asesor el Dr. Emer Ronald Rosales Solórzano y Coasesora MSc. Liset Rodríguez Achata, por sus valiosas sugerencias, paciencia y disposición de tiempo para ayudarnos, siendo un apoyo incondicional para que la investigación pueda realizarse.*

*Al Ing. Saúl Manrique León, por la revisión y por sus acertados comentarios, observaciones y sugerencias.*

*A la MSc. Liset Rodríguez Achata por las facilidades otorgadas para hacer uso del Laboratorio Ambiental Regional y facilitarnos los equipos que fueron indispensables para la culminación de la Tesis desarrollada.*

*Al Bach. Dante Félix Toro Chávez por facilitarnos materiales necesarios para desarrollar la investigación.*

*A todos mis amigos, compañeros y personas que de alguna manera han estado presentes en mi vida para hacerla más amena.*

*Yaneth Luisa Chañi Paucar y Jair Rengifo Rodríguez*

## ÍNDICE GENERAL

INDICE DE TABLAS .....	i
ÍNDICE DE FIGURAS.....	iii
RESUMEN.....	iv
ABSTRACT.....	v
INTRODUCCIÓN.....	1
Justificación e Importancia .....	2
Objetivos.....	3
Objetivos generales.....	3
Objetivos específicos.....	3
HIPÓTESIS .....	4
Hipótesis Alterna.....	4
Hipótesis Nula.....	4
Sistema de Variables e Indicadores.....	4
I. MARCO TEORICO.....	6
1.1. Antecedentes.....	6
1.2. Revisión e investigación bibliográfica .....	8
II. MATERIALES Y MÉTODOS.....	32
2.1. Materiales, Equipos y Herramientas.....	32
2.2. Metodología.....	33
2.2.1. Fase Campo.....	33

2.2.2. Fase Laboratorio.....	43
2.2.3. Técnica de Análisis de datos .....	47
III. RESULTADOS Y DISCUSION .....	49
3.1. Rendimiento .....	49
3.2. Propiedades físicas-químicas.....	51
3.2.1. Contenido de humedad (CH).....	51
3.2.2. Material volátil.....	54
3.2.3. Contenido de cenizas.....	55
3.2.4. Carbono fijo.....	57
3.2.5. Poder calorífico.....	58
3.2.6. Densidad Aparente.....	59
CONCLUSIONES.....	61
RECOMENDACIONES.....	62
BIBLIOGRAFÍA CONSULTADA.....	63
ANEXOS.....	67

## INDICE DE TABLAS

Tabla 1. Variables e indicadores.....	5
Tabla 2. Estándares de calidad del carbón vegetal de exportación requeridos en tres mercados continentales.....	28
Tabla 3. Lista de materiales (campo, gabinete y laboratorio), equipos, herramientas y programas utilizados.....	32
Tabla 4. Análisis de Varianza del rendimiento ( $m^3 t^{-1}$ ) de carbón vegetal a partir de residuos de cantos y despuntes.....	50
Tabla 5. Rendimiento de carbón vegetal ( $m^3 t^{-1}$ ) a partir de residuos de cantos y despuntes.....	51
Tabla 6. Análisis de Varianza del contenido de humedad (%) de carbón vegetal a partir de residuos de cantos y despuntes.....	52
Tabla 7. Valores promedios (+ desviación estándar) de las propiedades Físico-químicos del carbón vegetal a partir de residuos de cantos y despuntes.....	53
Tabla 8. Propiedades Físicoquímicos del carbón vegetal a partir de residuos (cantos, despuntes) y los valores máximos permitidos por la norma de América del Norte, Europa y por el mercado Japones .....	53
Tabla 9. Análisis de Varianza del material volátil (%) de carbón vegetal a partir de residuos de cantos y despuntes.....	54
Tabla 10. Análisis de Varianza del Contenido de Cenizas (%) de carbón vegetal a partir de residuos de cantos y despuntes.....	56
Tabla 11. Prueba de Tukey para contenido de cenizas (%).....	57
Tabla 12. Análisis de Varianza del Carbono Fijo (%) de carbón vegetal a partir de residuos de cantos y despuntes.....	58
Tabla 13. Análisis de Varianza del Poder Calorífico (%) de carbón vegetal a partir de residuos de cantos y despuntes.....	59

Tabla 14. Análisis de Varianza de la Densidad ( $\text{gr cm}^{-3}$ ) de carbón vegetal a partir de residuos de cantos y despuntes.....	60
---	----



## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Esquema del Horno de Tierra Horizontal.....	15
Figura 2. Ubicación geográfica del área de estudio.....	34
Figura 3. Características de las muestras de cantos y despuntes.....	37
Figura 4. Cama o tarima donde se apilaron los residuos.....	39
Figura 5. El nivel de ubicación de las muestras en el horno.....	39
Figura 6. Esquema del Horno de Aserrín Tipo Horizontal.....	40
Figura 7. Flujo de Procesos de obtención y evaluación del carbón vegetal.....	48

## RESUMEN

El presente estudio tuvo como objetivo evaluar el rendimiento y calidad de carbón vegetal, a partir de residuos de la especie *Dypterix odorata* (aublet) willd (shihuahuaco) en el distrito de Tambopata, provincia Tambopata en el departamento de Madre de Dios. El método de carbonización fue artesanal de forma horizontal, habiendo utilizado un diseño factorial 2 x 3, donde los factores de experimentación fueron tipo de residuo (cantos y despuntes) y nivel de ubicación en el horno (inferior, medio y superior). Se hicieron tres repeticiones por tratamiento, las unidades experimentales totales comprendieron de 18 unidades de 21.5 kg de madera cada uno con humedades que fluctuaron entre 18 y 22 %. El proceso de carbonización duró aproximadamente 25 días, haciendo descargue cada 7 días de acuerdo al avance de la carbonización. El rendimiento de carbón fue de 382.702 kg por 1 m<sup>3</sup> de residuo de despunte (34.072 % del peso y 56.045 % del volumen), mientras que los cantos tuvo 307.977 kg por 1 m<sup>3</sup> (25.459 % del peso y 46.835 % del volumen), de acuerdo al análisis de variancia, únicamente, existió significancia ( $p < 0.01$ ) en tipo de residuos mas no en la ubicación de carbonización e interacciones. Las propiedades físicas del carbón producido fue: de 4.508 % de contenido de humedad para los residuos de cantos y 2.790 % en despuntes, el poder calorífico para cantos fue de 7 051.166 kcal/k y 6 203.627 kcal/kg para despuntes, la densidad aparente 0.707 gr/cm<sup>3</sup> para despuntes y 0.666 gr/cm<sup>3</sup> en cantos. Las propiedades químicas del carbón obtenido fueron: materia volátil de 12.322 % en cantos y 22.868 % en despuntes, contenido de cenizas 1.711 % para cantos y 1.550 % en despuntes, carbono fijo 85.967 % en cantos y 75.582 % para despuntes. Las propiedades fisicoquímicas de los tipos de residuos industriales de madera presentaron diferencias significativas con la excepción del contenido de cenizas.

**PALABRAS CLAVES:** *Dypterix odorata* (aublet) willd, horno artesanal, Carbón vegetal, Residuo de Aserrío, Parámetros físico-químicos, Rendimiento, Calidad.

## ABSTRACT

The present study had as its objective to evaluate the yield and quality of charcoal from the waste of the species *Dypterix odorata* (aublet) willd (shihuahuaco) in the district of Tambopata, province Tambopata in Madre de Dios, Perú. The method of carbonization was artisan horizontally, having used a design factorial 2x3, where the experimental factors were residue (edges and off-cuts) type and location in the oven (lower, middle and upper) level. Three replicates were made per treatment, the total experimental units comprised of 18 units of 21.5 kg of wood each with humidity that fluctuated between 18% and 22%. The carbonization process lasted approximately 25 days, making harvesting every 6 days according to the progress of carbonization. Charcoal yield was 382.702 kg/m<sup>3</sup> of residue of sprouting (34.072% y 56.045% of weight and volume, respectively), while edge was 307.977 kg/m<sup>3</sup> (25.459% y 46.835% weight and volume, ), according to the analysis of variance, only existed significance ( $p < 0.01$ ) in waste more not to the location of carbonization and interactions. The physical properties of the produced charcoal were: 4.508% moisture content for the edge waste and 2.790% in off-cuts, the calorific value for the edge were 7051.166 kcal/kg and 6203.627 kcal/kg for off-cuts, the bulk density 0.707 g/cm<sup>3</sup> for off-cuts and 0.666 g/cm<sup>3</sup> at edges. The chemical properties of the charcoal obtained: volatile matter 12.322% in edges and 22.868% in off-cuts, ashes 1,711% for edges and 1,550% for off-cuts, carbon fixed 85.967% in edges and 75.582% for off-cuts. The physicochemical properties of the types of industrial wood residues presented significant differences with the exception of the ash content.

**KEYWORDS:** *Dypterix odorata* (aublet) willd, traditional oven, charcoal, sawmill waste, physio-chemical parameters, yield, quality.

## INTRODUCCIÓN

Se estima que el 60 %, de toda la madera extraída anualmente en el mundo (cerca de 1 600 millones de metros cúbicos), se quema a modo de combustible ya sea directa o transformándola en carbón vegetal. El carbón vegetal en los países de desarrollo se usa principalmente a manera de combustible doméstico para cocinar y calefacción, pero es también un importante combustible industrial (FAO 1983). Según el Estudio de producción de carbón-método artesanal elaborado por la ATFFS Tumbes-Piura en el año 2003 un metro cúbico ( $1\text{m}^3$ ) de madera rolliza de la especie algarrobo rinde 364.9 kg de carbón. Sin embargo existen muy escasos estudios sobre otras especies comerciales. No existen más que criterios subjetivos relacionados con el rendimiento y las características Físicas-Químicas para determinar la calidad del carbón vegetal. Por tal razón es muy importante para la industria forestal realizar investigaciones sobre rendimiento y calidad de carbón vegetal para las especies comerciales de nuestro país, y así también poder determinar aquellos factores que influyen.

El potencial de *Dypterix odorata* (Aublet) Willd (Shihuahuaco) a nivel nacional es alto porque en las regiones de la selva es requerido por el mercado y también debido a la alta calidad de producto comparado con las otras especies (Tahuari, Pumaquiro, etc). Madre de Dios es de vocación Forestal y cuenta con grandes extensiones de bosques tropicales de diversas especies maderables, por lo tanto la industria de madera tiene mayor preponderancia, generando grandes cantidades de residuo. La especie *Dypterix odorata* (Aublet) Willd, es la que más se está aprovechando, con una producción de madera aserrada de 28 730.78  $\text{m}^3$  (SERFOR, 2014) presenta características resaltantes: siendo una madera dura, resistente al ataque biológico y para la resistencia mecánica se sitúa en la categoría alta; es usado en estructuras, vigas, columnas, parquet y durmientes; haciendo posible que posea mayor demanda nacional e internacional, de tal modo su aprovechamiento ha ido incrementando, y de forma simultánea el potencial de sus residuos industriales como cantos y despuntes.

La producción de carbón vegetal en la región de Madre de Dios es de 652 144.71 kg proveniente de 11 especies: Ana caspi, Azucar huayo, Catahua, Catuaba,

Copaiba, Pumaquiro, Quinilla, Tahuari, Ishpingo, Yutubanco y Shihuahuaco, presentando esta última especie una mayor producción con 420 137.11 kg (SERFOR, 2014).

El problema central para este estudio es la carencia de información sobre rendimiento y calidad de carbón vegetal, a partir de residuos de la especie ***Dypterix odorata* (Aublet) Willd (Shihuahuaco)**, producidos de forma artesanal de aserrín de tipo horizontal, y cómo influye su ubicación dentro el horno en el rendimiento y a su vez si se encuentran dentro de los estándares de calidad.

## **Justificación e Importancia**

### **Económica:**

El Perú es un país forestal con un gran potencial de crecimiento en producción y exportaciones de madera y productos terminados, sin embargo cuenta con una industria de transformación primaria (aserradero) con maquinarias antiguas y con poco mantenimiento que generan problemas de calidad de producto y baja productividad esto se hace evidente en las enormes cantidades de residuo que genera y que no es capaz de aprovecharse (Dance, 2008)

La producción de carbón vegetal en hornos horizontales artesanales no necesita mucha tecnología y tiene una posibilidad de hacer empresa, invirtiendo poca mano de obra calificada y utilizando como materia prima restos de residuos de la especie *Dypterix odorata* (Aublet) Willd (Shihuahuaco) es alentador. Esta actividad y forma de producción genera ingresos rentables de forma rápida a las familias dedicadas a la producción y venta de carbón vegetal al por mayor y menor, por ello esta es una actividad económica esencialmente para la Región Madre de Dios y el sur peruano que al mismo tiempo genera puestos de trabajo temporal y permanente.

### **Técnica:**

La investigación del rendimiento de carbón vegetal a partir de los residuos de la especie *Dypterix odorata* (Aublet) Willd (Shihuahuaco), permite demostrar que los hornos artesanales contribuyen en un buen rendimiento y calidad, definir la calidad según los parámetros físico- químico pudiendo dar a este producto un mercado

internacional. Como también realizar las conversiones madera (m<sup>3</sup>) a carbón vegetal (kg).

### **Social:**

Fuente de trabajo para los habitantes de nuestra región así como para las micro-empresas o personas particulares que se dedican al aprovechamiento de residuos de la especie *Dypterix odorata* (Aublet) Willd (Shihuahuaco), podrían emprender empresa con el aprovechamiento de este residuo, lo cual obtendrían beneficio gracias a su buen rendimiento y su calidad, es preciso resaltar que para su producción no es necesario de equipos o maquinas avanzadas por la misma razón que su producción es de forma artesanal.

### **Objetivos**

#### **Objetivo general**

- Evaluar el rendimiento y calidad de carbón vegetal, a partir de residuos de la especie *Dypterix odorata* (aublet) willd (shihuahuaco), producidos en horno artesanal de aserrín de tipo horizontal, Tambopata-Madre de Dios”

#### **Objetivos específicos**

- Evaluar el rendimiento de residuo de cantos y despuntes a carbón vegetal en el horno artesanal de aserrín tipo horizontal.
- Evaluar el rendimiento en los tres niveles de ubicación en el horno artesanal de aserrín tipo horizontal.
- Determinar la relación del tipo de residuo y nivel de ubicación en el horno artesanal de aserrín tipo horizontal.
- Determinar la calidad del carbón vegetal según el tipo de residuo mediante las propiedades fisicoquímicas requeridos en tres regiones del mundo.
- Determinar la calidad del carbón vegetal en los niveles de ubicación mediante las propiedades fisicoquímicas requeridos en tres regiones del mundo.

## HIPOTESIS

### Hipótesis alterna.

**H<sub>i</sub>:** El Tipo de Residuo de *Dypterix odorata* (Aublet) Willd (Shihuahuaco) y su ubicación de carbonización en el horno artesanal de aserrín tipo horizontal influye en el rendimiento y calidad del carbón vegetal.

### Hipótesis nula.

**H<sub>o</sub>:** El Tipo de Residuo de *Dypterix odorata* (Aublet) Willd (Shihuahuaco) y su ubicación de carbonización en el horno artesanal de aserrín tipo horizontal no influye en el rendimiento y calidad del carbón vegetal.

## SISTEMA DE VARIABLES E INDICADORES.

### Identificación de las variables

#### X: Independiente:

- Tipos residuo vegetal (cantoneras y despuntes).
- Ubicación de la muestra dentro del horno.

#### Y: Dependiente:

- Rendimiento de carbón vegetal kg
- Calidad del carbón vegetal.

## Operacionalización de Variables

**Tabla 1.** Variables e indicadores.

Variables		Indicadores	Instrumentos	Escala	Fuente
Rendimiento del carbón vegetal:		Rendimiento	Balanzas	kg m <sup>3</sup> %	Carrillo <i>et al</i> (2013) Panduro <i>et al</i> (2012)
Tipos de residuos:	Cantos				
	Despuntos				
Nivel de ubicación en el horno:	Superior				
	Medio				
	Inferior				
Calidad del carbón vegetal:		-Humedad	-Capsulas	%	Norma ASTM D 1762-84 Sánchez (1997) Carrillo <i>et al</i> 2013)
Tipos de residuos:	Cantos	-Materia volátil	-Crisoles		
	Despuntos	-Contenido de ceniza	-Mufla		
Nivel de ubicación en el horno:	Superior	-Carbono fijo	-Horno		
	Medio	-Poder calorífico	-Balanza analítica		
	Inferior	-Densidad	-Campana de secadora		



## I. MARCO TEORICO

### 1.1. Antecedentes

Ordaz (2003) menciona que todos los parámetros de calidad, a excepción de los porcentajes de cenizas, fueron influenciados significativamente por los niveles en donde se produjo el carbón vegetal influyendo en la calidad y valores de estos. Ningún parámetro de calidad fue influenciado significativamente por la posición en que fue producido el carbón vegetal.

Rojas (2014) indica que todos los parámetros de calidad del carbón vegetal evaluados en este trabajo, fueron influenciados significativamente por el nivel de profundidad del horno en el que se produjo el carbón vegetal, con excepción de las cenizas. La madera de densidad alta favorece el rendimiento en la transformación de leña a carbón vegetal.

El carbón vegetal que se produjo en la parte superior del horno, presenta un mayor refinamiento al eliminar más cantidad de volátiles, lo cual lo hace favorable para el cumplimiento de los estándares de calidad para exportación. El carbón vegetal producido en el nivel superior es el único que logra satisfacer los requerimientos sólo para América del Norte, el carbón del nivel inferior y nivel medio no cumplen con las especificaciones de calidad para ninguna región.

El rendimiento que se obtuvo utilizando el horno metálico tipo japonés mejorado resultó elevado, lo cual se atribuye a las dimensiones de la leña, a su acomodo dentro del horno y a la operación del mismo, así como la gran cantidad de materiales volátiles contenidos en la mayoría del carbón vegetal producido.

Carrillo, Foroughbakhch y Bustamante (2013) indica que el carbón vegetal elaborado con leña de *Prosopis laevigata* y *Ebenospis ebano* presentó altos rendimientos en comparación con los valores citados para diferentes especies y tipos de horno. La calidad del carbón, en términos fisicoquímicos, se sitúa dentro de los intervalos establecidos para un carbón vegetal de calidad, en relación con el contenido de humedad y porcentaje de cenizas; sin embargo, los valores del

material volátil y carbón fijo de ambas especies no corresponden con las normas internacionales tomadas como referencia.

La calidad del carbón de ambas especies puede incrementar, si se consideran aspectos operativos durante el proceso de carbonización como elevar la temperatura para reducir el porcentaje de material volátil y aumentar el carbón fijo; sin embargo, se reduciría el rendimiento.

Guyat, Velázquez y Manzanares (2003) manifiesta que es posible la utilización del horno metálico diseñado para la carbonización de residuos de aserradero ya que resulta una operación eficiente desde el punto de vista técnico y la calidad del carbón obtenido se encuentra dentro de los rangos establecidos para un producto de calidad. Se verificó que el poder calórico de las especies estudiadas depende de la composición química de la madera y de su contenido de humedad; lo que provoca que el horno metálico el proceso de carbonización sea más homogéneo.

Canul (2012) indica que los resultados de diferentes ensayos muestran que a menor contenido de humedad de la madera y a mayor densidad, se obtiene un mayor rendimiento y calidad de carbón vegetal.

Pacheco (2005) indica que la carbonización con hornos de barro es una actividad de baja eficiencia y baja productividad, con escasa tecnología, y uso poco racional de los recursos, que no contribuyen al desarrollo sustentable de dicha actividad, de lo que se desprende la importancia de mejorar las condiciones de dicha actividad con nuevas y más eficientes tecnologías.

Los hornos de barro estudiados presentaron bajas temperaturas durante el proceso de carbonización. Estas temperaturas no superaron los 320° C lo que determina las características del carbón producido, es decir un alto porcentaje de material volátil y un bajo contenido de carbono fijo. Se estima que si se alarga el tiempo que la madera está apilada, bajaría el contenido de humedad, aumentando el rendimiento de los hornos.

Guardado, Rodríguez y Monge (2010) menciona que el contenido de gases volátiles, carbono fijo y contenido de cenizas se puede observar una relación muy estrecha entre ellas, podríamos decir que a mayor cantidad de gases volátil menor es la cantidad de carbón fijo y viceversa, y mientras más carbono fijo tenga mayor porcentaje de cenizas producirá.

En las propiedades de un carbón debe de existir un equilibrio entre ellas, ya que un carbón que posea una gran cantidad de gases volátiles y menos carbono fijo no significa que sea mejor, por la razón de que pueda que se queme con mayor rapidez y no dure el tiempo necesario de tal manera que una persona tendrá que utilizar más carbón, y si un carbón posee demasiado carbono fijo tendrá un mayor contenido de cenizas.

El porcentaje de volátiles no influye directamente en el tiempo de ignición ya que no todos los gases volátiles son combustibles. La cantidad de gases volátiles depende del tipo de madera y del tiempo del proceso de carbonización.

## **1.2. Revisión e investigación bibliográfica**

### **1.2.1. Características del Área de Estudio<sup>1</sup>**

El clima de Madre de Dios es de tipo tropical: cálido, húmedo y con abundantes precipitaciones pluviales. La temperatura media anual en Puerto Maldonado es de 26°C; las máximas llegan a 38°C entre agosto y setiembre y las mínimas descienden a 8°C. Las precipitaciones son escasas entre los meses de junio a agosto, con una época lluviosa entre diciembre y marzo.

Los recursos hídricos están constituidos por un conjunto de ríos caudalosos y riachuelos que atraviesan el departamento de oeste a este, constituyéndose en el principal medio de comunicación y transporte, así como también por su

---

<sup>1</sup> Gerencia Central de Administración - Cusco, Caracterización del Departamento de Madre de Dios, 08 de enero de 2015.

contenido de fauna (peces, nutrias) que son, en parte, la base de la alimentación de los pobladores de la región.

La vegetación que predomina y abarca la mayor superficie en Madre de Dios corresponde a la clasificación de bosque húmedo tropical, que cubre casi la totalidad de las provincias de Tambopata y Manú.

### 1.2.2. Características de la Especie.

#### a. División taxonómica de la especie:

- REINO: Plantae o vegetal
- DIVISIÓN: Magnoliophyta
- CLASE: Magnoliopsida
- ORDEN: Fabales
- FAMILIA: Fabaceae
- GÉNERO: Dipteryx
- ESPECIE: odorata
- NOMBRE COMÚN: Shihuahuaco.

Según el Sistema de Clasificación de Arthur Cronquist

#### b. Descripción botánica de la especie en *Dypteryx odorata* (aublet) willd, (shihuahuaco).

Reynel, Pennington, Pennington, Flores y Daza. (2003) caracteriza a la especie como:

- **Árbol**, grande de unos 20-35 m de altura total, con diámetro de 50 – 150 cm, con el fuste cilíndrico y la ramificación desde el segundo tercio.
- **Raíz**, la base del fuste, generalmente con aletas de regular tamaño.
- **Corteza externa**, lenticelada, color marrón claro a grisáceo o verdusco; presenta escamas de ritidoma que desprenden aisladamente dejando huellas impresas, las lenticelas de 2- 4 mm de diámetro.

- **Corteza interna**, granular, color amarillo pálido, con gránulos de color blanquecino y amarillo oscuro.
- **Hojas**, compuestas imparipinnadas, alternas y dispuestas en espiral, de 13-30 cm de longitud, el peciolo de 4 a 8 cm de longitud, este y el raquis acanalados y estrechamente alados, las alas de 1-2 mm de ancho, el raquis terminado en un mucrón lanceolado y alargado, de 2-3.5 cm de longitud, los folíolos 4-7 pares, oblongos, de 4-10 cm de longitud y 2-3.5 cm de ancho, enteros, los nervios secundarios de 10-14 pares, prominulos en ambas caras, el ápice de los folíolos obtuso a agudo, cortamente acuminado, la base obtusa a rotunda, las láminas glabras, coriáceas, rígidas.
- **Inflorescencias**, panículas terminales o axilares de 10-20 cm de longitud, multifloras.
- **Flores**, hermafroditas, zigomorfas, 0.8-1.2 cm de longitud, con cáliz y corola presentes, la corola rosada, de 6-10 mm de longitud, el androceo 5-7mm de longitud, con varios estambres, el gineceo con un pistilo de ovario supero y alargado, el estigma capilado.
- **Frutos**, oblongoides de 3-6 cm de longitud y 2-4 cm de diámetro, leñoso, indehiscentes, la superficie de color amarillento, el mesocarpio harinoso y oleoso, la semilla única.
- **Comportamiento Fenológico**, la floración ocurre entre los meses de marzo y junio, pudiéndose presentar una defoliación parcial de la copa. La maduración de los frutos dura de 3 a 4 meses. La diseminación se inicia en la época seca (agosto) y se puede prolongar hasta inicios de la época lluviosa (octubre) siendo más frecuente en septiembre (Flores, 1997).
- **Usos**, la madera es de muy buena calidad, dura y pesada, de color blanquecino en la albura y marrón amarillento o rojizo en el duramen cuando seca. Es apta para el torneado tiene buena durabilidad y es

resistente a la humedad. Con ella se elabora parquet, en materiales de construcción, tales como puntuales, vigas, mangos de herramientas, postes y chapas decorativas (INIA-OIMT, 1996).

- **Habitad**, Región Amazónica, mayormente debajo de los 700 m.s.n.m.

Se le observa en ámbitos con pluviosidad elevada y constante. Es una especie esciofita, presente en bosques primarios, en suelos arcillosos a limosos con pedregosidad baja a media.

- **Procedencia**, en el Perú se encuentra principalmente en los departamentos de Loreto, San Martín y Ucayali. Según los resultados de inventarios forestales disponibles y de acuerdo a las zonas, el volumen bruto de Shihuahuaco varía entre 0.5 m<sup>3</sup>/ha á 3m<sup>3</sup>/ha (Confederación Peruana de la Madera, 2008).

#### c. Descripción de la madera

- **Color**: Marrón.
- **Brillo**: Medio alto.
- **Grano**: Entrecruzado.
- **Textura**: Gruesa.
- **Veteado**: Característico.
- **Anillo**: Poco diferenciados por bandas oscuras irregulares.

Según la Confederación Peruana de la Madera (2008).

#### d. Características Tecnológicas

##### ➤ Propiedades Físicas

- **Densidad Básica**: 0.87 g/cm<sup>3</sup>
- **Contracción Volumétrica**: 15.00 %

- **Relación T/R:** 1.60
- **Contracción Tangencial:** 9.10 %
- **Contracción Radial:** 5.50 %

Según la Confederación Peruana de la Madera (2008).

#### **e. Características de la Troza**

- **Diámetro:** Diámetro promedio de 0.64 m
- **Forma:** Regular
- **Defectos:** Agrietamientos internos y acebolladuras.
- **Conservación:** Mantener la troza sumergida. El Shihuahuaco es una madera altamente resistente al ataque de hongos, termitas e insectos.

Según la Confederación Peruana de la Madera (2008).

#### **f. Aserrío y Secado**

Según la confederación Peruana de la Madera (2008), la especie es difícil de aserrar pues presenta grano entrecruzado y de alta dureza recomendándose estelitar las sierras. El comportamiento en el secado es suave de 10 días para piezas de pequeñas dimensiones como el parquet. Para otras dimensiones mayores presenta problemas de alabeos.

### **1.2.3. Residuos Forestales.**

**Clasificación de los residuos,** según Dance (2008):

**a. Largueras:** Se pueden tipificar como el residuo del proceso del canteado, también se conocen con la denominación de costaneras o cantos, una de sus características principales es lo considerablemente mayor que resulta el largo en comparación con sus anchos y espesor, en el presente estudio se pudo establecer que es el residuo de mayor incidencia y porcentaje en el proceso de aserrío. Son diversos los sub-

productos de recuperación, los más significativos son la paquetería larga, travesaños, somieres y palos de escoba.

**b. Despunte:** Constituye el residuo más asimétrico de la muestra, en algunos casos la longitud de su largo, ancho o espesor suelen ser de similares dimensiones. El despunte procede del proceso de despuntado realizado normalmente por un disco de péndulo, para la presente muestra ha constituido el segundo residuo en incidencia. Sus usos son diversos desde leña para generación de energía hasta, productos de elaboración secundaria como tacos, mangos de herramientas, artesanías entre otros.

**c. Aserrín:** Es el residuo de constitución menos sólida, proviene del espacio de madera que es cortado por los dientes de sierra al pasar por la troza o porción de madera, siendo proporcional al grosor de la sierra usada, al número de cortes y al área de corte, el aserrín se genera en las tres principales etapas del proceso de aserrío, para la muestra tomada constituyo la tercera en importancia. Sus usos pueden ser variables, se ha podido constatar que es usado para energía de hornos, relleno sanitario, entre otros.

**d. Tapas:** También conocidas como cantoneras, son generadas en la sierra principal durante el proceso de escuadrado de la troza, no tienen mayor componente de madera por los que son usadas generalmente como cercos, es el residuo más irregular por lo que su medición constituyó un problema, ha representado el de menor importancia.

#### **1.2.4. Producción de Residuos.**

El Perú es un país forestal con un gran potencial de crecimiento en producción y exportaciones de madera y productos terminados, generando enormes cantidades de residuo. Los desperdicios provenientes del flujo productivo de la industria del aserrío se descomponen en: Largueras, tipificadas como el residuo del canteado, Despunte procede del proceso del despuntado, Aserrín que proviene del espacio de madera que es cortado por los dientes de sierra al pasar



por la troza o porción de madera y las Tapas: También conocidas como cantoneras, son generadas en la sierra principal durante el proceso de escuadrado de la troza. Teniendo los datos de la generación porcentual de residuos para Pucallpa (46.59 %) e Iquitos (43.74 %), podemos indicar que la generación de residuos de madera aserrada por año de cada zona, ascienden a 207,875.60 m<sup>3</sup> y 237,031.85 m<sup>3</sup> respectivamente (Dance, 2008).

#### **1.2.5. Horno Artesanal Horizontal.**

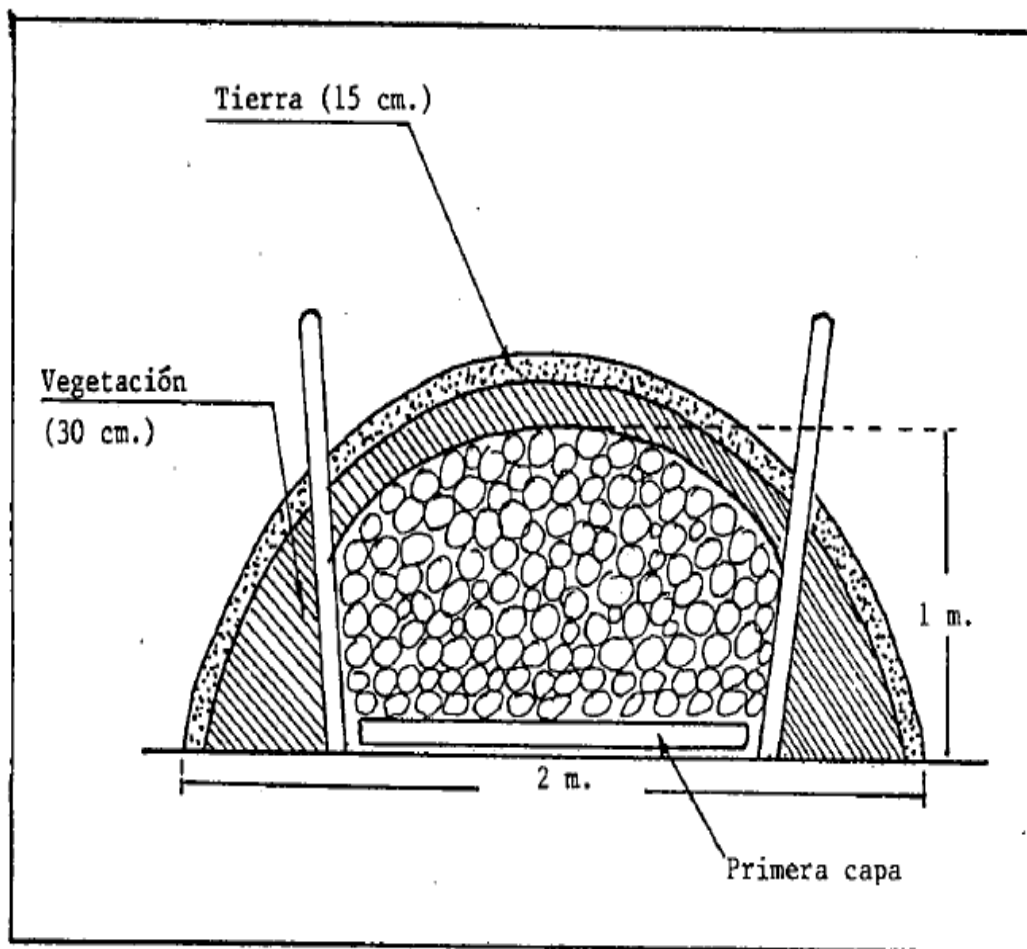
Según Roos y Ross (1979), Corado (1984) los hornos artesanales de tipo horizontal tienen una capacidad aproximada de 6 m<sup>3</sup> en promedio produce de 30 a 40 kg De carbón por m<sup>3</sup> de madera.

En un área de 2 x 5 m se nivela y se limpia la vegetación, se coloca palos de madera de 1.5 m de largo y 5 cm de diámetro distanciados 0.5 m luego se coloca la madera hasta hacer una pila de 3 a 5 m de largo, 1.5 m de ancho y 1 m de alto, esta pila se orienta en dirección del viento, luego se procede a colocarle una capa de 30 cm de vegetación tupida, dejando abierto solamente los puntos de ignición. Después se coloca una capa de tierra de 15 cm (Figura 1).

Las paredes del horno se pueden reforzar con grandes trozos de madera, para darle firmeza.

Se hace un pequeño fuego cerca del horno y al estar bien encendido, se toman 2 a 3 paladas de madera ardiendo y se colocan en los puntos de ignición del horno, si después de 15 minutos no sale humo, se mueve la tierra en 4 a 5 puntos del horno, después se tapa el punto de ignición con vegetación y tierra, después de cierto tiempo de carbonización, el humo se torna tenue y escaso, se deben tapar las entradas de aire con tierra, a estas alturas el horno ha perdido la mitad de sus volumen.

El enfriamiento se lleva a cabo durante 3 a 4 días, dependiendo de las condiciones atmosféricas, del tipo de madera y del tipo de tierra utilizado. Para descargar el horno se quita toda la tierra, existiendo algunos tizones encendidos y a los cuales se debe colocar tierra y no mojarlos para apagarlos.



**Figura 1.** Esquema del Horno de Tierra Horizontal.  
**Fuente:** Según Roos y Ross (1979).

### 1.2.6. El carbón vegetal.

Camacho (1987) describe al carbón como el residuo de la combustión incompleta de la madera, pero que conserva todas las materias combustibles capaces de volver a entrar en combustión sin llama.

### 1.2.7. Factores externos que influyen en la calidad del carbón.

Bravo (1995) menciona que el sistema de producción, la distribución de la madera dentro del horno, presión, especie (componentes y densidad de la madera) contenido de humedad de la madera, temperatura de carbonización, y tiempo de carbonización, son factores externos que influyen en la calidad del carbón.

### **a. Sistema de Producción.**

Una de las formas más eficientes de elaborar carbón vegetal es en hornos de mampostería ya que la relación de elaboración de carbón a madera es de una tonelada de carbón producido por cada 4.5 m<sup>3</sup> de leña de encino (A la Torre, 1992), Ordaz (2003). Siendo su eficiencia superior a la tradicional, dado que el aprovechamiento de la materia prima es más eficiente (Morales, 1994), Ordaz (2003).

Sánchez (1996), Ordaz (2003) mencionan que el producir carbón vegetal en hornos fijos de ladrillo es una técnica sencilla que revoluciona el proceso de producción de carbón vegetal, haciéndolo eficiente y ventajoso en cuanto a rentabilidad y calidad del carbón producido, siempre que se utilice una organización adecuada de la producción. En el mismo sentido, Marcos (1989), Ordaz (2003) mencionan que en las tecnologías semi-industriales (hornos de ladrillo y acero fundamentalmente), la habilidad del operario influye menos en la calidad de carbón producido, que lo que influye en tecnologías artesanales.

Sánchez (1996), Ordaz (2003) también indican que en la UAF N° 4 en Mascota, Jalisco en 1989, se realizó una comparación de tipos de hornos y que en los hornos fijos de ladrillo se invierte menos de la mitad de tiempo y número de jornales en el proceso de producción de carbón vegetal que en los tradicionales; además de una mejor limpieza, carbón entero y con mayor cantidad de carbono fijo.

### **b. Distribución de la madera dentro del horno.**

Inoue (1996), Ordaz (2003) indican que la calidad del carbón vegetal producido en horno de carbón japonés, se puede saber por la ubicación en que estuvo en el horno, presentándose en la parte frontal y posterior a la puerta de entrada baja y buena calidad respectivamente. Así mismo la calidad del carbón vegetal se puede saber por la posición en que estuvo en el horno; la parte superior y la intermedia pueden ser vendidas a un mejor

y mismo precio, mientras que la parte inferior o la de abajo, tiene que ser vendida a un precio menor por no ser de calidad. La división en la calidad de carbón (buena hacia arriba y mala hacia abajo) no es por el horno, sino que se debe a una reacción química en el proceso de la materia. (Más temperatura hacia arriba, más humedad hacia abajo, etc.).

#### **c. Presión.**

Bravo (1995), Ordaz (2003) mencionan como factor importante de la calidad del carbón vegetal producido, la presión causada por la madera carbonizada de la parte superior que afecta la calidad del carbón vegetal obtenido en la parte inferior. Si durante el proceso de carbonización la madera ha soportado grandes presiones, el carbón vegetal obtenido presenta mayor densidad. Por esta razón en los hornos de ladrillo y metálicos el carbón de la parte baja del horno puede ser más denso que en las zonas superiores (Marcos, 1989).

#### **d. Especie.**

La especie influye por la concentración de componentes que la constituyen (celulosa, hemicelulosa y lignina) y por su densidad (Marcos, 1989). En general, con maderas frondosas, coníferas y palmeras puede obtenerse un buen carbón vegetal. Sin embargo, la madera de coníferas es por lo general menos densa que la de frondosas, y por consiguiente da un carbón más ligero (Earl, 1975).

El rendimiento del carbón vegetal muestra también cierta variación con respecto al tipo de madera, ya que el contenido de lignina en la madera tiene un efecto positivo sobre el rendimiento del carbón. Una madera densa tiende también a dar un carbón vegetal denso y fuerte, lo que es también deseable. Sin embargo, madera muy densa produce a veces carbón quebradizo puesto que la madera tiende a desmenuzarse durante la carbonización (FAO, 1983).

### **e. Componentes de la Madera.**

La madera consiste de tres componentes principales: celulosa, lignina y agua. La celulosa, la lignina y algunas otras materias como holocelulosas están fuertemente ligadas entre sí y constituyen el material denominado madera (Bravo, 1995). (Echenique, 1991) al referirse a los componentes de la madera, empieza por describir que la madera como toda sustancia viva, está formada por multitud de pequeñas unidades individuales cementadas entre sí llamadas células. Un análisis químico típico de la madera indicaría la siguiente composición: carbono: 50 %, hidrógeno: 6 %, oxígeno: 43 %, otros elementos: 1 %.

Algunos componentes de la madera tienen mayor o menor influencia en el desarrollo de la carbonización y en la obtención de productos de la misma. Así por ejemplo, a mayor contenido de holocelulosa se incrementan la producción de destilados y el rendimiento de carbón disminuye. Por el contrario la presencia de lignina incrementa la obtención de carbón (Bravo, 1995 y FAO, 1983).

### **f. Densidad de la Madera.**

El peso de un cuerpo puede definirse como el producto de su masa por la aceleración de la gravedad en el sitio donde se hace la medición. Para referirse a la densidad se aplica la relación peso por unidad de volumen y generalmente se expresa en  $\text{g/cm}^3$ . Para casos prácticos es común obtener los valores de la densidad básica, ésta, es una forma de obtener para cada especie la densidad de la madera en sus condiciones reales de porosidad con la máxima humedad posible (Echenique, 1991).

La densidad de la madera influye en la densidad del carbón vegetal producido a partir de ella, ya que a mayor densidad en la materia prima se obtendrá mayor densidad en el producto (Bravo, 1995).

### **g. Contenido de Humedad de la Madera.**

La humedad de la madera influye decisivamente en el poder calorífico, afectando el balance térmico (Bravo, 1995).

La influencia de la humedad en el valor calórico de la madera puede calcularse a partir de una sencilla fórmula (FAO, 1983):

Valor calórico neto =  $19.000 - 220 M$  en (kcal /kg)

Dónde: M es el contenido de humedad en porcentaje.

Marcos (1989) indica que generalmente la humedad de la madera influye mucho más en el rendimiento del carbón vegetal obtenido, que la especie de la madera de la que se obtiene el mismo. Es decir, a mayor humedad de la madera menor rendimiento en carbón. La FAO (1983) menciona que el agua es absorbida o retenida como moléculas de agua en la estructura celulosa/lignina. Y que la madera secada al aire o "estacionada" contiene todavía 12-18 % de agua, en contraste la madera en crecimiento recientemente cortada o "no estacionada", contiene además agua líquida llevando el contenido total de agua a alrededor del 40-100 %, expresado en porcentaje del peso de la madera seca al horno.

Patiño y Pezet (1992) y Morales (1994) señalan que el rendimiento en hornos de tipo colmena brasileño varía al usar madera seca y verde dando rendimientos de 17.8 y 15.9 % en peso respectivamente. Además de que la humedad afecta al proceso de carbonización, ya que la duración de éste, varía de 6 a 7 días para madera seca y 8 a 9 para madera verde.

FAO (1983) indica que antes de que la carbonización ocurra, el agua en la madera debe ser totalmente eliminada como vapor por lo que se necesita una gran cantidad de energía para evaporar el agua, por lo que es recomendable usar lo más posible al sol para el pre-secado de la madera antes de la carbonización, de este modo se mejora mucho la eficiencia. El agua que queda en la madera que tiene que ser carbonizada, deberá ser

evaporada en la fosa o en el horno, y esta energía deberá proporcionarse quemando parte de la misma madera, que podría ser transformada en carbón vegetal aprovechable.

#### **h. Temperatura de Carbonización.**

Con temperaturas cada vez mayores el rendimiento del carbón vegetal disminuye rápidamente, pero también su composición química cambia incrementándose hasta casi carbono puro. Con temperaturas altas, se tienen más altos contenidos de carbono fijo y por ende mejor calidad, pero con detrimento de bajos rendimientos (Bravo, 1995).

FAO (1983) indica también que: bajas temperaturas de carbonización dan un mayor rendimiento en carbón vegetal, pero de baja calidad, es corrosivo por contener alquitranes ácidos y no quema con una flama limpia sin humo. Un buen carbón vegetal comercial para uso doméstico debería contener carbono fijo en alrededor del 75 %, para lo cual se requiere una temperatura final de carbonización de alrededor de 500 °C.

Kollmann (1959) menciona lo que va sucediendo con la carbonización conforme aumenta la temperatura:

Cuando se calienta la madera empieza a producirse una desecación. El agua de impregnación, unida coloidalmente, necesita temperaturas de 98 a 103 °C para poder romper la unión higroscópica, con lo cual queda totalmente eliminada al llegar a dichas temperaturas.

A algo más de 100 °C empieza a verificarse también una descomposición, que se realiza muy lentamente hasta los 200 °C, pero que puede apreciarse, de todos modos, por la pérdida de peso. Aquí se produce, en esencia, un desdoblamiento irreversible del agua.

A más de 200° C la reacción de va haciendo rápidamente más perceptible.

A unos 275 °C empieza, de súbito, a desarrollarse violentamente, con lo que se liberan cantidades considerables de calor. P. Klason y sus

colaboradores confirmaron que la destilación comienza a 250 °C, se hace muy viva a 275 °C y termina a los 350 °C.

Después de la producción de una gran cantidad inicial de anhídrido carbónico, se forman violentamente, en el periodo de auto carbonización, hidrocarburos, los cuales elevan al máximo el poder calorífico. Dupont (1928) halló que los procesos de carbonización tienen sus desarrollos más rápidos a unos 300 °C. Análogo resultado halló Bórnstein (1906) para el intervalo de temperaturas de 300 a 350 °C.

Después de la auto carbonización, aun se forman, hasta los 500 °C, muchos gases ricos en hidrocarburos (compuestos aproximadamente de un 50 % de  $C_nH_m$  principalmente metano, un 25 % de  $CO_2$ , y el resto de  $CO$  y  $H_2$ ) y alquitranes densos. En el intervalo entre 500 y 700 °C la producción de gas es escasa, el anhídrido carbónico se pospone a la parte condensada y el hidrogeno constituye ahora el componente principal; los hidrocarburos se descomponen liberando carbono.

La calidad del carbón vegetal varía en función a la temperatura: A una temperatura de 300 °C el carbono fijo y material volátil es de 68 % y 31 %, a 500 °C el carbono fijo aumenta a 86 % y el material volátil disminuye a 31 %, a 700 °C presenta un alto carbono fijo de 92 % y un material volátil de 7 % Prías, Rojas, Echeverry, Fonthal, Ariza (2011)

#### **i. Tiempo de Carbonización.**

Morales (1994) indica que al usar madera seca y verde se afecta el proceso de carbonización, ya que la duración del proceso fue de 6 a 7 días para madera seca y 8 a 9 para madera verde.

Es importante lo que sucede con diferentes tiempos de carbonización en combinación de la temperatura a la cual se produce el carbón vegetal, esto es porque afecta la calidad del carbón vegetal producido cuando la carbonización es prolongada y la temperatura es elevada dando un contenido de volátiles bajo. Cuando la temperatura de carbonización es



baja y el período en el horno es breve, entonces el contenido de sustancia volátil aumenta (FAO, 1983).

### **1.2.8. Propiedades Físico-Químicas del Carbón Vegetal.**

Para apreciar los usos y calidad del carbón vegetal es preciso conocer sus Propiedades físicas y químicas, ya que dicha calidad se define según algunas de sus propiedades y, si bien, todas en cierto modo están interrelacionadas, se miden y se valúan por separado (FAO, 1983).

Dentro de las principales características que definen la calidad y el uso del carbón vegetal, se pueden considerar los contenidos porcentuales de: carbono fijo, material volátil, cenizas, contenido de humedad, rendimiento leña-carbón, densidad y poder calorífico (Pérez y Compean, 1989 y Sánchez, 1996) citado por Ordaz (2003). En su sentido más amplio, la calidad del carbón puede especificarse y medirse en varias formas derivadas generalmente de los requisitos para las diversas aplicaciones finales (Pérez y Compean, 1989) citado por Ordaz (2003). La mayoría de las propiedades físico-químicas usadas para controlar la calidad del carbón vegetal se han originado en la industria del acero o química. Cuando el carbón vegetal se exporta, los compradores tienden a usar estas mismas especificaciones de calidad industrial (FAO, 1983).

#### **a. Densidad.**

En sentido estricto se define como densidad a la magnitud física que representa la relación entre la masa del carbón vegetal y el volumen que ocupa (Aldana, 2002). La densidad del carbón vegetal es una propiedad física importante, ya que densidades altas suponen a igualdad de peso, volúmenes pequeños y por tanto, una disminución de costos a la hora de su transporte. Además, en el uso industrial se buscan carbones densos, ya que producen, a igualdad de volumen, mayor número de calorías en su combustión (Marcos, 1989).

La densidad del carbón vegetal depende fundamentalmente de la densidad de la madera utilizada para su obtención. Presentándose en general, que la densidad de las frondosas es mayor que la de las coníferas; siendo también directamente proporcional a la densidad en seco de la materia prima (Marcos, 1989). El carbón vegetal obtenido a baja temperatura suele ser más denso que el que se obtiene a alta temperatura porque las sustancias volátiles disminuyen progresivamente a medida que aumenta la temperatura máxima de carbonización (Earl, 1975 y Marcos, 1989).

#### **b. Humedad.**

Aldana (2002) define la humedad en el carbón vegetal como la cantidad de agua o de otros líquidos impregnados o contenidos en el carbón. Así mismo Pérez y Compean (1989) la definen como la relación porcentual existente entre la diferencia de pesos del carbón vegetal (seco y húmedo) sobre el peso seco del mismo.

Por su parte la FAO (1983), Pérez y Compean (1989) comparten la opinión que la humedad es un adulterante que baja el valor calorífico o de calefacción del carbón vegetal. Marcos (1989), clasifica con tres tipos de saturación al carbón vegetal de acuerdo a sus porcentajes de humedad, como: carbón vegetal seco al aire si su humedad esta entre 4 y 9.5 % (en base húmeda), carbón vegetal húmedo si ésta entre 10 y 15 % y mojado si su humedad es mayor del 15 %.

A la Torre (1992) indica que la humedad desaparece con el proceso de carbonización y que el grado de humedad depende, naturalmente, de las condiciones meteorológicas y del tipo de las instalaciones de almacenamiento. A condición de que el carbón vegetal no esté en contacto directo con el agua, rara vez alcanzará una humedad superior al 5 por ciento; para fines industriales se considera deseable que la humedad sea inferior al 4 por ciento. Por su parte la FAO (1983), Pérez y Compean (1989) comparten la opinión de que cuando no se ha quemado correctamente el carbón o cuando los ácidos piroleñosos y alquitranes solubles han sido

retomados por el carbón vegetal a causa de la lluvia, como puede suceder en la quema en fosas o parvas, aumenta la higroscopicidad del carbón y su contenido de humedad natural o en equilibrio puede subir de 0 al 15 % o más. Marcos (1989) indica que la humedad de equilibrio higroscópico para la madera es muy importante, siéndolo menos en carbón vegetal por ser éste, mucho menos higroscópico que aquella.

### **c. Poder calorífico.**

Se define como poder calorífico la cantidad de energía que desprende por unidad de masa de un combustible al quemarse; en sentido estricto deben diferenciarse los conceptos de poder calorífico superior (si los gases de la combustión se recogen condensados) y el poder calorífico inferior (si los gases de la combustión se escapan como tales) Guardado (2010). El valor calorífico del carbón vegetal es prácticamente equivalente al del carbono. La medida que da un calorímetro de bomba se considera como un indicador suficiente (Marcos, 1989).

El poder calorífico de un combustible depende fundamentalmente de su composición química. A mayor contenido de carbono mayor es el poder calorífico. También depende de la humedad, a mayor humedad menor es la cantidad de materia combustible y mayor es el calor invertido en evaporar el agua por lo que el poder calorífico es menor (Marcos, 1989).

Marcos (1989) señala que el poder calorífico del carbón es mayor que el de la madera y ésta, es una de las principales razones por lo que la madera es carbonizada. La razón fundamental de esta diferencia es que en el carbón vegetal el porcentaje de carbono es más alto que en la madera. Por lo que existe una relación directamente proporcional entre el contenido de carbono logrado y el poder calorífico resultante.

### **d. Carbono fijo.**

Pérez y Compean (1989) dicen que el carbono fijo puede definirse como la cantidad de carbono elemental que contiene un material de prueba. En el

mismo sentido Marcos (1989) dice que el carbón vegetal tiene mayor contenido en carbono que la madera, por lo que su poder calorífico es mayor y es mejor combustible que ésta; y que su contenido depende principalmente de las condiciones de carbonización y en menor grado de la cantidad de carbono que contiene la carga original de madera.

Con una carbonización lenta y a alta temperatura se eliminará casi todas las sustancias volátiles y entonces el contenido fijo de carbono es alto (del 90 % aproximadamente); la carbonización rápida y a baja temperatura dará un carbón vegetal con más sustancias volátiles, y por consiguiente, con un menor contenido fijo de carbono. El contenido de carbono fijo en el carbón vegetal varía desde un mínimo del 50 % hasta uno elevado del 95 %, en cuyo caso el carbón vegetal consiste principalmente en carbono.

#### **e. Sustancias volátiles.**

La materia volátil en el carbón vegetal comprende todos los residuos líquidos y alquitranosos que no fueron eliminados completamente durante el proceso de carbonización (FAO, 1983). Earl (1975) define a los volátiles como la pérdida de peso sin contar la que se debe a la humedad que sobreviene cuando el carbón vegetal se calienta durante siete minutos a la temperatura de 900 °C, sin contacto con el aire. Las sustancias volátiles del carbón vegetal desaparecen antes de que empiece la oxidación del carbón y están compuestos principalmente de hidrocarburos (compuestos aproximadamente de un 50 % de  $C_nH_m$ , principalmente metano, un 25 % de  $CO_2$ , y el resto de  $CO$  y  $H_2$ ) y de algo de nitrógeno. No hay indicios de que exista una correlación entre el porcentaje de sustancias volátiles y la especie de madera utilizada.

La FAO (1983) indica que la sustancia volátil en el carbón vegetal puede variar desde un tope del 40 %, ó más, hasta un 5 %, ó menos. Y Earl (1975) complementa en ese sentido que ésta, varía en proporción inversa a la temperatura de carbonización. Marcos (1989) indica que los productos volátiles se forman principalmente a partir de la celulosa y las

hemicelulosas, que no producen nada más que del 8 al 15 % del carbón vegetal.

Marcos (1989) comenta que la velocidad de calentamiento de la carga a carbonizar induce la conversión del combustible en productos volátiles. Y Bravo (1995) llama la atención a que debe tenerse en cuenta que los más bajos contenidos de volátiles en los carbones es indicativo de mejor calidad. El carbón vegetal puede reabsorber los alquitranes y los ácidos piroleñosos con el lavado (lluvia). Por ello, el carbón vegetal puede ser bien quemado pero, por este motivo, tener un elevado contenido de sustancia volátil. Los ácidos reabsorbidos hacen que el carbón se vuelva corrosivo, provocando la descomposición de las bolsas de yute, lo que es un problema durante el transporte; y además, no tiene una combustión limpia (FAO, 1983).

Pérez y Compean (1989) comentan que el carbón vegetal con mucha materia volátil se enciende fácilmente pero al quemar produce humo. En cambio la FAO (1983) abunda al respecto y comenta que el carbón vegetal de pocos volátiles tiene dificultades al encenderse y su combustión es muy limpia. Un buen carbón vegetal comercial puede tener un contenido de sustancia volátil neta (libre de humedad) del 30 % aproximadamente. El carbón con mucha sustancia volátil es menos quebradizo que el carbón común de fuerte combustión con poco volátil, por lo que produce menos cisco durante el transporte y los manipuleos. Es también más higroscópico y tiene por lo tanto un mayor contenido de humedad natural.

#### **f. Cenizas.**

Pacheco (2005) describe a las cenizas como al residuo inorgánico que resta después de la combustión completa del carbón. Son sustancias minerales presentes en la madera original, recogidos como contaminantes del suelo. Este contenido varía entre 0,5 a más del 5 % dependiendo de la madera, la cantidad de corteza y los contaminantes de tierra y arena.

Marcos (1989) y Earl (1975) comparten la opinión de que el contenido de cenizas, es directamente proporcional a la cantidad de materia inorgánica de la madera original y es lo que quedaría si la carga de madera fuera incinerada hasta peso constante. Las cenizas constan de una fracción soluble y una insoluble; la parte insoluble inorgánica, constituida principalmente de sílice, no afecta normalmente a cualquier proceso industrial más que por la pérdida de valor calorífico que representa, en cambio los constituyentes solubles inorgánicos pueden presentar problemas para ciertos procedimientos industriales, en cuyo caso el usuario puede estipular que el carbón vegetal tenga un contenido máximo de cenizas.

Entre diferentes partes de un árbol se encuentran pocas diferencias en el contenido de cenizas, pero por lo general, la corteza carbonizada tiene un porcentaje muy alto. Por lo que el carbón vegetal producido con corteza por contener alto contenido de cenizas no serviría para la industria del cemento (Earl, 1975).

La FAO (1983), Pérez y Compean (1989) comparten el comentario de que el contenido de cenizas en el carbón vegetal varía desde alrededor del 0.5 % a más del 5 %, dependiendo de la especie de madera, la cantidad de corteza incluida con la madera en el horno y la cantidad de contaminación con tierra y arena. Típicamente, un pedazo de buen carbón vegetal tiene un contenido de cenizas de alrededor del 3 %.

#### **1.2.9. Calidad de carbón vegetal.**

La calidad del carbón de leña y su producción dependen, entre otros factores, de la calidad de la madera utilizada, que se define por un conjunto de propiedades químicas, físicas, mecánicas y anatómicas, generalmente interdependientes Corradi *et al.* (2012), Rojas (2014).

El mercado para el carbón vegetal, menos exigente desde el punto de vista de la calidad, es el doméstico. Las razones son que no puede medirse fácilmente

su performance, es mínimo el poder del consumidor como individuo, de especificar y de obtener carbón vegetal de buena calidad, y hay una cierta compensación posible entre el precio y la calidad que el consumidor familiar usa para tener resultados satisfactorios (FAO, 1983).

Para el consumo nacional, la calidad del carbón vegetal sólo se considera bajo ciertas características macroscópicas (observables a simple vista), tales como: el peso del mismo, que no esté húmedo, que no se desquebraje fácilmente para que no genere muchos finos (cisco), que tenga brillo, que no despida humos, que dure suficiente tiempo ardiendo y que tenga un tamaño aceptable (Sánchez, 1997). En México su comercialización se basa en conocimientos empíricos: especie, duración del encendido, producción de chispas y cenizas (Carrillo-Parra *et al.*, 2013).

En el caso del carbón vegetal para exportación, sí existen estándares y normas que regulen su calidad, siendo exigencias normativas según el destino, agrupándose dichos mercados generalmente, en bloques o mercados continentales, tales como: el Asiático, el Europeo y el de América del Norte, principalmente (Tabla 2).

**Tabla 2.** Estándares de calidad del carbón vegetal de exportación requeridos en tres mercados continentales.

<b>Parámetros de calidad</b>	<b>Región del Japón</b>	<b>Europa</b>	<b>América del norte</b>
Contenido de humedad	7.5 % máximo	7 a 8 %	8 % máximo
Cenizas	4 % máximo	5 a 6 %	6 % máximo
Material volátil	12 % máximo	10 a 12 %	16 % máximo
Carbono fijo	76 % máximo	75 a 82 %	75 % mínimo

**Fuente:** Sánchez (1997).

### **1.2.10. Norma Internacional ASTM D 1762-84.**

#### **Método de prueba estándar para Análisis Químico de Carbón de Madera.**

Este método de ensayo cubre la determinación de humedad, materia volátil y cenizas en carbón hechos de madera. El método es aplicable a grumos y briquetas y está diseñado para la evaluación de la calidad del carbón. El método de ensayo emplea equipos que se encuentran en la mayoría de laboratorios y está adaptado para el análisis de rutina de un gran número de muestras.

El método consiste en triturar la muestra de manera especificada, la humedad se determina como la pérdida de peso en un horno de secado a 105 °C, la materia volátil se determina como la pérdida de peso a 950 °C en condiciones especificadas, las cenizas se determinan como el residuo después de quemar hasta peso constante a 750 °C; Encontrándose de manera más detallada en la metodología.

### **1.2.11. Usos del carbón:**

Patiño (1989) expone que el carbón vegetal puede ser aprovechado para uso doméstico, para la elaboración de carbón activo y, también como en Brasil, en metalurgia, en altos hornos y en hornos para metales no ferrosos ya sea como combustible y simultáneamente como reductor.

#### **a. Carbón para uso doméstico.**

Brito y Barrichelo (1981) citados por Patiño (1989) concuerdan que el carbón vegetal para uso doméstico, debe ser suave, fácilmente inflamable, no estallar y emitir el mínimo de humos posible. Marcos (1989) comenta que el uso doméstico más tradicional del carbón vegetal ha sido el energético. Se ha utilizado para calentar el hogar y los alimentos.

#### **b. Carbón metalúrgico.**

Brito y Barrichelo (1981) citados por Patiño (1989) señalan que el carbón vegetal es utilizado en la reducción de mineral de fierro en altos hornos,



fundición y otros. La preparación de este tipo de carbón demanda técnicas más elaboradas, la carbonización debe conducirse a altas temperaturas (mínimo 650 °C) y un proceso de larga duración.

Chevrand (s/f) citado por Patiño (1989) indica que Brasil es el país en el cual se utilizan los mayores volúmenes de carbón vegetal en la industria siderúrgica, en la cual el consumo de energía presenta una demanda del orden de 7 a 10 % del consumo total de energía del país. Debe señalarse que casi el 50 % de la energía consumida en esta industria fue importada.

Patiño (1989) señala que el carbón vegetal, dentro de la industria siderúrgica, se puede utilizar como combustible o como reductor, ya sea en trozos o en polvo o aún en este último caso, se puede agregar mediante inyecciones a los procesos de los altos hornos.

#### **c. Carbón para gasógeno.**

Brito y Barrichelo (1981) citados por Patiño (1989) indican que el carbón vegetal también se utiliza para generar gas pobre que puede tener varios usos, entre ellos generación de energía eléctrica y secado de granos.

#### **d. Carbón activado.**

Patiño (1989) indica que el carbón activado es un absorbente universal de uso muy definido y desde su introducción al principio del siglo 20, su empleo se ha incrementado considerablemente debido a las nuevas aplicaciones encontradas. Hasta 1960, la mayoría de los carbones activados fabricados se consumían para el refinamiento del azúcar y tratamiento de aguas. En la década de los años setentas se aceleraron estudios para conocer más a fondo la naturaleza y las diversas aplicaciones de los carbones activados.

Brito y Barrichelo (1981) citados por Patiño (1989) mencionan que el carbón vegetal se usa en la decoloración de productos alimenticios, medicinal, desinfectantes, purificación de solventes, entre otros. Debe ser ligero y

poroso; para aumentar el poder absorbente se le pueden hacer ciertos tratamientos.

**e. Carbón para la Industria Química.**

Brito y Barrichelo (1981) citados por Patiño (1989) exponen que en este caso, las exigencias varían según el uso al que se destine, generalmente debe tener una buena pureza ligada a una buena reactividad química.

En la industria farmacéutica se utiliza como antiflatulante, debido a su gran poder de absorción; igualmente se emplea en plantillas desodorantes para absorber sudor; también se emplea en la absorción de sustancias tóxicas en el intestino (Marcos, 1989).

**f. Otros usos.**

Brito y Barrichelo (1981) citados por Patiño (1989) señalan que el carbón vegetal se usa como producto pulverizado utilizado en la industria cementera y en la sintetización y pelletización de minerales de hierro.

## II. MATERIALES Y MÉTODOS

### 2.1. Materiales, equipos y herramientas

**Tabla 3.** Lista de materiales (campo, gabinete y laboratorio), equipos, herramientas y programas utilizados.

<b>Materiales de Campo</b>	Formatos para toma de datos (Anexo 1)
	Cámara fotográfica digital (Sony 14.1 mega pixels)
	Wincha Métrica de 5 m
	Lapiceros
	Lápices
	Balanza
	Bolsas herméticas
	Bolsas de Alta densidad.
	Malla galvanizada.
	Plumón indeleble
<b>Materiales de Gabinete</b>	Programas Office 2010
	Útiles de escritorio
	Calculadora científica.
	Laptop (Toshiba Core i3 y HP Core i3)
	Fólder
	Hojas bond (80 gr.)
	GPS Garmin 76 Csx
	Higrómetro
<b>Materiales de Laboratorio</b>	Mortero
	Tamices N° 20( 850 micras) y 100 ( 150 micras)
	Crisoles de Porcelana con tapa
	Tijeras
	Envases herméticos
<b>Equipos de Laboratorio</b>	Mufla
	Horno

	Balanza analítica
	Campana desecadora con cloruro de calcio.
<b>Herramientas</b>	Rastrillo
	Pala cuchara
	Aserrinero
	Tijera metálica
	Alicate

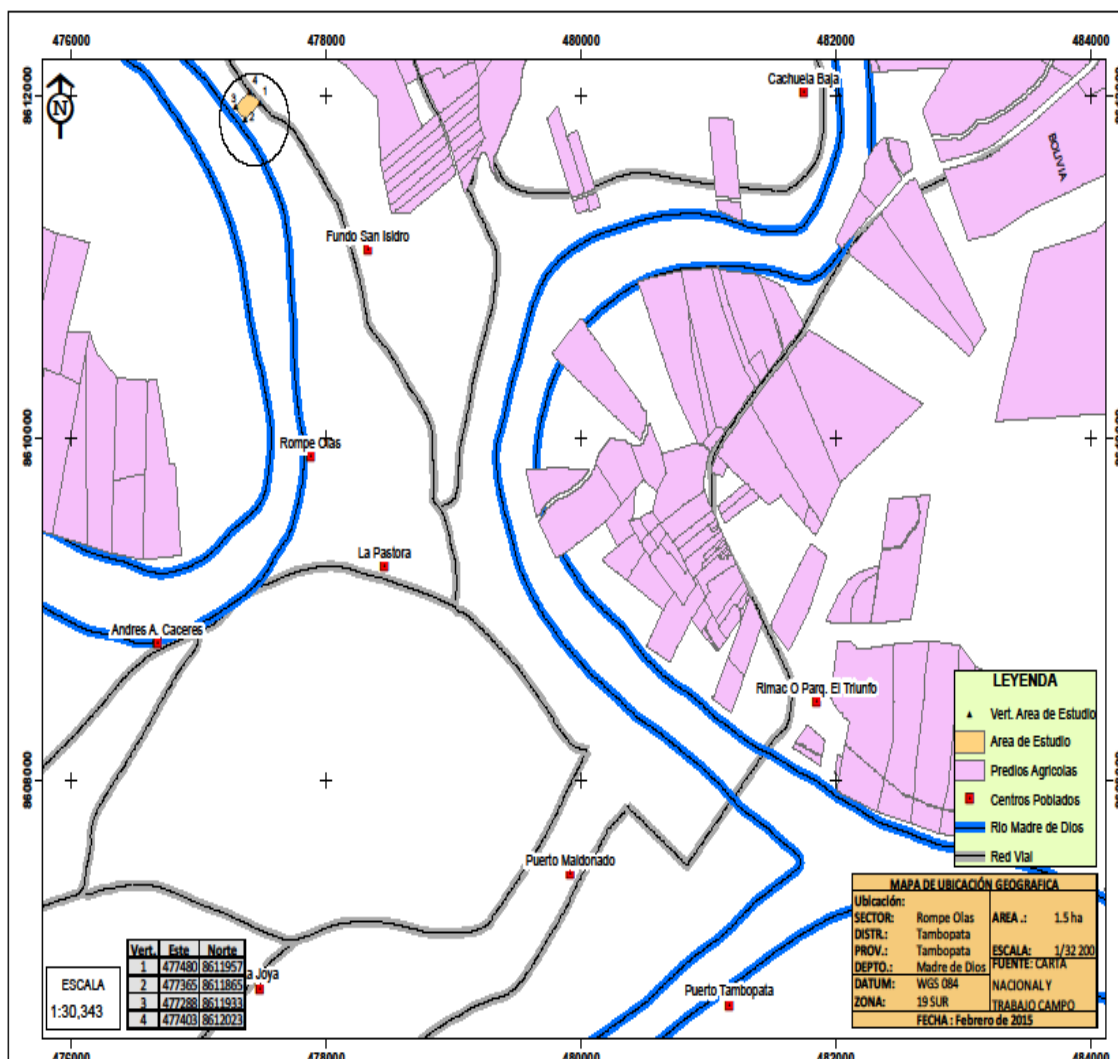
## 2.2. Metodología.

El método fue del tipo experimental, aplicando para el rendimiento el cociente del volumen de la muestra sobre el peso de la muestra carbonizada (Volumen/Peso) y la relación de pesos, para la determinación de la calidad del carbón se usó la norma ASTM D 1762-84.

### 2.2.1. Fase Campo

#### a. Ubicación del área de estudio.

El área de estudio se encuentra ubicado Puerto Maldonado, carretera a Otilia km 3.5, margen izquierda (Figura 2), “Asociación Carboneros de Rompeolas en Puerto Maldonado”, dicha área de estudio es de 1.5 ha.



**Figura 2.** Ubicación geográfica del área de estudio, Distrito de Tambopata, Provincia Tambopata en el Departamento de Madre de Dios.

### b. Preparación del sitio.

Se preparó un área bien drenada y bastante nivelada, para evitar la acumulación de agua y resguardando al proceso de carbonización, por otro lado el área seleccionada se encuentra cerca del residuo de madera, para facilitar el traslado y armado de los hornos.

### c. Obtención del Residuo.

Los residuos se obtuvieron de plantas de transformaciones de madera, que realizan el aprovechamiento de la especie *Dypterix odorata* (Aublet) Willd,

(Shihuahua), siendo esta especie la más aprovechada y por lo tanto del que mayor residuo como cantos y despuntes se encuentra.

#### **d. Formatos para recolección de datos.**

Se elaboró formatos para el registro de la información existente para el estudio del rendimiento y calidad del carbón vegetal, tomando en consideración, formato de campo “características de la madera”: El tipo de residuo, su ubicación dentro del horno, su contenido de humedad y sus dimensiones, como también el formato de laboratorio “carbón vegetal”: contenido de humedad, materia volátil, contenido de ceniza, carbono fijo, poder calorífico y densidad (Anexo 1).

#### **e. Determinación de la Muestra**

Se realizó los cálculos tomando en cuenta que tenemos una población conocida de 06 canter que equivale a 36656.928 kg de residuos, donde se podrá determinar el tamaño de la muestra necesaria para desarrollar el estudio sobre rendimiento y calidad de carbón vegetal, de la especie *Dypterix odorata* (Aublet) Willd (Shihuahua).

Para el cálculo de la muestra, se determinó teniendo una población conocida Arkin y Colton (1981)

$$n = \frac{N\sigma^2Z^2}{(N-1)e^2 + \sigma^2Z^2}$$

**Dónde:**

n = Tamaño de la muestra.

N = Tamaño de la población.

$\sigma$  = Desviación estándar de la población que, generalmente cuando no se tiene su valor, suele utilizarse un valor constante de 0.5.

Z = Valor obtenido mediante niveles de confianza. Es un valor constante, se tomó en relación al 95 % de confianza equivale a 1.96

e = Límite aceptable de error muestral que, generalmente cuando no se tiene su valor, suele utilizarse un valor que varía entre el 1 % (0.01) y 9 % (0.09), en este caso se utilizará un error muestral de 5 % (0.05), por ser un estudio al 95 % de confiabilidad.

❖ **Cálculo del tamaño de muestra total:**

$$n = \frac{36\,657 (0.5)^2 (1.96)^2}{(36\,657 - 1) 0.05^2 + (0.5)^2 (1.96)^2}$$

$$n = \frac{36\,657 (0.25) (3.8416)}{(36\,656) 0.0025 + (0.25) (3.8416)}$$

$$n = \frac{35\,205.3829}{91.64 + 0.9604}$$

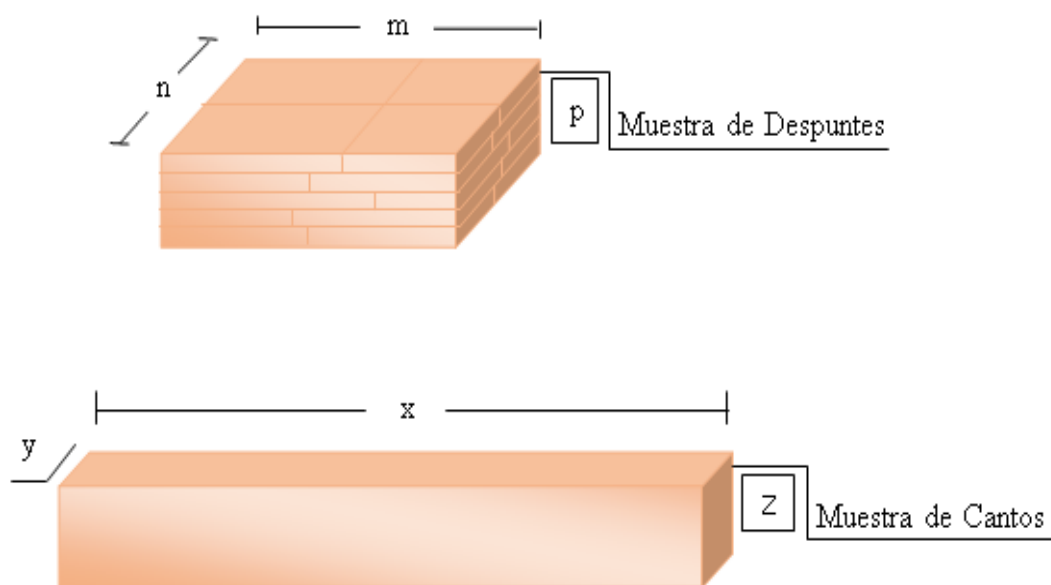
$$n = 380.1861$$

Según lo obtenido estadísticamente en el cálculo, se tomó para el estudio un tamaño muestral de 420.5 kg, dividiéndose la muestra para el proceso de carbonización en 18 unidades experimentales de la especie *Dypterix odorata* (Aublet) Willd (Shihuahuaco).

**f. Elección de la muestra.**

La muestra se eligió en función al tipo de residuo con un peso de 22 kg aproximadamente y se tuvo en consideración que los residuos cantos como despuntes fuesen lo más uniforme en su estructura, que no presenten deformaciones como: arqueado, alabeado, torcido, agrietado, etc. Con mayor énfasis en los residuos de despuntes ya que estos son piezas más

pequeñas y es necesario la agrupación de tantas como se necesite para cumplir con el peso de la muestra, evitando mayores sesgos en su cubicación (Figura 3). Una vez obtenida las muestras se procedió a la toma de datos de las mismas.



**Figura 3.** Características de las muestras de cantos y despuntes.

#### **g. Toma de datos de las Características de la muestra.**

Se procedió a tomar el contenido de humedad (CH %) de cada pieza utilizando el higrómetro y dimensiones de la misma, en caso de los despuntes las dimensiones fueron tomadas de la agrupación de piezas que conforma la muestra.

#### **h. Preparación de la muestra.**

Consistió en acomodar cada pieza, unas sobre otras, tratando de formar una figura rectangular, en el caso de los despuntes se agruparon varias piezas ya que estas son residuos pequeños en comparación con los cantos que necesito un máximo de 3 piezas, cabe resaltar que presentaron dimensiones distintas cada muestra. Para meter las muestras dentro del



horno fueron envueltas con malla galvanizada y amarrados con pedazos de alambre, para evitar que al momento de la carbonización las muestras se pierdan dentro del horno (Anexo 3).

- ❖ Cálculo del volumen de la muestra, Solano (1982), Meléndez (2005).

$$V = E \times A \times L$$

Dónde:

V = Volumen aserrado en centímetros cúbicos.

E = Espesor del residuo en centímetros.

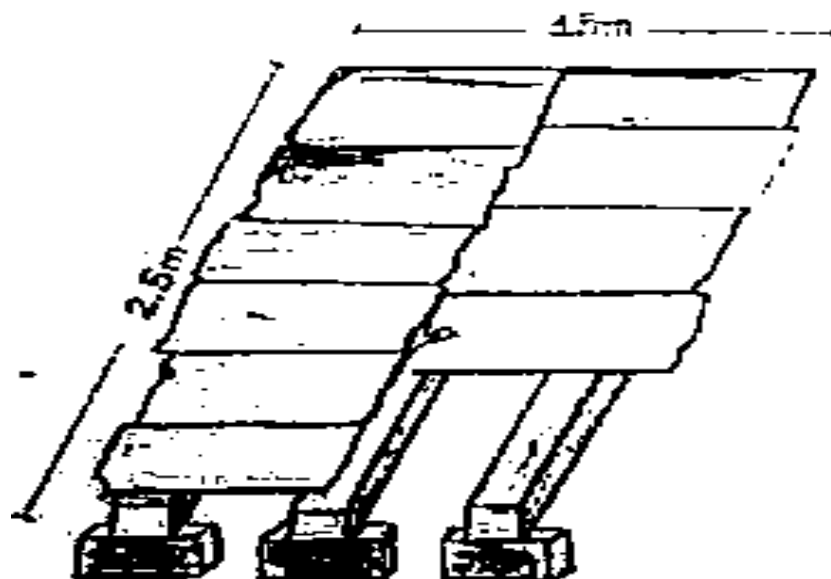
A = Ancho del residuo en centímetros.

L = Longitud del residuo en centímetros.

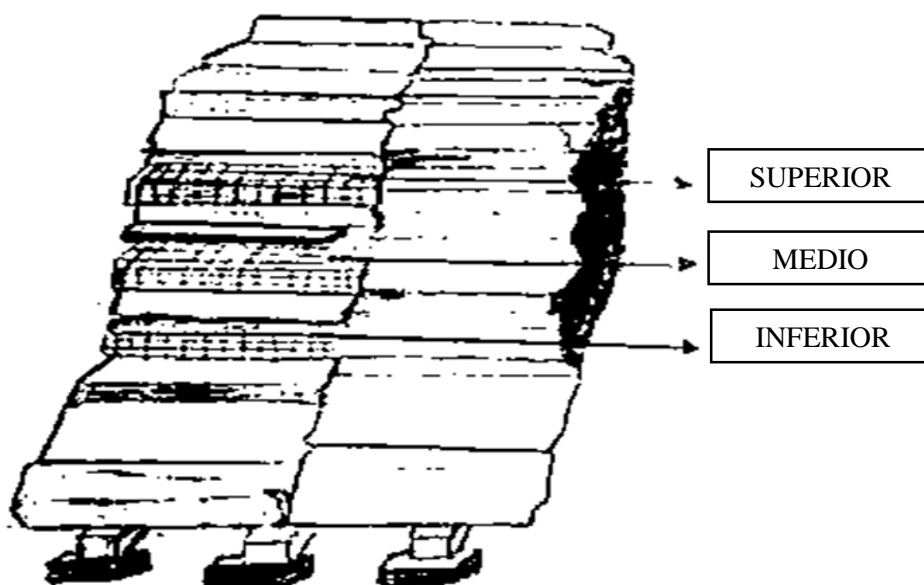
#### **i. Armado y encendido del horno.**

Los hornos se construyeron de forma horizontal, en 3 hornos se utilizó los residuos de cantos y en los otros 3 despuntes, dando la apariencia de una figura rectangular cada una. Se construyó una base de 10 cm sobre el suelo, utilizando el mismo residuo, el cual se armó colocando palos de 1.5 m de largo para formar pilas de 2.5 m a 3 m de largo y 1.5 m de ancho aproximadamente, formando dos filas paralelas, luego se ubicó perpendicularmente los residuos de 1.5 m de largo, formando una especie de cama o tarima, donde se apilaron de forma horizontal los residuos (Figura 4).

Las muestras se ubicaron en tres niveles en el horno: inferior, medio y superior, conforme el avance del armado (Figura 5).

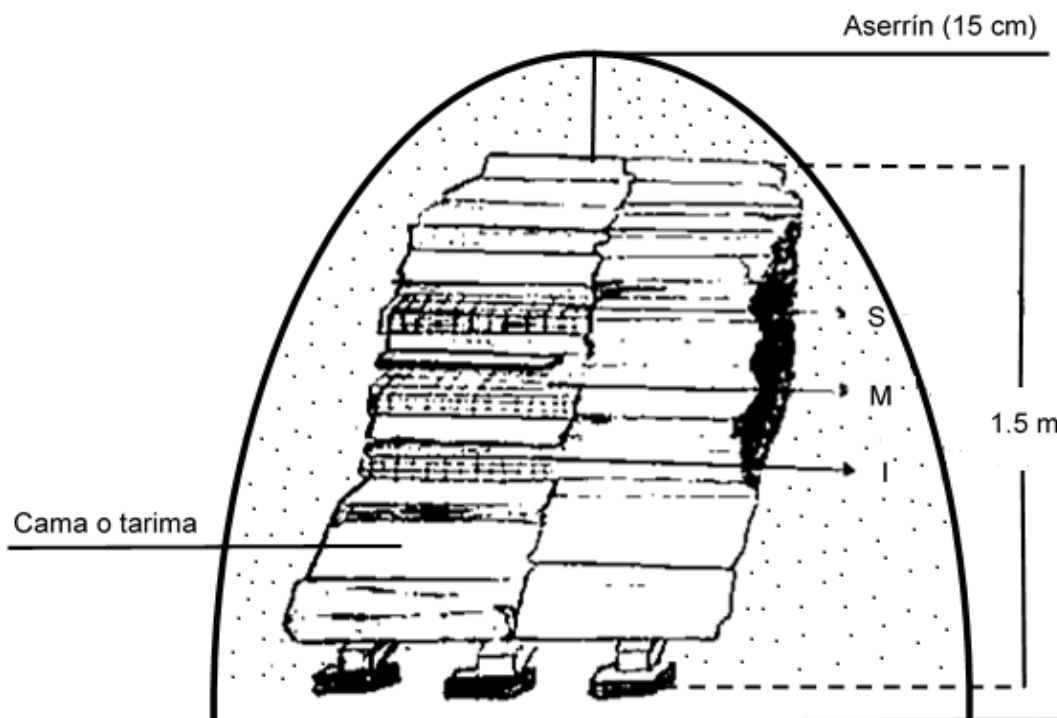


**Figura 4.** Cama o tarima donde se apilaron los residuos “se formaron conforme a los residuos que estuvieran al alcance”



**Figura 5.** El nivel de ubicación de las muestras en el horno (Superior, Medio, Inferior), fueron a una distancia de 40 cm aproximadamente, separados unos de otros con una capa de residuos de misma.

Después se colocó una capa de aserrín de 15 cm de espesor aproximadamente sobre el horno (Figura 6), a excepción en el punto de encendido, cabe aclarar que el punto de encendido tiene que estar en dirección al viento.



**Figura 6.** Esquema del Horno de Aserrín Tipo Horizontal

Posteriormente se hicieron los respiraderos en la base y en la parte superior del horno utilizando una vara de madera, formando aberturas de 5 cm de diámetro, que permitió su ventilación, enseguida se prosigue con el encendido, una vez que se encienda la llama debe arder por unos 5 minutos aproximadamente para luego taparlos con aserrín, después de cierto tiempo de carbonización, el humo se torna tenue y escaso, se taparon las entradas de aire con el aserrín. Esta actividad se repitió para los 6 hornos (3 de cantos y 3 de despuntes).

La obtención de las muestras carbonizadas fue de acuerdo al periodo de quemado de los hornos, en caso de los hornos de cantos todo el proceso de carbonización fue de 25 a 30 días aproximadamente, el inicio o primer

descargue se da en 10 a 15 días y en ella la primera muestra, luego continua quemándose hasta culminar con la carbonización de todo el horno y en ello las muestras. Para los hornos de despunte todo el proceso de carbonización fue de 20 días y el primer descargue en 7 días.

**j. Descargue del horno.**

El descargue del horno se realizó por partes, de 3 a 5 periodos de todo el proceso de carbonización, según el avance de la carbonización se va separando los primeros productos de carbón de todo el horno a altas temperaturas, para evitar pérdidas del producto y así obtener el mayor aprovechamiento posible. Aproximadamente después de 7 a 10 días de quemado, se procedió a descargar los primeros productos, que se sacó del horno a altas temperaturas con la ayuda de herramientas adecuadas para la actividad, hasta la obtención total de las muestras.

Posterior a ello se hizo enfriar a temperatura de ambiente, teniendo estricto cuidado que el carbón tenga contacto con el aserrín y así prevenir su combustión, evitando la disminución del rendimiento. Como el descargue del carbón se realiza a altas temperaturas siempre existen algunos piezas de carbón que continúan en combustión, para evitar pérdidas de producto se realiza un roseo mínimo de gotas de agua para contrarrestar la incineración, teniendo en cuenta que las muestras fueron separadas al instante de todo el producto de carbón y evitando realizar este proceso. Finalmente dejamos al aire libre por un plazo de 2 horas como mínimo, para facilitar la manipulación del carbón al momento del pesado y embolsado.

Este proceso se repitió hasta la finalización del quemado del horno.

**k. Embolsado del carbón vegetal.**

En esta etapa se clasifico según el tamaño, el cual es la forma empírica que conocen los productores de carbón vegetal de clasificarlo, donde se consiguió obtener carbón de 1ra, 2da, 3ra y 4ta categoría de cada horno.

Luego se pesaron las muestras (inferior, medio y superior) de los hornos de cantos y despuntes.

Las muestras una vez habiéndolas dejado enfriar y luego pesadas, fueron embolsadas 1 kg de cada una utilizando bolsas herméticas, posteriormente fueron llevadas al Laboratorio Ambiental Regional de la Universidad Nacional Amazónica de Madre de Dios.

✂ Todo el procedimiento de la carbonización se realizó con ayuda de dos productores de carbón vegetal de Rompeolas, ya que conocen las técnicas para la obtención del producto requerido.

#### **I. Rendimientos del carbón vegetal.**

✂ El rendimiento ( $\text{m}^3 \text{ t}^{-1}$ ) se determinó relacionando el volumen ( $\text{m}^3$ ) de cada muestra antes del proceso de carbonización, con su peso (t) una vez carbonizada Carrillo et al (2013)

$$R = V/P$$

Donde:

R = Rendimiento

V = Volumen de la muestra ( $\text{m}^3$ )

P = Peso de la muestra carbonizada (t)

✂ Rendimiento en función a su peso Panduro *et al* (2012).

$$\text{Rendimiento} = (\text{Peso de carbón/Peso seco de madera}) \times 100 \%$$

## 2.2.2. Fase Laboratorio

### Propiedades físicas químicas del carbón vegetal

Se determinó según las especificaciones de la Norma ASTM D – 1762 (Anexo 2). Para la evaluación de humedad, ceniza y materia volátil en el laboratorio, se determinó a partir de una muestra molida, utilizando dos tamices N° 100 (150 micras) y 20 (850 micras), para evitar que con la molienda se obtengan partículas menores a 100 (150 micras) tamiz, el cual contribuirían a errores de ser arrastrado fuera del crisol durante la rápida evolución de los gases al momento de la evaluación.

#### a. Contenido de humedad del carbón.

Antes de utilizar los capsulas, fueron lavadas y puestas en el horno a 100 °C por 1 hora para su respectiva esterilización, luego fueron enfriados en la campana desecadora por el espacio de 30 minutos, para así de tal forma poder pesarlas.

Posteriormente se colocaron en cada capsula (3 repeticiones) 5 g de cada muestra carbón vegetal obtenida de la carbonización, se determinó según las especificaciones de la Norma ASTM D–1762, Panduro *et al* (2012), que consistió en pesar muestras de carbón (A) de 5 g, secarlas en el horno regulada a 105 °C hasta peso constante y determinar el peso final (B) (Anexo 4), enseguida se aplicó la siguiente fórmula:

$$\text{Humedad \%} = [(A - B) / A] \times 100$$

Dónde:

A = gramos de muestra secada al aire, y

B = gramos de muestra después de secar a 105 ° C

### **b. Contenido de materias volátiles**

Para la determinación del Contenido de Material Volátil, al igual que el procedimiento del contenido de humedad, se procedió a esterilizar los crisoles con sus respectivas tapas, en un horno a 100 °C por 1 hora, luego fueron enfriados en la campana desecadora por el espacio de 30 minutos, para así de tal forma poder pesarlas.

Posteriormente se colocaron en cada crisol (3 repeticiones) 1 g de la muestra de carbón vegetal ya secado, con tapas en su lugar y conteniendo la muestra, los crisoles se colocaron dentro de la mufla a 950 °C y se dejó por un espacio de 6 minutos. Después de haber cumplido el tiempo se retiró los crisoles y se colocó en una campana desecadora, dejando enfriar por 1 hora y se pesaron (Anexo 4). Para tal efecto se calculó de acuerdo a la norma ASTM D – 1762, Panduro *et al* (2012) con la siguiente fórmula:

$$\text{Materia volátil \%} = [(B - C) / B] \times 100$$

Dónde:

C = gramos de muestra después de secar a 950 ° C

B = gramos de muestra después de secar a 105 ° C

### **c. Contenido de cenizas.**

Las muestras utilizadas para la determinación de materia volátil, se colocó dentro del horno de mufla a 750 °C durante 6 horas. Después de haber cumplido el tiempo se retiró y se colocó en una campana desecadora, dejando enfriar por 1 hora, hasta su incineración total, esto se comprobó observando el color blancuzco de las cenizas. Luego se retiró los crisoles con las cenizas y se colocó en la campana desecadora, dejando enfriar por 1 hora y se pesaron (Anexo 4).

El contenido de ceniza se determinó de acuerdo a la norma ASTM D - 1762, Panduro *et al* (2012), mediante la siguiente fórmula:

$$\text{Ceniza \%} = (D / B) \times 100$$

Dónde:

D = gramos de residuo

B = gramos de muestra después de secar a 105 ° C

**d. Determinación del carbono fijo.**

Para el cálculo del porcentaje del carbono fijo se determinó utilizando la formula siguiente Panduro *et al* (2012):

$$\text{Carbono Fijo \%} = 100 - (MV + C)$$

Dónde:

MV = contenido de materia volátil expresado en porcentaje.

C = contenido de cenizas expresado en porcentaje.

**e. Poder calorífico superior.**

La determinación del poder calorífico se realizó conociendo el porcentaje de contenido de humedad, materias volátiles, cenizas y carbono fijo. Para tal efecto se calculó de acuerdo a la fórmula de GOUTAL (Corado, 1984), Panduro *et al* (2012).

$$\text{PCS} = 82 \times \text{CF} + A \times \text{MV Kcal/kg}$$



Dónde:

PCS = poder calorífico superior

CF = porcentaje de carbono fijo

MV = porcentaje de materia volátil

A = coeficiente obtenido de la relación siguiente:

$$A = MV / (MV + CF)$$

MV = porcentaje de materia volátil

CF = porcentaje de carbono fijo

#### **f. Determinación de la densidad**

La densidad se determinó por el principio de Arquímedes, Panduro *et al* (2012) cuyo enunciado es: “Todo cuerpo sumergido en un fluido experimenta un empuje vertical, y dirigido hacia arriba, igual al peso del fluido desalojado. “ Se tomó una probeta de 150 ml, se midió 100 ml de agua y se introdujo un pedazo de carbón tomado al azar previamente pesado cuantitativamente, y se aplicó la relación matemática siguiente:

$$\text{Densidad} = \text{PSA} / V$$

Dónde:

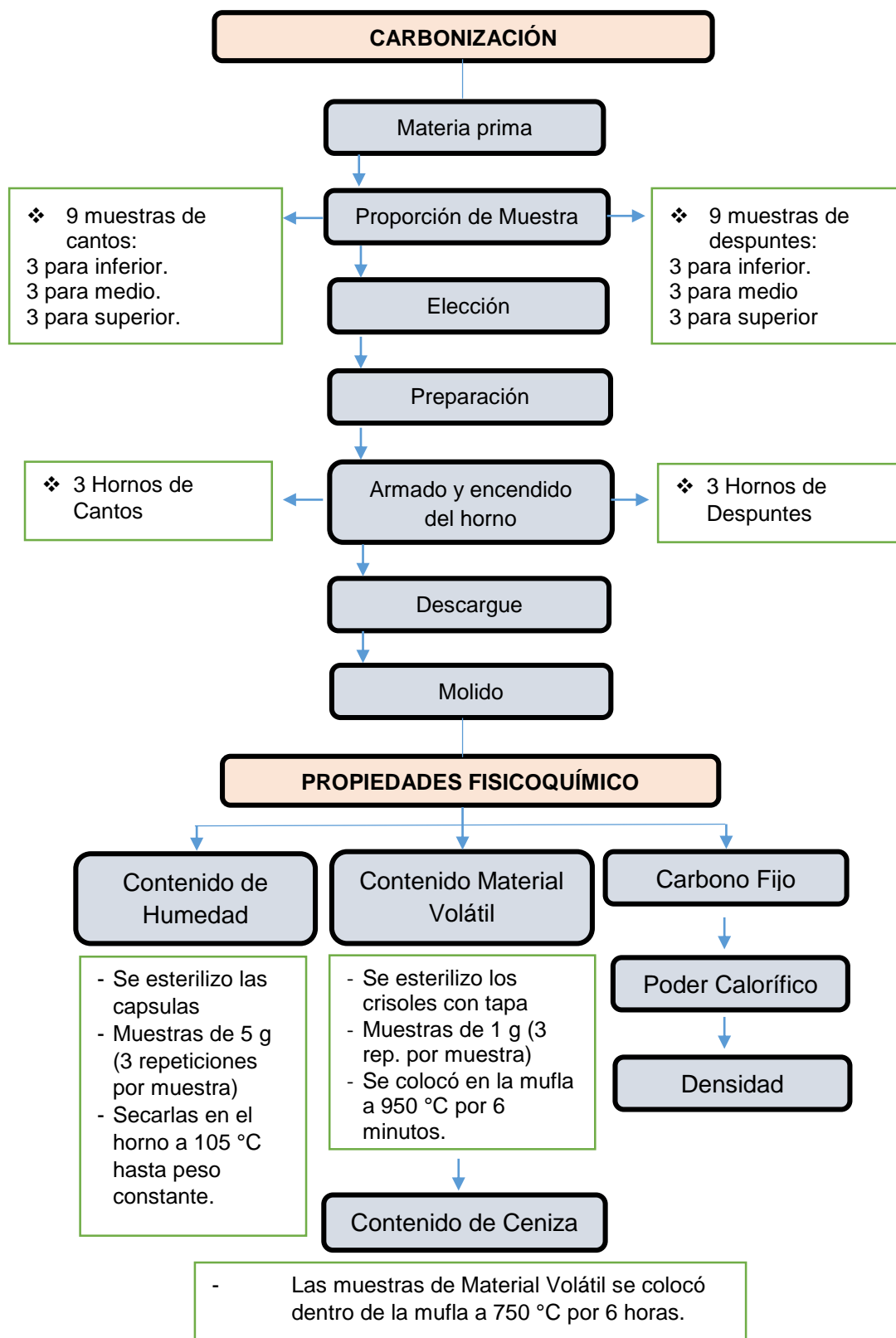
PSA es el peso seco al aire de la muestra, expresado en gramos;

V es el volumen de agua desalojado por el carbón, expresado en cm<sup>3</sup>

✂ Habiendo culminado con todo el proceso, desde la carbonización hasta la determinación Fisicoquímica del carbón vegetal (Figura 7), se prosiguió con el análisis de los datos.

### **2.2.3. Técnica de Análisis de datos**

Los resultados de los análisis inmediatos se trabajaron estadísticamente con un diseño factorial 2 x 3, siendo los factores los tipos de residuo (2) y el nivel de ubicación de la muestra en el horno (3), realizándose el análisis de varianza y para las diferencias significativas entre tratamientos ( $p < 0.05$ ), la comparación de medias según Tukey, utilizando el paquete estadístico "R".



**Figura 7.** Flujo de Procesos de obtención y evaluación del carbón vegetal

### III. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Los datos obtenidos en la evaluación del rendimiento y análisis ficoquímico del carbón vegetal a partir de residuos de *Dypterix odorata* (aublet) willd Shihuahuaco (Anexo 5), se llevaron al análisis de datos donde se aplicó el diseño factorial de 2 x 3, obteniendo lo siguiente:

#### 3.1. Rendimiento

El análisis de varianza del rendimiento mostró diferencias altamente significativas ( $p < 0.01$ ) entre tipos de residuos; en cambio, en los niveles dentro del horno y las interacciones (tipos de residuos x nivel) no hubo diferencias estadísticas (Tabla 4). El mejor valor se presentó en el residuo de despuntes que necesitó 2.613 m<sup>3</sup> para producir una tonelada de carbón con un rendimiento P/P de 34 %, mientras que los cantos requirió de 3.247 m<sup>3</sup> (Tabla 5).

Los rendimientos encontrados para ambos residuos son superiores en comparación al reportado por Canul (2012), quien establece un rendimiento en horno de fosa de 4.875 m<sup>3</sup> de leña para la especie *P. piscipula*, y 5.422 m<sup>3</sup> para la especie *L. castilloi* por tonelada de carbón en promedio. De la misma forma Rojas (2014) determinó un rendimiento en horno metálico de tambor tipo japonés mejorado de 3.62 m<sup>3</sup> para producir una tonelada de carbón, en forma equivalente 1 m<sup>3</sup> de leña de *Eucalyptus camaldulensis* es capaz de producir 278.23 kg de carbón.

El alto rendimiento obtenido en este estudio comparado con lo citado por otros autores se puede atribuir a la metodología empleada para su determinación, a los taxa y a la forma y dimensiones de los residuos. Otro factor importante es el tipo de horno horizontal de aserrín empleado.

Según el tipo de residuo, el mayor rendimiento lo presentaron los despuntes, se puede atribuir a las dimensiones y/o tamaño de los residuos, generando que los despuntes presenten un proceso de carbonización corta a comparación de los cantos, que presentan mayor dimensión y por lo tanto necesitan más tiempo para la obtención del producto. También, a que los despuntes son residuos más densos ya que estos

son obtenidos del duramen, mientras los cantos de la albura. Una madera densa tiende a dar un carbón vegetal denso que es deseable FAO (1983), Ordaz (2003), de tal forma su densidad influye en el rendimiento, siendo mayor en un carbón producido con madera más densa.

**Tabla 4.** Análisis de Varianza del rendimiento ( $\text{m}^3 \text{t}^{-1}$ ) de carbón vegetal a partir de residuos de cantos y despuntes.

<b>FV</b>	<b>g.L.</b>	<b>SC</b>	<b>CM</b>	<b>F value</b>	<b>p value</b>	<b>Signif.</b>
Tipos de residuos (A)	1	1.81252	1.81252	9.5307	0.009412	**
Nivel (B)	2	0.21605	0.10802	0.568	0.581168	N.S.
Tipos de residuos*Nivel (AB)	2	0.0909	0.04545	0.239	0.791077	N.S.
Residuales	12	2.28214	0.19018			

Los valores obtenidos son atribuibles también a factores de operación del horno, como puede ser el acomodo de la leña dentro del horno y el control de la entrada y salida de aire en el proceso de carbonización, posteriormente influyendo en el contenido de material volátil.

El rendimiento del carbón producido en gran escala tiende a ser menor debido a una serie de características en cuanto a los parámetros para la carbonización, como la temperatura final, la velocidad de calentamiento, las dimensiones de las piezas de madera, y la humedad que afectan el proceso, como lo refieren Corradi (2012).

Se observó que el tipo de residuo interviene en el rendimiento, porque mientras más grandes sean las piezas más tiempo tomara ser carbonizadas y sus componentes evaporados, a piezas pequeñas la carbonización se llevara a cabo más rápidamente, de igual manera Rojas (1998) menciona que el tamaño de materia prima utilizada y el volumen a carbonizar fueron factores favorables para

obtener un rendimiento alto, entre más pequeñas sean las piezas a ser quemadas más rápidamente podrán ser calentadas y sus constituyentes evaporados y quemados, piezas grandes darán como resultado menor superficie de evaporación.

**Tabla 5.** Rendimiento de carbón vegetal ( $\text{m}^3 \text{t}^{-1}$ ) a partir de residuos de cantos y despuntes.

Tipos de Residuos	Madera			Rendimiento P/P <sup>1</sup> (%)	Rendimiento V/V <sup>2</sup> (%)	Rend. de 1m <sup>3</sup> de Residuo en kg de Carbón
	m <sup>3</sup> de residuo / ton carbón	CH (%)	Densidad anhidra ( $\text{gr cm}^{-3}$ )			
Despuntes	2.613 a	21.920 a	1.150 a	34.072 a	56.045 a	382.702
Cantos	3.247 b	18.276 a	1.221 a	25.472 b	46.835 b	307.977

<sup>1</sup> P/P Peso de la muestra antes de la carbonización/Peso de la muestra después de la carbonización.

<sup>2</sup> V/V Volumen de la muestra antes de la carbonización/Volumen de la muestra después de la carbonización.

Con la técnica de carbonización utilizada (horno artesanal de aserrín tipo horizontal) el mayor rendimiento obtenido presentan los despuntes (con 21.92 % de CH y densidad de  $1.15 \text{ gr cm}^{-3}$ ), con 34.072 % (P/P), 56.045 % (V/V) y un coeficiente de transformación residuo-carbón, equivalente 1m<sup>3</sup> a 382.702 kg. Según el estudio de Rendimiento en la producción carbón -método artesanal elaborado por la ATFFS Tumbes-Piura en el año 2003, un metro cubico de madera rolliza de la especie algarrobo rinde 364.90 kg de carbón.

### 3.2. Propiedades físicas-químicas del carbón vegetal

#### 3.2.1. Contenido de humedad (CH)

El análisis de varianza presentó diferencias significativas ( $p < 0.05$ ) entre tipos de residuos, independientemente de los niveles de ubicación dentro del horno y las interacciones (tipos de residuos por nivel) no hubo diferencias estadísticas (Tabla 6). Los valores medios del CH de ambos residuos se resumen en la Tabla

7. En la diferencia significativa entre tipos de residuo, se puede deducir que el tamaño y la forma del residuo influyen en la variación del contenido de humedad.

**Tabla 6.** Análisis de Varianza del contenido de humedad (%) de carbón vegetal a partir de residuos de cantos y despuntes.

<b>FV</b>	<b>g.l.</b>	<b>SC</b>	<b>CM</b>	<b>F value</b>	<b>p value</b>	<b>Signif.</b>
Tipos de residuos (A)	1	13.272	13.2716	4.9458	0.04611	*
Nivel (B)	2	0.032	0.0161	0.006	0.99401	N.S.
Tipos de residuos*Nivel (AB)	2	0.171	0.0854	0.0318	0.96874	N.S.
Residuales	12	32.201	2.6834			

Durante el proceso de carbonización, a menor dimensión del residuo la carbonización tiende a ser uniforme y el desprendimiento o pérdida de agua tiende a acelerarse obteniendo los productos de carbón en un tiempo más corto. Sin embargo los residuos de cantos son piezas más voluminosas que prolongan el proceso de carbonización, para que estos residuos puedan carbonizarse toda su estructura, donde la pérdida de agua tiende a retardarse. Generando en esta última una pérdida del producto.

El agua que queda en la madera que tiene que ser carbonizada, deberá ser evaporada en la fosa o en el horno, y esta energía deberá proporcionarse quemando parte de la misma madera, que podría ser transformada en carbón vegetal aprovechable. Patiño y Pezet (1992), Ordaz (2003).

**Tabla 7.** Valores promedios ( $\pm$  desviación estándar) de las propiedades Físico-químicas del carbón vegetal a partir de residuos de cantos y despuntes.

Propiedades Físicoquímicas	Tipos de Residuos	
	Cantos	Despuntes
Contenido de humedad (%)	4.508 $\pm$ 1.882 a <sup>1</sup>	2.790 $\pm$ 0.712 b
Material Volátil (%)	12.322 $\pm$ 6.264 a	22.868 $\pm$ 8.019 b
Contenido de cenizas (%)	1.711 $\pm$ 0.375 a	1.550 $\pm$ 0.461 a
Carbono Fijo (%)	85.967 $\pm$ 6.269 a	75.582 $\pm$ 7.803 b
Poder calorífico (kcal kg <sup>-1</sup> )	7051.166 $\pm$ 512.041 a	6203.627 $\pm$ 636.177 b
Densidad aparente (gr cm <sup>-3</sup> )	0.666 $\pm$ 0.043 a	0.707 $\pm$ 0.083 a

<sup>1</sup>Residuos con igual letra en cada propiedad fisicoquímica indica igualdad estadística ( $p < 0.05$ )

La comparación del CH del carbón vegetal producidos por ambos residuos, con los valores máximos permitidos por la norma Americana, Europea y mercado Japonés (Tabla 8), muestra que ambos se encuentran dentro de los valores requeridos por las normas.

**Tabla 8.** Propiedades Físicoquímicas del carbón vegetal a partir de residuos (cantos, despuntes) y los valores máximos permitidos por la norma de América del Norte, Europa y por el mercado Japonés.

Propiedades Físicoquímicas	Tipos de Residuos		Valor requeridos por Normas		
	Cantos	Despuntes	América del Norte	Europa	Región del Japón
Contenido humedad (%)	4.508	2.790	8 máx.	8 máx.	7.5 máx.
Material Volátil (%)	12.322	22.868	16 máx.	9 máx.	12 máx.
Contenido de cenizas (%)	1.711	1.550	6 máx.	8 máx.	4 máx.
Carbono Fijo (%)	85.967	75.582	75 mín.	75 máx.	76 máx.



### 3.2.2. Material volátil

El análisis de varianza si evidenció diferencias significativas ( $p < 0.05$ ) entre tipos de residuos, mas no en los niveles dentro del horno e interacciones (Tabla 9). El porcentaje de Material Volátil de Cantos es 12.322 % y Despunte 22.868 %, estos resultados son superiores a los valores máximos permitidos por las normas Europea y Japonesa a excepción de la Americana, siendo el residuo de cantos el único que cumple los estándares de calidad para América del Norte (Tabla 8).

Según Siddique (2008), Carrillo et al. (2013) cantidades altas de material volátil indican que el proceso de carbonización fue heterogéneo y se realizó con temperaturas bajas; por lo tanto, los alquitranes no se volatilizaron durante el proceso y serán liberados cuando se lleve a cabo la combustión del carbón.

Conforme aumenta el porcentaje de material volátil, se incrementan el rendimiento (Bustamante-García et al., 2013) citado por Carrillo et al (2013).

Para reducir el material volátil en el proceso de carbonización, en un horno tipo horizontal, se requiere elevar la temperatura del horno, por el cual necesitaríamos aumentar el sistema de aireación; sin embargo tendríamos como resultado un bajo rendimiento.

**Tabla 9.** Análisis de Varianza del material volátil (%) de carbón vegetal a partir de residuos de cantos y despunte.

FV.	g.L.	SC	CM	F value	p value	Signif.
Tipos de residuos (A)	1	500.44	500.44	8.7175	0.01209	*
Nivel (B)	2	58.58	29.29	0.5102	0.61283	N.S.
Tipos de residuos*Nivel (AB)	2	80.96	40.48	0.7051	0.51342	N.S.
Residuales	12	688.88	57.41			

El periodo de carbonización para ambos residuos cantos como despuntes influye en la cantidad de material volátil, habiéndose corroborado según la técnica realizada en el presente estudio, donde los residuos de cantos necesitó un mayor tiempo de carbonización, obteniendo una menor cantidad de material volátil a diferencia de los despuntes y según los estándares de calidad de América del Norte los cantos son de mejor calidad. Dando lugar a una relación directa con respecto al rendimiento, a mayor contenido de materia volátil mayor es el rendimiento sin embargo tendríamos un carbón de baja calidad.

Del mismo modo Pérez y Compean (1989), determino que el contenido de materia volátil deja entrever básicamente el tiempo expuesto de la leña para su conversión en carbón, dicho de otra forma, cuando la temperatura de carbonización es alta y prolongado el tiempo de exposición, el contenido de volátiles es bajo; caso contrario sucede cuando la temperatura de carbonización es baja y el periodo en el horno es breve. Igualmente FAO (1983), señala que cuando la carbonización es prolongada y a alta temperatura, el contenido de volátiles es entonces bajo y cuando la temperatura de carbonización es baja y el período en el horno es breve, entonces el contenido de sustancia volátil aumenta.

Y Bravo (1995), llama la atención a que debe tenerse en cuenta que los más bajos contenidos de volátiles en los carbones es indicativo de mejor calidad.

### **3.2.3. Contenido de ceniza.**

El análisis de varianza mostró diferencias ( $p < 0.05$ ) entre las interacciones; no así, en el caso de tipos de residuos y niveles (Tabla 10). La mayor cantidad de ceniza presento la interacción cantos-superior 2.157 % existiendo diferencias estadísticas con cantos-medio 1.557 %, cantos-inferior 1.420 %, despunte-superior 1.373 %, despunte-medio 1.370 % (Tabla 11) el alto contenido de cenizas hace referencia a que en la parte superior del horno existe mayor combustión a causa del sistema de aireación, dando lugar a un menor contenido de materia volátiles, aumentando el carbono fijo y al mismo tiempo el contenido de ceniza. Como señala Guardado *et al* (2010) que a mayor cantidad de gases

volátil menor es la cantidad de carbón fijo y viceversa, y mientras más carbono fijo tenga mayor porcentaje de cenizas producirá.

Como lo refiere FAO (1983) el contenido de cenizas en el carbón vegetal varía desde alrededor de un 0.5 % a más del 5 %, dependiendo de la especie de madera, la cantidad de corteza incluida con la madera en el horno y la cantidad de contaminación con tierra y arena.

Los resultados demuestran que el contenido de cenizas del carbón vegetal de ambos residuos cantos (1.711 %) y despuntes (1.550 %) fue menor al porcentaje máximo permitido por la norma América del Norte, Europa y el mercado Japones (Tabla 8).

El porcentaje de ceniza nos indica en si la porción de materia que no puede ser quemada después de que el carbón ha sido totalmente calcinado, existiendo una relación directa con el carbono fijo.

**Tabla 10.** Análisis de Varianza del Contenido de Cenizas (%) de carbón vegetal a partir de residuos de cantos y despuntes.

<b>Fv.</b>	<b>g.L.</b>	<b>SC</b>	<b>CM</b>	<b>F value</b>	<b>p value</b>	<b>Signif.</b>
Tipos de residuos (A)	1	0.11681	0.1168	1.053	0.32505	N.S.
Nivel (B)	2	0.28268	0.1413	1.2742	0.31491	N.S.
Tipos de residuos*Nivel (AB)	2	1.21114	0.6056	5.4594	0.0206	*
Residuales	12	1.33107	0.1109			

El contenido de ceniza nos indica la porción de materia que no puede ser quemada después de que el carbón ha sido totalmente incinerado, por tal razón el carbón con bajo contenido de ceniza es mejor, es decir que casi toda la masa

de carbón es consumible, obteniéndose un mejor rendimiento para el proceso de combustión.

**Tabla 11.** Valor promedio de cenizas de acuerdo al nivel de ubicación (%).

<b>Grupos</b>	<b>Tipos de Residuos*Nivel en el horno (A*B)</b>	<b>Media (%)</b>
a	Cantos : Superior	2.157
a b	Despunte : Inferior	1.907
b	Cantos : Medio	1.557
b	Cantos : Inferior	1.420
b	Despunte : Superior	1.373
b	Despunte : Medio	1.370

#### **3.2.4. Carbono fijo.**

Los resultados indican que si hubo diferencias significativa ( $p < 0.05$ ) entre tipos de residuos, mas no en los niveles y en las interacciones (Tabla 12), teniendo para el carbón a partir de cantos 85.967 % y despunte 75.582 % de carbono fijo (Tabla 7). El porcentaje de carbono fijo en los cantos y despunte se encuentran dentro de los estándares de calidad requerido por América del Norte, mientras al mismo tiempo ambos no cumplen con los estándares de calidad de Europa, y para el mercado Japonés únicamente los despunte cumplen (Tabla 8).

Con estos resultados se evidencia la relación inversa entre la cantidad de material volátil y carbono fijo. Por su parte Bravo (1995), comenta que las mejores calidades del carbón vegetal se tienen con los más altos contenidos de carbono fijo.

Para incrementar los valores de carbón fijo se debe elevar la temperatura de carbonización, condición que es manejada en hornos de aserrín de tipo

horizontal. Como expresa Ordaz (2003) una carbonización lenta y a alta temperatura se eliminará casi todas las sustancias volátiles y entonces el contenido fijo de carbono es alto (del 90 % aproximadamente); la carbonización rápida y a baja temperatura dará un carbón vegetal con más sustancias volátiles, y por consiguiente, con un menor contenido fijo de carbono Ordaz (2003)

**Tabla 12.** Análisis de Varianza del Carbono Fijo (%) de carbón vegetal a partir de residuos de cantos y despuntes.

Fv.	g.L.	SC	CM	F value	p value	significación
Tipos de residuos (A)	1	485.27	485.27	8.6731	0.01226	*
Nivel (B)	2	50.79	25.39	0.4539	0.64563	N.S.
Tipos de residuos*Nivel (AB)	2	79.28	39.64	0.7085	0.51188	N.S.
Residuales	12	671.41	55.95			

El carbono fijo del carbón vegetal de ambos residuos fluctúa entre el 70 % al 90 %, dando a entender que el carbón vegetal en su mayoría está compuesto por carbono. Como lo refiere Ordaz (2003) el contenido de carbono fijo en el carbón vegetal varía desde un mínimo del 50 % hasta uno elevado del 95 %, en cuyo caso el carbón vegetal consiste principalmente en carbono.

### 3.2.5. Poder calorífico.

Los resultados indican que hubo diferencias significativas ( $p < 0.05$ ) entre tipos de residuos para el poder calorífico (Tabla 13). Los resultados muestran que el mayor poder calorífico se obtuvo de los cantos con 7051.166 kcal/kg, mientras los despuntes mostraron 6203.627 kcal/kg (Tabla 7), ya que en este tipo de residuo las concentraciones de carbono fijo son elevadas y esta guarda relación directa con el poder calorífico, es decir a mayores concentraciones de carbono

fijo mayor será el poder calorífico. En lo anterior coincide con Marcos (1989) y Ordaz (2003), el resultado de los valores de poder calorífico, son afectados por la cantidad de carbono fijo presente en el carbón vegetal.

**Tabla 13.** Análisis de Varianza del Poder Calorífico (%) de carbón vegetal a partir de residuos de cantos y despuntes.

Fv.	g.l.	SC	CM	F valué	p value	significación
Tipos de residuos (A)	1	3232452	3232452	8.6762	0.01225	*
Nivel (B)	2	337279	168639	0.4526	0.64637	N.S.
Tipos de residuos*Nivel (A:B)	2	527180	263590	0.7075	0.51232	N.S.
Residuales	12	4470801	372567			

Los valores de poder calorífico, no son requeridos por ninguna de las normas internacionales tomadas en cuenta en la investigación.

El poder calorífico del carbón de ambos residuos se aproximan al promedio referido por Marcos (1989) donde presenta un valor promedio de 7000 kcal /kg.

Los resultados obtenidos para poder calorífico del carbón vegetal se encuentran próximos a lo encontrado por Panduro (2012) un poder calorífico de 7108.97 kcal/kg de la especie *Apuleia leiocarpa* "Ana caspi". Mientras el valor encontrado en el carbón a partir de cantos son superiores y los despuntes se encuentran próximos a lo referido por Pacheco (2005) con 6700 kcal/kg.

### 3.2.6. Densidad aparente.

Los resultados indican que no hubo diferencias significativas entre tipos de residuos, niveles e interacciones (Tabla 14). Presentando el valor más alto los despuntes con 0.707 g cm<sup>-3</sup> (Tabla 7), lo que da entender, un horno con

temperaturas bajas produce un carbón vegetal más denso, obteniéndose altas concentraciones del material volátil como se refleja en el presente estudio.

También se puede relacionar que la densidad de la madera influye en la densidad del carbón, es decir, a mayor densidad de la madera existe mayor densidad del carbón vegetal, como lo señala Bravo (1995) y Ordaz (2003), no descartando otros factores que también intervienen como la operacionalidad del horno, la técnica o la metodología que se utiliza durante el proceso de carbonización, como lo manifiesta Ordaz (2003) y Rojas (2014)

**Tabla 14.** Análisis de Varianza de la Densidad ( $\text{g cm}^{-3}$ ) de carbón vegetal a partir de residuos de cantos y despuntes.

<b>Fv.</b>	<b>g.L.</b>	<b>SC</b>	<b>CM</b>	<b>F value</b>	<b>p value</b>	<b>Significación</b>
Tipos de residuos (A)	1	0.00773	0.00773	1.7037	0.2163	<i>N.S.</i>
Nivel (B)	2	0.00553	0.00277	0.6098	0.5595	<i>N.S.</i>
Tipos de residuos*Nivel (A:B)	2	0.00987	0.00494	1.0878	0.368	<i>N.S.</i>
Residuales	12	0.05444	0.00454			

Los valores de densidad del carbón vegetal, no son requeridos por ninguna de las normas internacionales tomadas en cuenta en la investigación.

## CONCLUSIONES

El carbón vegetal elaborado con los residuos cantos y despuntes de la especie *Dypterix odorata* (aublet) willd (shihuahuaco), en horno artesanal de aserrín tipo horizontal presentó altos rendimientos en despunte, a diferencia con los cantos. Debido ha debido a factores que influyen en su carbonización como el tamaño de los residuos, la temperatura y tiempo de carbonización.

El rendimiento del carbón vegetal en los tres niveles de ubicación del horno no presento diferencias estadísticas significativas.

La relación existente entre el tipo de residuo por nivel de ubicación en el horno artesanal de aserrín tipo horizontal, no mostro diferencia significativa en rendimiento, y en las propiedades físico-químicas, a excepción del contenido de ceniza.

El carbón vegetal que satisface las exigencias de calidad de américa del norte es el carbón producido por los residuos de cantos sin embargo para Europa y región del Japón no cumplen los valores requeridos en material volátil y carbono fijo. Mientras los despuntes satisfacen la norma Americana y la región de Japón en contenido de humedad, contenido de ceniza y carbono fijo y para Europa el contenido de humedad y contenido de ceniza.

El Tipo de residuo de *Dypterix odorata* (aublet) willd (shihuahuaco) influye en el rendimiento y calidad del carbón vegetal producidos en horno artesanal.



## RECOMENDACIONES

Se recomienda llevar a cabo más estudios utilizando la misma tecnología de carbonización pero con diferentes especies forestales.

Se recomienda implementar un sistema de monitoreo de temperatura para llevar un proceso de carbonización con temperaturas controladas en el horno artesanal de aserrín tipo horizontal.

Mejorar las condiciones de almacenamiento de la madera para lograr una mejor homogenización de la humedad, además de tratar de reducirla al máximo en dicho almacenamiento.

Mejorar las condiciones de almacenamiento del carbón (producto final) para que no pierda sus propiedades y se deteriore.

Realizar estudios de carbonización utilizando tipos de aserrín (disco y cinta) para ver la eficiencia de cada una de ellas en función al rendimiento y calidad.

## BIBLIOGRAFÍA CONSULTADA.

Aldana F., Lauro A. (2002). Diccionario Ibalpe Enciclopédico. Ediciones Ibalpe, Mazatlán, Sinaloa, México. Pag. 1614.

A la Torre, E. (1992). Elaboración de carbón en hornos de Mampostería Amatepec, México.

Argueta, C. (2006). Descripción y análisis de dos métodos de producción de carbón vegetal en el estado de Tamaulipas. Tesis para Ingeniero Agrónomo, Universidad Autónoma Chapingo. México.

Arkin, H. y Colton, R. R. (1981). Métodos estadísticos. Ed. Continental. Pag. 341

Bravo, L. (1995). III Seminario Nacional sobre utilización de encinos Facultad de Ciencias Forestales. Universidad Autónoma de Nuevo León.

Camacho, A. (1987). Carbón vegetal. Perito de Montes. AITIM. Pag. 2

Canul, S. (2012). Evaluación del proceso de producción de carbón vegetal elaborado en horno tipo fosa con subproductos forestales de *Piscidia piscipula* (L.) sarg. y *Lonchocarpus castilloi* standl, Universidad Autónoma de Nuevo León. México.

Carrillo, A. Foroughbakhch, R. y Bustamante V. (2013). Calidad del carbón de *Prosopis laevigata* (Humb. & Bonpl. ex Willd.) M.C. Johnst. y *Ebenopsis ebano* (Berland.) Barneby & J.W. Grimes elaborado en horno tipo fosa, Revista de Ciencias Forestales. Vol. 4 Núm. 17 – México.

Confederación Peruana de la Madera. CPM. (2008). Compendio de Información Técnica de 32 Especies Forestales. 2° Edición Lima-Perú.

Corado, M. (1984). Determinación de la calidad gravimétrica de carbón vegetal, producido a partir de diferentes especies Forestales y en diferentes tipos de horno. Tesis para Ingeniero Agrónomo, Universidad de San Carlos de Guatemala-Guatemala.

Dancé, R. (2008). Estudio de viabilidad técnico- Económica para el uso de residuos, derivados de las industrias de aserrio y laminado en los departamento de Ucayali y Loreto pag. 144.

Earl, D. y Becario, E. (1975). Informe sobre el carbón vegetal. Organización de las Naciones Unidas para la agricultura y la alimentación. Roma, Italia.

Echenique, R. (1991). Estructuras de madera. Editorial Limusa. México, DF.

FAO (1983). Métodos Simples para fabricar carbón. Estudios Organización de las Naciones Unidas para la agricultura y la alimentación (FAO), Montes- Pag 41, 154

Gerencia Central de Administración (Enero de 2015). Caracterización del Departamento de Madre de Dios. Departamento de Estudios Económicos de la Sucursal Cusco, Sucursal Cusco del BCRP.

Guardado, M. Rodríguez, A. y Monge, L. (2010). Evaluación de la calidad del carbón vegetal producido en hornos de retorta y hornos metálicos portátiles en el salvador. Universidad centroamericana “José Simeón cañas”. El salvador.

Guyat, A. Velázquez D. y Manzanares, K. (2003). Obtención de carbón vegetal de los residuos de la industria Forestal, Instituto de Investigaciones Forestales. Cuba.

Marcos, F. (1989). El Carbón Vegetal. Propiedades y Obtención Ediciones Mundi-Prensa. Madrid, España. Pag. 117.

Morales, E. (1994). Técnicas en la Producción de Carbón a Base de Encino CIFAP-INIFAP, Campo Experimental Forestal, Durango, México.

Ordaz, J. (2003). Análisis de la calidad del carbón vegetal de encino producido en horno tipo colmena brasileño en Huayacocotla, Veracruz. Tesis para Ingeniero Forestal Industrial, Universidad Autónoma de Chapingo. México.

Pacheco, G. (2005). Evaluación del proceso de carbonización y calidad del carbón de acacia caven (mol.) mol. producido en hornos de barro, Tesis para Ingeniero Forestal, Universidad de Chile facultad de ciencias forestales.

Panduro, C. (2012). Estudio de la transformación química de la madera de diez especies maderables potenciales de bosques secundarios y primarios residuales. Lima-Perú.

Patiño, F. y Pezet, M. (1989). Producción de Carbón Vegetal en Tres Tipos de Hornos. Memorias de la Primera Reunión Nacional Sobre Dendroenergía. División de Ciencias Forestales. Chapingo, México.

Pérez M., Compean, G. (1989). Características físico-químicas y de producción en carbón de tres tipos de leñas de Durango. INIFAP-Durango. Memorias de la Primera Reunión Nacional Sobre Dendroenergía. División de Ciencias Forestales. Chapingo, México.

Prías J., Rojas C., Echeverry N., Fonthal G., Ariza H. (2011). Identificación de las variables óptimas para la obtención de carbón activado a partir del precursor *guadua angustifolia kunth*. Colombia.

Reynel C., Pennington R., Pennington T., Flores C., Daza A. (2003). Árboles útiles de la Amazonía Peruana, Pag. 22-26.

Rodríguez, E. (2011). Comparación de calidad en la producción de carbón vegetal entre la fosa de tierra y el horno de ladrillo, en la finca el plantel, tipitapa, masaya. Tesis de graduación, universidad nacional agraria. Nicaragua.

Rojas, E. (2014). Calidad de carbón vegetal de *eucalyptus camaldulensis* dehn producido en horno metálico de tambor tipo Japonés mejorado. Tesis para Ingeniero Forestal Industrial, Universidad Autónoma de Chapingo. México.

Sánchez R., L. (1997). Métodos de producción de carbón vegetal en México. Tesis de Doctorado. Pacific Western University. Los Ángeles California, EE. UU. Pag. 115.

Servicio Nacional Forestal y de Fauna Silvestre-SERFOR (2014). Anuario "Perú Forestal en Números año 2014". Lima-Perú. Pag. 33, 52.

Wolf, F. y Vogel E. (1985). Manual para la producción de carbón vegetal con métodos simples, Universidad Autónoma de Nuevo León. México.

## **ANEXOS**

**Anexo 1 Formato de Recoleccion de Datos.**

CARACTERISTICAS DE LA MADERA									
TIPO DE RESIDUO: CANTOS/DESPUNTES									
FECHA	UBICACIÓN HORNO	COD. MUESTRA	PROPIEDADES FISICAS			MEDIDAS DE CUBICACION (cm)			
			Peso (kg)	CH %		Espesor	Ancho	Largo	
				Cara	Lado				Punta

CARBÓN VEGETAL						
TIPO DE RESIDUO: CANTOS/DESPUNTES						
FECHA	COD. MUESTRA	Peso del crisol o capsula	Peso muestra (g)	PROPIEDADES FÍSICAS		
				CH %		Peso de Final (Capsula + muestra)
				Hora Inicial	Hora Final	

FECHA	COD. MUESTRA	Peso del crisol	Peso muestra (g)	PROPIEDADES FÍSICAS		
				MATERIA VOLATIL %		Peso de Final (Crisol + muestra)
				Hora Inicial	Hora Final	

FECHA	COD. MUESTRA	Peso del crisol	Peso muestra (g)	PROPIEDADES FÍSICAS		
				CONTENITO DE CENIZA %		Peso de Final (Crisol + muestra)
				Hora Inicial	Hora Final	



## Standard Test Method for Chemical Analysis of Wood Charcoal<sup>1</sup>

This standard is issued under the fixed designation D1762; the number immediately following the designation indicates the year of original adoption or, in the case of revision, the year of last revision. A number in parentheses indicates the year of last reapproval. A superscript epsilon ( $\epsilon$ ) indicates an editorial change since the last revision or reapproval.

### 1. Scope

1.1 This test method covers the determination of moisture, volatile matter, and ash in charcoal made from wood. The test method is applicable to lumps and briquets and is designed for the evaluation of charcoal quality. The test method employs apparatus that is found in most laboratories and is adapted to routine analyses of a large number of samples.

1.2 *This standard does not purport to address all of the safety concerns, if any, associated with its use. It is the responsibility of the user of this standard to establish appropriate safety and health practices and determine the applicability of regulatory limitations prior to use.*

### 2. Referenced Documents

2.1 *ASTM Standards:*<sup>2</sup>

D346 Practice for Collection and Preparation of Coke Samples for Laboratory Analysis

D410 Method for Sieve Analysis of Coal<sup>3</sup>

D3176 Practice for Ultimate Analysis of Coal and Coke

D3180 Practice for Calculating Coal and Coke Analyses from As-Determined to Different Bases

### 3. Summary of Method

3.1 The sample is ground in a specified manner and the moisture determined as loss in weight in a drying oven at 105°C. Volatile matter is determined as loss in weight at 950°C under specified conditions. Ash is determined as the residue after burning to constant weight at 750°C.

### 4. Significance and Use

4.1 Low quality wood and wood residues are used for wood charcoal. This test method is used for evaluating the charcoal to assess the methods of production and assist in developing new methods.

<sup>1</sup> This test method is under the jurisdiction of ASTM Committee D07 on Wood and is the direct responsibility of Subcommittee D07.01 on Fundamental Test Methods and Properties.

Current edition approved . Published April 2007. Originally approved in 1960. Last previous edition approved in 2001 as D1762 – 84 (2001). DOI: 10.1520/D1762-84R07.

<sup>2</sup> For referenced ASTM standards, visit the ASTM website, www.astm.org, or contact ASTM Customer Service at service@astm.org. For *Annual Book of ASTM Standards* volume information, refer to the standard's Document Summary page on the ASTM website.

<sup>3</sup> Withdrawn

### 5. Apparatus

5.1 *Mill*,<sup>4</sup> for grinding samples.

5.2 *Oven*, with automatic temperature control at  $105 \pm 1^\circ\text{C}$ .

5.3 *Muffle Furnace*, to control temperatures at  $750 \pm 5^\circ\text{C}$  and  $950 \pm 5^\circ\text{C}$ .

5.4 *Analytical Balance*, with a capacity of at least 100 g and a sensitivity of 0.1 mg.

5.5 *Containers*, airtight, such as screw-top bottles for storage of ground samples.

5.6 *Sieves*, as specified in Method D410.

5.7 *Crucibles*, porcelain, 41 by 37 mm with porcelain lids.

5.8 *Desiccator*, containing calcium chloride as drying agent.

### 6. Sample

6.1 *Sample Selection*—The sample shall be selected so as to be representative of all of the material contained in a lot. Sample selection shall be carried out in accordance with Practices D346, D3176, and D3180.

6.2 *Sample Preparation*—Samples will normally be air-dry charcoal lumps or briquets. Rainsoaked or wet samples shall be spread out to air-dry before carrying out the analysis. For purchase specifications, the moisture content of the charcoal, as received, shall be determined on samples ground to pass a No. 20 (850- $\mu\text{m}$ ) sieve, since excessive grinding will result in loss of moisture due to the generation of heat. For laboratory evaluation, moisture, ash, and volatile matter shall be determined on a sample ground as follows:

6.2.1 All of the selected sample shall be ground; no part of the sample shall be rejected. The sample shall be pulverized rapidly in a mill. Long grinding times shall be avoided because of generated heat which will cause loss of volatile material. Excessive grinding will produce a large amount of fine particles smaller than a No. 100 (150- $\mu\text{m}$ ) sieve. These fine particles contribute to errors of being swept out of the crucible during the rapid evolution of gases in the determination of volatile matter. Particles that will be retained on a No. 20 (850- $\mu\text{m}$ ) sieve shall not be used. Samples with the following sieve analysis have been found satisfactory:

<sup>4</sup> A Wiley Mill, size No. 2, with a 1-mm screen, or an equivalent mill has been found satisfactory for this purpose. If you are aware of alternative suppliers, please provide this information to ASTM International Headquarters. Your comments will receive careful consideration at a meeting of the responsible technical committee,<sup>1</sup> which you may attend.



Passing Sieve	Retained on Sieve	Sample, %
...	No. 20 (850- $\mu$ m)	0
No. 20 (850- $\mu$ m)	No. 40 (425- $\mu$ m)	14.5
No. 40 (425- $\mu$ m)	No. 60 (250- $\mu$ m)	18.7
No. 60 (250- $\mu$ m)	No. 80 (180- $\mu$ m)	7.0
No. 80 (180- $\mu$ m)	No. 100 (150- $\mu$ m)	3.4
No. 100 (150- $\mu$ m)	...	56.4

6.2.2 The ground sample shall be well mixed and stored in an airtight container.

## 7. Procedure

7.1 Make duplicate determinations.

7.2 *Moisture*—Heat the muffle furnace to 750°C and place previously ignited porcelain crucibles (Note 1) and covers in the furnace for 10 min. Cool the crucibles in a desiccator for 1 h. Weigh the crucibles and add to each approximately 1 g, weighed to the nearest 0.1 mg, of the ground sample. Place the samples in the oven at 105°C for 2 h. Place the dried samples in a desiccator for 1 h and weigh (Note 2).

NOTE 1—In practice, a crucible from a previous determination is used.

NOTE 2—The sample shall be considered oven-dry when the decrease in weight of consecutive weighings is 0.0005 g or less. Succeeding drying periods shall be not less than 1 h.

7.3 *Volatile Matter*—Heat the muffle furnace to 950°C. Preheat the crucibles used for the moisture determination, with lids in place and containing the sample, as follows: with the furnace door open, for 2 min on the outer ledge of the furnace (300°C) and then for 3 min on the edge of the furnace (500°C) (Note 3). Then move the samples to the rear of the furnace for 6 min with the muffle door closed. Watch the samples through a small peep-hole in the muffle door. If sparking occurs, results will be in error (Note 4). Cool the samples in a desiccator for 1 h and weigh.

NOTE 3—Individual nichrome wire baskets to hold the crucibles are convenient.

NOTE 4—If the sparking sample does not check the results of its nonsparking duplicate within  $\pm 0.5\%$ , the analysis shall be repeated.

7.4 *Ash*—Place the lids and the uncovered crucible used for the volatile matter determination, and containing the sample in the muffle furnace at 750°C for 6 h. Cool the crucibles with lids in place in a desiccator for 1 h and weigh. Repeat burning of the sample until a succeeding 1-h period of heating results in a loss of less than 0.0005 g.

## 8. Calculation and Report

8.1 Calculate the percentage of moisture in the sample as follows:

$$\text{Moisture, \%} = [(A - B)/A] \times 100 \quad (1)$$

where:

A = grams of air-dry sample used, and

B = grams of sample after drying at 105°C (7.2).

8.2 Calculate the percentage of volatile matter in the sample as follows:

$$\text{Volatile matter, \%} = [(B - C)/B] \times 100 \quad (2)$$

where:

C = grams of sample after drying at 950°C (7.3).

8.3 Calculate the percentage of ash in the sample as follows:

$$\text{Ash, \%} = (D/B) \times 100 \quad (3)$$

where:

D = grams of residue (7.4).

8.4 Report all results to the first decimal place. Values for duplicate determinations should agree within the following:

Constituent Determined	Permissible Differences Between Duplicates, %
Moisture	0.1
Volatile matter	0.5
Ash	0.1

## 9. Precision and Bias

9.1 There is currently no data available with which to develop a precision and bias statement.

## 10. Keywords

10.1 ash; charcoal; moisture; volatile matter

*ASTM International takes no position respecting the validity of any patent rights asserted in connection with any item mentioned in this standard. Users of this standard are expressly advised that determination of the validity of any such patent rights, and the risk of infringement of such rights, are entirely their own responsibility.*

*This standard is subject to revision at any time by the responsible technical committee and must be reviewed every five years and if not revised, either reapproved or withdrawn. Your comments are invited either for revision of this standard or for additional standards and should be addressed to ASTM International Headquarters. Your comments will receive careful consideration at a meeting of the responsible technical committee, which you may attend. If you feel that your comments have not received a fair hearing you should make your views known to the ASTM Committee on Standards, at the address shown below.*

*This standard is copyrighted by ASTM International, 100 Barr Harbor Drive, PO Box C700, West Conshohocken, PA 19428-2959, United States. Individual reprints (single or multiple copies) of this standard may be obtained by contacting ASTM at the above address or at 610-832-9585 (phone), 610-832-9555 (fax), or service@astm.org (e-mail); or through the ASTM website (www.astm.org). Permission rights to photocopy the standard may also be secured from the ASTM website (www.astm.org/COPYRIGHT/).*

### Anexo 3: Registro fotográfico de la carbonización.



Foto 1, 2, 3: Residuos de aserrío de cantos y despuntes de la especie shihuahuaco.



Foto 4, 5, 6: Selección y toma de datos de las características de las muestras.



Foto 7, 8, 9: Arreglo de las muestras para su ubicación dentro del horno.



Foto 10, 11, 12: Armado del horno y acomodo de las muestras.



Foto 13, 14, 15: Armado del horno y ubicación de las muestras.



Foto 16, 17, 18: Tapado del horno con aserrín .



Foto 19, 20, 21: Aperturación del sistema de aireación del horno .



Foto 22, 23, 24: Encendido y descargue del horno a altas temperaturas.

**Anexo 4: Registro fotográfico del análisis del carbón vegetal en el laboratorio.**

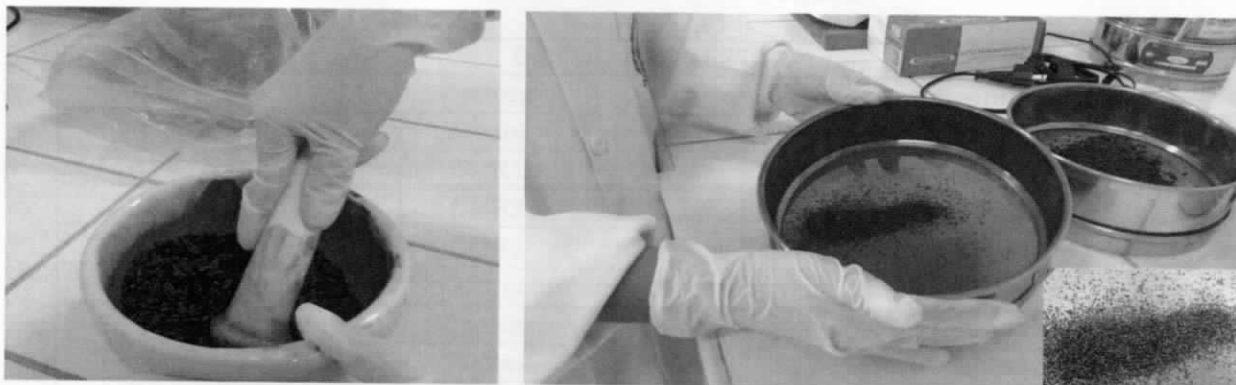


Foto 1, 2: Molienda y tamizado del carbón vegetal.



Foto 3, 4, 5: Esterilización de los crisoles y capsulas.



Foto 6, 7, 8: Proceso para la determinación del contenido de humedad.



Foto 9, 10, 11: Proceso para la determinación del material volátil y contenido de ceniza

**Anexo 5 Valores obtenidos para el análisis de datos del Rendimiento y Calidad del Carbón Vegetal**

<b>DISEÑO ESTADÍSTICO</b>						
	<b>Cantos</b>			<b>Despunte</b>		
	<b>Superior</b>	<b>Medio</b>	<b>Inferior</b>	<b>Superior</b>	<b>Medio</b>	<b>Inferior</b>
<b>R1</b>	CSR1	CMR1	CIR1	DSR1	DMR1	DIR1
<b>R2</b>	CSR2	CMR2	CIR2	DSR2	DMR2	DIR2
<b>R3</b>	CSR3	CMR3	CIR3	DSR3	DMR3	DIR3
<b>Contenido de humedad madera %</b>						
	<b>Cantos</b>			<b>Despunte</b>		
	<b>Superior</b>	<b>Medio</b>	<b>Inferior</b>	<b>Superior</b>	<b>Medio</b>	<b>Inferior</b>
<b>R1</b>	13.300	22.300	13.300	14.2778	18.7000	32.1833
<b>R2</b>	17.550	22.533	8.833	21.1353	29.6690	18.2857
<b>R3</b>	22.400	21.233	23.033	20.9500	21.0600	21.0200
<b>Promedio</b>	<b>17.750</b>	<b>22.022</b>	<b>15.056</b>	<b>18.788</b>	<b>23.143</b>	<b>23.830</b>
<b>Rendimiento m3/t</b>						
	<b>Cantos</b>			<b>Despunte</b>		
	<b>Superior</b>	<b>Medio</b>	<b>Inferior</b>	<b>Superior</b>	<b>Medio</b>	<b>Inferior</b>
<b>R1</b>	3.402	3.216	3.697	3.510	2.831	2.330
<b>R2</b>	3.531	3.216	3.617	2.515	2.532	2.174
<b>R3</b>	2.976	2.804	2.768	2.401	2.132	3.089
<b>Promedio</b>	<b>3.303</b>	<b>3.079</b>	<b>3.360</b>	<b>2.809</b>	<b>2.499</b>	<b>2.531</b>
<b>Rendimiento %</b>						
	<b>Cantos</b>			<b>Despunte</b>		
	<b>Superior</b>	<b>Medio</b>	<b>Inferior</b>	<b>Superior</b>	<b>Medio</b>	<b>Inferior</b>
<b>R1</b>	23.256	25.000	23.750	27.273	33.333	34.091
<b>R2</b>	25.000	25.000	22.727	36.364	33.333	40.889
<b>R3</b>	27.083	28.261	29.167	34.091	40.000	27.273
<b>Promedio</b>	<b>25.113</b>	<b>26.087</b>	<b>25.215</b>	<b>32.576</b>	<b>35.556</b>	<b>34.084</b>
<b>Contenido de humedad carbón vegetal %</b>						
	<b>Cantos</b>			<b>Despunte</b>		
	<b>Superior</b>	<b>Medio</b>	<b>Inferior</b>	<b>Superior</b>	<b>Medio</b>	<b>Inferior</b>
<b>R1</b>	3.008	2.823	2.160	3.520	2.971	3.133
<b>R2</b>	6.224	6.466	7.723	1.958	1.888	1.767
<b>R3</b>	4.101	4.099	3.965	3.421	3.373	3.082
<b>Promedio</b>	<b>4.444</b>	<b>4.463</b>	<b>4.616</b>	<b>2.966</b>	<b>2.744</b>	<b>2.661</b>
<b>Contenido de material molátil %</b>						
	<b>Cantos</b>			<b>Despunte</b>		
	<b>Superior</b>	<b>Medio</b>	<b>Inferior</b>	<b>Superior</b>	<b>Medio</b>	<b>Inferior</b>
<b>R1</b>	14.760	9.200	9.200	12.310	22.330	33.090
<b>R2</b>	7.840	8.310	6.480	22.450	28.720	18.440
<b>R3</b>	11.570	17.350	26.190	23.840	33.330	11.300
<b>Promedio</b>	<b>11.390</b>	<b>11.620</b>	<b>13.957</b>	<b>19.533</b>	<b>28.127</b>	<b>20.943</b>
<b>Contenido de ceniza %</b>						
	<b>Cantos</b>			<b>Despunte</b>		
	<b>Superior</b>	<b>Medio</b>	<b>Inferior</b>	<b>Superior</b>	<b>Medio</b>	<b>Inferior</b>
<b>R1</b>	2.30	1.76	1.15	1.51	1.57	1.29
<b>R2</b>	2.06	1.44	1.56	1.28	1.36	2.69
<b>R3</b>	2.11	1.47	1.55	1.33	1.18	1.74
<b>Promedio</b>	<b>2.157</b>	<b>1.557</b>	<b>1.420</b>	<b>1.373</b>	<b>1.370</b>	<b>1.907</b>

<b>Carbono fijo %</b>						
	<b>Cantos</b>			<b>Despunte</b>		
	<b>Superior</b>	<b>Medio</b>	<b>Inferior</b>	<b>Superior</b>	<b>Medio</b>	<b>Inferior</b>
<b>R1</b>	82.940	89.040	89.650	86.180	76.100	65.620
<b>R2</b>	90.100	90.250	91.960	76.270	69.920	78.870
<b>R3</b>	86.320	81.180	72.260	74.830	65.490	86.960
<b>Promedio</b>	<b>86.453</b>	<b>86.823</b>	<b>84.623</b>	<b>79.093</b>	<b>70.503</b>	<b>77.150</b>
<b>Poder calorífico kcal/k</b>						
	<b>Cantos</b>			<b>Despunte</b>		
	<b>Superior</b>	<b>Medio</b>	<b>Inferior</b>	<b>Superior</b>	<b>Medio</b>	<b>Inferior</b>
<b>R1</b>	6803.310	7302.142	7352.156	7068.299	6245.266	5391.933
<b>R2</b>	7388.828	7401.201	7541.147	6259.245	5741.802	6470.834
<b>R3</b>	7079.608	6659.815	5932.287	6141.820	5381.422	7132.020
<b>Promedio</b>	<b>7090.582</b>	<b>7121.052</b>	<b>6941.863</b>	<b>6489.788</b>	<b>5789.496</b>	<b>6331.595</b>
<b>Densidad g/cm3</b>						
	<b>Cantos</b>			<b>Despunte</b>		
	<b>Superior</b>	<b>Medio</b>	<b>Inferior</b>	<b>Superior</b>	<b>Medio</b>	<b>Inferior</b>
<b>R1</b>	0.602	0.664	0.629	0.746	0.589	0.592
<b>R2</b>	0.666	0.758	0.675	0.780	0.801	0.787
<b>R3</b>	0.690	0.667	0.643	0.745	0.675	0.652
<b>Promedio</b>	<b>0.653</b>	<b>0.696</b>	<b>0.649</b>	<b>0.757</b>	<b>0.688</b>	<b>0.677</b>