

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA
CENTRO UNIVERSITARIO DEL NORTE
CARRERA DE AGRONOMÍA

TRABAJO DE GRADUACIÓN



**EVALUACIÓN DE LA COMBUSTIÓN DE BRIQUETAS
ECOLÓGICAS, ELABORADAS A BASE DE PULPA DE CAFÉ Y
ASERRÍN DE PINO (*Pinus maximinoi*)**

BYRON ESTUARDO CHUB CAAL

COBÁN, ALTA VERAPAZ, MARZO DE 2 017

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA
CENTRO UNIVERSITARIO DEL NORTE
CARRERA DE AGRONOMÍA

TRABAJO DE GRADUACIÓN

EVALUACIÓN DE LA COMBUSTIÓN DE BRIQUETAS
ECOLÓGICAS, ELABORADAS A BASE DE PULPA DE CAFÉ Y
ASERRÍN DE PINO (*Pinus maximinoi*)

PRESENTADO AL HONORABLE CONSEJO DIRECTIVO DEL
CENTRO UNIVERSITARIO DEL NORTE

POR

BYRON ESTUARDO CHUB CAAL
CARNÉ 200946006

COMO REQUISITO PREVIO A OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERO
AGRÓNOMO

COBÁN, ALTA VERAPAZ, MARZO DE 2017

AUTORIDADES UNIVERSITARIAS
RECTOR MAGNÍFICO

Dr. Carlos Guillermo Alvarado Cerezo

CONSEJO DIRECTIVO

PRESIDENTE: Lic. Zoot. Erwin Gonzalo Eskenasy Morales
SECRETARIA: Ing. Geol. Cesar Fernando Monterroso Rey
REPRESENTANTE DOCENTES: Licda. T.S. Floricelda Chiquin Yoj
REPRESENTANTE EGRESADO: Lic. en Admón. Fredy Fernando Lemus Morales
REPRESENTANTES ESTUDIANTILES: Br. Fredy Enrique Gereda Millián
PEM. César Oswaldo Bol Cú

COORDINADOR ACADÉMICO

Ing. Industrial Francisco David Ruiz

COORDINADOR DE LA CARRERA

Ing. Agr. *MSc.* Sandra Anabella Tello Coutiño

COMISIÓN DE TRABAJOS DE GRADUACIÓN

COORDINADOR: Ing. Agr. MAE. David Salomón Fuentes Guillermo
SECRETARIO: Ing. Agr. *MSc.* Ángel Arce Canahuí
VOCAL: Ing. Agr. *M.Sc.* Edgar Armando Ruíz Cruz

REVISOR DE REDACCIÓN Y ESTILO

Ing. Civil. *MSc.* Julio Enrique Reynosa Mejía

REVISOR DE TRABAJO DE GRADUACIÓN

Ing. Agr. *MSc.* Ángel Arce Canahuí

ASESOR

Ing. Agr. *MSc.* Edgar Armando Ruíz Cruz



USAC
TRICENTENARIA
Universidad de San Carlos de Guatemala

**CENTRO UNIVESITARIO DEL
NORTE – CUNOR –
CARRERA AGRONOMÍA**

Código Postal 16001 – Cobán, Alta Verapaz
PBX 79 56 66 00 Ext. 208

Finca Sachamach, Km. 110.5 Ruta Cobán, A.V.
Guatemala, C. A.

E-mail: agrocunor@gmail.com

Cobán, A.V., 20 de febrero de 2017.

Ref.: 15-A-78/2017.

Ingeniero Agrónomo:
Ángel Arce Canahú
Presidente Terna Evaluadora
Carrera de Agronomía
Centro Universitario del Norte
CUNOR - USAC

Respetable Ing. Arce:

Me dirijo a ustedes para informarles que he revisado el trabajo de graduación titulado **“Evaluación de la combustión de briquetas ecológicas, elaboradas a base de pulpa de café y aserrín de pino (*Pinus maximinoi*)”**.

A mi criterio dicho trabajo cumple con las observaciones realizadas por la terna en la presentación oral de Seminario II, lo indicado en el acta que levantó la terna, así como las sugerencias y anotaciones que le hacen en los documentos que presentó.

En tal sentido, por este medio doy el aval al trabajo que he asesorado, para que continúe con el trámite respectivo.

Atentamente,



Id y enseñad a todos

Ing. Agr. MSc. Edgar Armando Ruiz Cruz
Asesor Principal.



USAC
TRICENTENARIA
Universidad de San Carlos de Guatemala

**CENTRO UNIVESITARIO DEL
NORTE – CUNOR –
CARRERA AGRONOMÍA**

Código Postal 16001 – Cobán, Alta Verapaz
PBX 79 56 66 00 Ext. 208

Finca Sachamach, Km. 110.5 Ruta Cobán, A. V.
Guatemala, C. A.

E-mail: agrocunor@gmail.com

Cobán, A.V., 08 de marzo de 2017.

Ref.: 15-A-080/2017.

Señores:

Miembros de la Comisión de Trabajos de Graduación
Carrera de Agronomía
Centro Universitario del Norte –CUNOR–

Señores:

Por este medio me permito informar que el T.U. **Byron Estuardo Chub Caal**, si incorporó a su informe final de Trabajo de Graduación las correcciones y sugerencias que se le mandaron hacer en el documento y en la presentación del Seminario II.

Con base a lo anterior, se recomienda que dicho trabajo continúe con el trámite respectivo.

Atentamente,



Id y enseñad a todos

Ing. Agr. Ángel Arce Canahú
Revisor del Informe Final de Trabajos de Graduación y
Presidente Terna Evaluadora Seminario II
Carrera Agronomía

c.c. Archivo.



USAC
TRICENTENARIA
Universidad de San Carlos de Guatemala

**CENTRO UNIVESITARIO DEL
NORTE – CUNOR –
CARRERA AGRONOMÍA**

Código Postal 16001 – Cobán, Alta Verapaz
PBX 79 56 66 00 Ext. 208
Finca Sachamach, Km. 110.5 Ruta Cobán, A.V.
Guatemala, C. A.
E-mail: agrocunor@gmail.com

Cobán, A.V., 24 de marzo de 2017.
Ref.: 15-A-101/2017.

Señores:
Miembros de la Comisión de Trabajos de Graduación
Carrera de Agronomía
Centro Universitario del Norte –CUNOR–

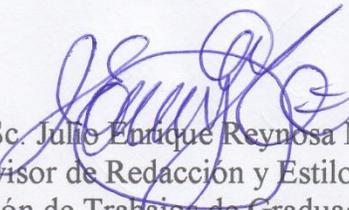
Señores Comisión de Trabajos de Graduación:

Por este medio me permito informar que he revisado el trabajo de graduación presentado por el **T.U. Byron Estuardo Chub Caal**, titulado: **“Evaluación de la combustión de briquetas ecológicas, elaboradas a base de pulpa de café y aserrín de pino (*Pinus maximinoi*)”**, y después de corroborar que se hicieron las observaciones formuladas, me permito dictaminar que dicho trabajo es satisfactorio en cuanto a las normas de redacción y estilo y puede continuar con el trámite respectivo.

Atentamente,

Id y enseñad a todos




Ing. M.Sc. Julio Enrique Reynosa Mejía
Revisor de Redacción y Estilo
Comisión de Trabajos de Graduación
Carrera de Agronomía
CUNOR - USAC

c.c. archivo



USAC
TRICENTENARIA
Universidad de San Carlos de Guatemala

**CENTRO UNIVESITARIO DEL
NORTE – CUNOR –
CARRERA AGRONOMÍA**
Código Postal 16001 – Cobán, Alta Verapaz
PBX 79 56 66 00 Ext. 208
Finca Sachamach, Km. 110.5 Ruta Cobán, A.V.
Guatemala, C. A.
E-mail: agrocunor@gmail.com

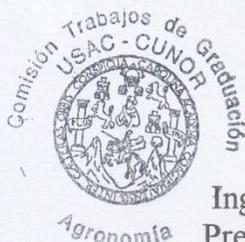
Cobán, A.V., 27 de marzo de 2017.
Ref.: 15-A-102/2017.

Licenciado:
Erwin Gonzalo Eskenasy Morales
Director del CUNOR
Edificio.

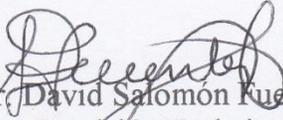
Señor Director:

Por este medio me permito informar que después de haber sido revisado y evaluado por el Asesor, el Revisor de Informes Finales y el Revisor de Redacción y Estilo, la Comisión de Trabajos de Graduación, emite su dictamen favorable para que el trabajo de graduación del **T.U. Byron Estuardo Chub Caal**, titulado: **“Evaluación de la combustión de briquetas ecológicas, elaboradas a base de pulpa de café y aserrín de pino (*Pinus maximinoi*)”**, siga el trámite correspondiente a efecto se autorice el Imprimase.

Atentamente,



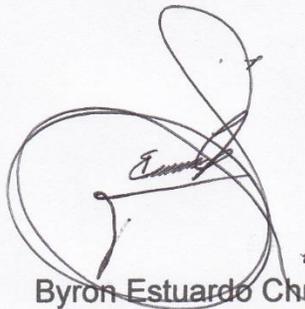
Id y enseñad a todos


Ing. Agr. David Salomón Fuentes Guillermo
Presidente Comisión Trabajos de Graduación
Carrera Agronomía –CUNOR-

c.c. archivo

HONORABLE COMITÉ EXAMINADOR

En cumplimiento a lo establecido por los estatutos de la Universidad de San Carlos de Guatemala, presento a consideración de ustedes el trabajo de graduación denominado: Evaluación de la combustión de briquetas ecológicas, elaboradas a base de pulpa de café y aserrín de pino (*Pinus maximinoi*), como requisito previo a optar el título profesional de Ingeniero Agrónomo.

A handwritten signature in black ink, appearing to read 'Byron Estuardo Chub Caal', is written over a large, circular, scribbled mark.

Byron Estuardo Chub Caal

Carné: 200946006

RESPONSABILIDAD

“La responsabilidad del contenido de los trabajos de graduación es: del estudiante que opta al título, del asesor, de la Comisión de Trabajos de Graduación, de la Comisión de Redacción y Estilo de la carrera y de las autoridades del Centro Universitario del Norte, quienes son responsables de la estructura y forma del trabajo.”

Aprobado en punto Segundo, inciso 2.4, subinciso 2.4.1 del Acta No. 17-2012 de sesión extraordinaria de Consejo Directivo de fecha 18 de Julio de 2012.

Mi fiel amigo Perseo, por el compañerismo, lealtad y enseñarme que después de un mal día, basta con sentarse y acompañar en silencio.

Centro Universitario del Norte -CUNOR- Por ser la casa de estudio, que me acogió y dio la oportunidad de superación académica en sus aulas.

Empresa Renace En especial al Ing. Agr. Byron Hernández, a los señores Luis Ical y Alfredo Maquín por su apoyo durante la ejecución de la investigación.

ACTO QUE DEDICO A:

- Dios** Porque todas las cosas proceden de Él y existen por Él y para Él. A Él sea la gloria por siempre.
- Mi familia** El gran tesoro que la vida me ha dado, que me ha apoyado en cada decisión y proyecto.
- Mis padres** Francisco Javier Chub (†) y Victoria Caal.
- Mis hermanos** Olga, Oscar, Pedro, Thelma, Martín, Victoria, Fredy, Lesbia y Carolina.
- Mis sobrinos** Pedro, Veraly, Martín, Tanía, Yamilet, Ángel, José. Victoria, Fernando y Sofy.
- Mis cuñados** Rogelio, Manuel, Soreida y Sabi.
- Mi novia** Xiomara Araly Pisquiy Donabó
- A mi héroe.** Francisco Javier Chub (†), con cariño papá Pancho.

Por ser un gran padre, un buen amigo, le doy gracias por creer en mí cuando la situación parecía caminar lento, siempre diciéndome "no desmaye siga adelante", sus enseñanzas y su ejemplo de lucha constante, han hecho de mí una mejor persona. Ha guiado mis pasos por el sendero

correcto y acompaña mi vida en todo momento, nunca se fue porque vive en mí y en cada uno de los que lo amamos y seguiremos amando, hasta el fin de nuestros días.

ÍNDICE GENERAL

RESUMEN	v
INTRODUCCIÓN	1
PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	4
JUSTIFICACIÓN	6
OBJETIVOS	8
CAPÍTULO 1	
MARCO TEÓRICO	
1.1. ANTECEDENTES GENERALES	9
1.1.1. Investigaciones realizadas en la elaboración de briquetas en Guatemala	10
1.2. TECNOLOGÍA PARA LA OBTENCIÓN DE BRIQUETAS	11
1.2.1. Tipos de tecnología para la fabricación de briquetas	11
1.2.1.1. Artesanal	11
1.2.1.2. Semi-industrial	12
1.2.1.3. Industrial	13
1.3. Briqueta	13
1.3.1. Ventajas de las briquetas	14
1.3.2. Briquetado	15
1.3.2.1. Briquetadora hidráulica o neumática	16
1.3.3. Materia prima apropiada para el briquetado	16
1.3.4. Composición de la mezcla para el briquetado	17
1.3.5. Aglutinante	18
1.3.5.1. Melaza	19
1.3.6. Secado	20
1.4. Caracterización de las briquetas	20

1.4.1.	Propiedades físicas	20
1.4.2.	Propiedades químicas	21
1.4.2.1.	Combustión	21
1.4.2.2.	Humo	22
1.4.2.4.	Análisis inmediato	24
1.5.	MARCO REFERENCIAL	25
1.5.1.	Ubicación y localización del área experimental	25
1.5.2.	Variables climáticas	25
1.5.3.	Material experimental	26
1.5.3.1.	Aserrín o residuo maderable	26
1.5.3.2.	Pulpa de café	26
1.5.3.3.	Leña de encino	27
CAPÍTULO 2		
HIPÓTESIS		29
CAPÍTULO 3		
METODOLOGÍA		
3.1.	DISEÑO DE MÁQUINA BRIQUETADORA	31
3.2.	TRATAMIENTOS A EVALUAR	33
3.3.	DISEÑO EXPERIMENTAL	34
3.3.1.	Análisis estadístico	35
3.4.	VARIABLES RESPUESTA	36
3.4.1.	Características de la briqueta medidas durante la combustión	36
3.4.1.1.	Tiempo de incineración y temperatura máxima alcanzada	36
3.4.1.2.	Densidad de humo producido	37
3.4.1.3.	Porcentaje de cenizas	37
3.4.2.	Caracterización física de la briqueta	38
3.4.2.1.	Porcentaje de humedad	38
3.4.2.2.	Densidad	39
3.4.2.3.	Dureza	39
3.4.2.4.	Color	39
3.4.2.5.	Friabilidad	39

3.5.	MANEJO DEL EXPERIMENTO	40
3.5.1.	Obtención de los residuos agroforestales	40
3.5.2.	Secado de los residuos agroforestales	41
3.5.3.	Producción de briquetas con residuos agroforestales	41
3.5.3.1.	Composición de la mezcla para briquetación	41
3.5.3.2.	Proceso de mezclado y homogenización de la mezcla	41
3.5.3.3.	Compactación de la mezcla	41
3.5.3.4.	Secado de briquetas	42
3.5.4.	Empacado y almacén de las briquetas	42
3.5.5.	Caracterización de las briquetas	42
3.6.	RECURSO HUMANO	43
3.7.	EQUIPO, MATERIALES E INSUMOS	43
CAPÍTULO 4		
ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS		
4.1.	VARIABLES RESPUESTA	45
4.1.1.	Tiempo de incineración	46
4.1.2.	Temperatura máxima alcanzada	49
4.1.3.	Densidad de humo producido	52
4.1.4.	Porcentaje de ceniza	54
4.2.	Uso de la melaza como aglutinante para la elaboración de briquetas	57
4.3.	ANÁLISIS ECONÓMICO	60
	CONCLUSIONES	65
	General	65
	Específicas	65
	RECOMENDACIONES	69
	BIBLIOGRAFÍA	71
	ANEXOS	75
	CUADROS	75
	FIGURAS	76
	GLOSARIO	88

ÍNDICE DE CUADROS

CUADRO

1.	Promedio de las variables respuesta	46
2.	Tiempo de incineración para cada tratamiento y repetición	47
3.	ANDEVA, tiempo de incineración	48
4.	Prueba de TUKEY, tiempo de incineración	48
5.	Temperatura máxima alcanzada por cada tratamiento y repetición	50
6.	ANDEVA, temperatura máxima alcanzada	51
7.	Prueba de TUKEY, temperatura máxima alcanzada	51
8.	Densidad de humo producido por cada tratamiento y repetición	53
9.	Porcentaje de ceniza producido por cada tratamiento y repetición	54
10.	ANDEVA, porcentaje de ceniza	55
11.	Prueba de TUKEY, porcentaje de ceniza	56
12.	Promedio de las características físicas de las briquetas	58
13.	Costos de producción	62
14.	Escala de Mohs	75
15.	Color de las briquetas de cada tratamiento	88

ÍNDICE DE FIGURAS

FIGURA

1.	Máquina briquetadora	32
2.	Ensayo de humedad	76
3.	Escala de Ringelmann	76
4.	Máquinas briquetadoras	77
5.	Fabricación de la máquina briquetadora	78
6.	Obtención de residuos agroforestales	79
7.	Elaboración de briquetas	80
8.	Estufa tipo cohete	81
9.	Humedad gravimétrica de las briquetas	82
10.	Temperatura máxima alcanzada	83
11.	Densidad de humo y porcentaje de ceniza	84
12.	Altura y color de briqueta	85
13.	Dureza y friabilidad de las briquetas	86
14.	Máquina briquetadora con gato hidráulico fijo	87

EVALUACIÓN DE LA COMBUSTIÓN DE BRIQUETAS ECOLÓGICAS, ELABORADAS A BASE DE PULPA DE CAFÉ Y ASERRÍN DE PINO (*Pinus maximinoi*)

RESUMEN

El presente estudio, consistió en evaluar la combustión de briquetas ecológicas, elaboradas a base de pulpa de café y aserrín de pino, en los meses comprendidos de abril a octubre del año 2016, en el proceso de briquetado, se usó como aglomerante de partículas la melaza y se realizó en la finca experimental Chisap, de la empresa RENACE, en el municipio de San Pedro Carchá, Alta Verapaz. La caracterización de la briqueta se realizó en los laboratorios de la Carrera de Agronomía el CUNOR.

Los tratamientos evaluados fueron, T1 briqueta elaborada en base a 100 % pulpa de café, T2 briqueta elaborada en base a 75 % pulpa de café - 25 % aserrín, T3 briqueta elaborada en base a 50 % pulpa de café - 50 % aserrín, T4 briqueta elaborada en base a 25 % pulpa de café - 75 % aserrín, T5 briqueta elaborada en base a 100 % aserrín y T₀ el testigo (leña de encino).

El diseño experimental utilizado fue el completo al azar, con 6 tratamientos, 5 tratamientos corresponden a las briquetas. Se hicieron 4 repeticiones, cada repetición estuvo conformada por 5 briquetas, para un total de 100 briquetas y el otro tratamiento evaluado fue el testigo (leña de encino). Debido a que la población prefiere este tipo de leña por su buena combustión, también con 4 repeticiones.

Se evaluó la combustión de los tratamientos, a través de la medición de las variables respuesta siguientes: tiempo de incineración, máxima temperatura alcanzada, densidad del humo y porcentaje de ceniza.

Los análisis estadísticos determinaron que el tratamiento con 100 % pulpa de café (T1) presentó los mejores resultados en cuanto a tiempo de incineración, máxima temperatura alcanzada, densidad de humo y porcentaje de ceniza.

El uso del aglomerante melaza y la máquina briquetadora semi-industrial, tipo hidráulica, le confirieron a las briquetas características físicas de calidad, esto se corroboró en los tratamientos T1, T2 y T3, ya que presentaron los mejores resultados en cuanto a densidad aparente, dureza, friabilidad y forma regular.

Se realizó un análisis económico entre las briquetas elaboradas a base de pulpa de café, aserrín y la leña de encino, el cuál reveló, que el precio de un kg de briqueta, es 5 veces mayor al precio de un kg de leña de encino, esto sin apreciar las ventajas ambientales y de combustión que ofrecen las briquetas ecológicas.

INTRODUCCIÓN

Las briquetas ecológicas (leña ecológica), son un producto ecológico y renovable elaborado a partir de biomasa o distintos tipos de residuos combustibles, ofrecen ventajas comparativas y competitivas, entre las que se pueden mencionar, mayor poder calorífico (al densificar la biomasa o residuo a emplear), fácil y rápido encendido, alta densidad, homogéneas en cuanto a forma, fácil manipulación, menor porcentaje de humo y cenizas, así como 100 % reciclado; es un producto muy conocido y presenta una fuerte demanda en muchos países desarrollados, especialmente en Europa; además varios países de Sudamérica exportan carbón vegetal y briquetas.

En Guatemala se producen distintos tipos de residuos orgánicos que no tienen ningún uso benéfico o si lo tienen es parcial, estos proceden de procesos industriales, urbanos, ganaderos y agroforestales. En el departamento de Alta Verapaz los residuos agroforestales (pulpa de café y aserrín de *Pinus maximinoi*) se producen en grandes cantidades y tienen impactos negativos al medio ambiente natural (contaminan suelo, aire y agua), así mismo su depósito inadecuado podría ser un foco para la propagación de plagas y enfermedades.

A la par de las fuentes de contaminación mencionadas, la fuerte demanda de leña en los hogares y en procesos industriales, da como resultado presión sobre los recursos naturales, lo cual conlleva a la deforestación de bosques, que en su mayoría se da de manera ilegal. Debido a ello y a las ventajas referidas anteriormente, se realizó el estudio “Evaluación de la combustión de briquetas ecológicas, elaboradas a base de pulpa de café y aserrín” que es una alternativa

de energía limpia para la población, revaloriza dichos residuos y mitiga sus impactos negativos al ambiente natural.

En el departamento de Alta Verapaz no se habían desarrollado estudios técnico-científicos que muestren información sobre la fabricación de briquetas ecológicas, elaboradas específicamente con pulpa de café y aserrín de *Pino maximinoi*, por ello se sistematizó la información para desarrollar un proceso tecnológico para la obtención de briquetas a partir de estos residuos.

Entre los objetivos del estudio se encuentran, evaluar la combustión de las briquetas ecológicas y valorar el uso del aglutinante melaza, sobre las propiedades físicas de dichas briquetas, objetivos que dieron a conocer características físicas y químicas como; forma, color, humedad, densidad, dureza, friabilidad, porcentaje de cenizas, densidad de humo, temperatura y tiempo de combustión.

Los tratamientos evaluados fueron 6, los cuales tenían distinta composición de cada residuo, en los que se incluyó 100 % de cada residuo y mezclas de pulpa de café - aserrín, en composiciones de 25 % pulpa de café - 75 % aserrín, 50 % pulpa de café - 50 % aserrín, 75 % pulpa de café - 25 % aserrín y leña de encino.

Para la fabricación de briquetas ecológicas se utilizó tecnología semi-industrial, a través del uso de una máquina briquetadora hidráulica que ejerció una presión de 1,95 MPa (19,89 kg / cm²), de la cual se obtuvieron briquetas cilíndricas de 0,08 m de diámetro y 0,15 m de alto, así mismo se usó un tapanco para su secado después de la densificación.

El diseño experimental fue al completo azar con 6 tratamientos y 4 repeticiones, en el caso de las briquetas cada repetición estuvo conformada por 5 briquetas, un total de 100 briquetas.

La elaboración de la máquina briquetadora y las briquetas se realizó en la finca experimental Chisap, de la hidroeléctrica RENACE, ubicada en el municipio de San Pedro Carchá, Alta Verapaz. Y la caracterización de las briquetas se realizó en el laboratorio de suelos de la carrera de Agronomía del Centro Universitario del Norte "CUNOR", el estudio tuvo una duración de 7 meses, de abril a octubre de 2016.

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Los residuos industriales como el aserrín y la pulpa de café, generalmente se acumulan o queman, lo que contamina y no produce ningún tipo de valor agregado.

Al quemar los residuos maderables (aserrín), a través del proceso de incineración, se produce combustión que no es aprovechada, tampoco se aprovecha gran parte del aserrín y la pulpa de café que solo se desecha y acumula en áreas no adecuadas, estos residuos podrían ser transformados en leña ecológica (briquetas), ser revalorizados y aprovechar su combustión en actividades como; cocción de alimentos, procesos industriales y calefacción, entre otros.

En Alta Verapaz la acumulación e incineración del aserrín (vertido en muchas ocasiones en alrededores de comunidades) se ha relacionado con la degradación del ambiente natural al contaminar el aire, libera dióxido de carbono y acumula polvo en el aire. Incinerar los residuos forestales causa además deterioro del suelo, debido a que las cenizas producidas se pierden fácilmente por la acción del aire o agua, lo que reduce drásticamente la fertilidad, especialmente cuando se trata de suelos con vocación forestal, así mismo imposibilita lograr cosechas abundantes por un largo tiempo sin fertilizar el suelo al ser usado para actividades agrícolas y es muy difícil recuperar la fertilidad natural de estos suelos. Esta técnica hace uso del fuego por lo cual podría ser la causa de incendios forestales.

Por otro lado está la pulpa de café, que se genera por el beneficiado húmedo del fruto, se desecha y almacena en áreas no apropiadas, lo cual contamina ríos y produce olores desagradables. Cabe mencionar que residuos como la pulpa de café y el aserrín acidifican el suelo y afectan su fertilidad y por lo tanto la productividad, así mismo el depósito inadecuado de los dos tipos de residuos puede ser un foco para la propagación de plagas y enfermedades.

A la par de estas fuentes de contaminación, la fuerte demanda de leña en los hogares, da como resultado presión sobre los recursos naturales, lo cual conlleva a la deforestación de bosques, que en su mayoría se da de manera ilegal, así mismo el consumo de leña en los hogares produce problemas respiratorios en niños y adultos, debido a la mala combustión de la leña que produce altas densidades de humo, por factores como alto porcentaje de humedad o el tipo de leña. La pobreza extrema en Alta Verapaz, hace que la gente vea una fuente de ingresos en la comercialización de leña y carbón de encino.

Ante lo anterior, surge la pregunta ¿es posible reutilizar algunos residuos para que no constituyan contaminación y a la vez ofrecer una alternativa de energía a la población a menor costo?

JUSTIFICACIÓN

En el departamento de Alta Verapaz no se habían desarrollado estudios técnico-científicos que otorguen información sobre la transformación y aprovechamiento de residuos industriales, urbanos, ganaderos y agroforestales, en briquetas ecológicas, siendo estas una bioenergía (energía limpia), que podrían ser fabricadas con desechos orgánicos. Es por ello que el estudio generó y sistematizó información para desarrollar un proceso tecnológico para la obtención de briquetas ecológicas, elaboradas con pulpa de café y aserrín.

Los residuos maderables, que en la región son quemados, podrían utilizarse para la producción de leña ecológica (Briquetas ecológicas), así mismo en la región la mayor parte de la pulpa de café se desecha y su utilización es incipiente o limitada para la obtención de fertilizante orgánico, el restante de este desecho podría también ser utilizado para la fabricación de briquetas ecológicas.

A través de la elaboración de briquetas ecológicas se podría reducir los impactos negativos al ambiente que ocasionan estos residuos (aserrín y pulpa de café) y por otro lado la demanda de leña por persona, que según la FAO en Guatemala, es de 3,85 kg en área rural y 2,2 kg en área urbana al día.¹

La briqueta ecológica elaborada en base a aserrín y pulpa de café, residuos que se encuentran a la mano y en grandes cantidades, podría ser un sustituto perfecto de la leña normal, debido a que la briqueta ecológica es considerada

¹ Organización para la Alimentación y Agricultura -FAO-. *Estado actual de la información sobre madera para energía*. <http://www.fao.org/docrep/006/ad402s/AD402s07.htm> (25 de abril de 2015).

energía limpia, 100 % ecológica, fabricada sin tóxicos, su poder calorífico es ligeramente superior a la leña normal, tiene mayor rendimiento, menos humedad, fácil de transportar y almacenar, produce menos ceniza y menos humo en los hogares donde se consume leña y carbón.

La transformación de los residuos agroforestales (pulpa de café y aserrín) a briquetas, consiste en densificar los residuos a través de una alta presión, lo cual hace que los residuos ocupen menos espacio, sea más fácil de transportar y almacenar.

OBJETIVOS

GENERAL

Generar información sobre la tecnología de fabricación, proceso y comportamiento de las briquetas ecológicas a partir de residuos agroforestales como el aserrín de *Pino maximinoi* y pulpa de café.

ESPECÍFICOS

- a. Evaluar la combustión de las briquetas ecológicas elaboradas a partir de aserrín, pulpa de café y leña de encino (usada como testigo).
- b. Sistematizar información para desarrollar un proceso tecnológico para la obtención de briquetas ecológicas elaboradas a partir de aserrín y pulpa de café.
- c. Proponer un diseño para la fabricación de una máquina briquetadora semi-industrial que elabore briquetas ecológicas con forma cilíndrica acorde a las condiciones culturales de la región.
- d. Valorar el uso del aglutinante, melaza, sobre las propiedades físicas de las briquetas ecológicas elaboradas a partir de aserrín y pulpa de café, ya que las propiedades físicas influyen en el comportamiento energético de las briquetas.
- e. Realizar un análisis económico para comparar costos entre las briquetas elaboradas a partir de aserrín, pulpa de café y leña de encino.

CAPÍTULO 1

MARCO TEÓRICO

1.1. ANTECEDENTES GENERALES

La producción industrial de briquetas a partir de distintos tipos de residuos, en países desarrollados como Estados Unidos de Norte América, Canadá, Alemania, Dinamarca, Italia, España y Austria, ha tomado mucho auge debido a que es una fuente de energía ecológica y renovable.

Este mismo patrón se sigue en muchos países de África y Sudamérica, buscan reducir la presión sobre los recursos naturales o aprovechar al máximo distintos tipos de residuos que no tienen uso benéfico, brindan así alternativas energéticas de reemplazo a los combustibles tradicionales. En Sudamérica se han realizado estudios sobre la elaboración de briquetas entre los cuales se pueden mencionar:

El Centro de Desarrollo e investigación de Termo fluidos (CEDIT)², del Perú, en el 2007, realizó una investigación donde se evaluaron análisis de combustión, humedad y poder calorífico de briquetas elaboradas a partir de residuos secos y no conocidos como cáscara de papa y hojas de espinaca, entre otros; con distintas composiciones y medidas, secadas a temperatura ambiente y mezclada con distintos aglutinantes, con resultados satisfactorios.

² Centro de Desarrollo e Investigación en Termofluidos -CEDIT-. "Briquetas de residuos sólidos orgánicos como fuente de energía calorífica en cocinas no convencionales". *Revista científica CEDIT 2*, (2007): 26-29.

Fonseca, Edison y Tierra, Luis³, en el 2011, en Ecuador, desarrollaron un proceso tecnológico para la obtención de briquetas de aserrín de madera y cascarilla de arroz, así mismo pruebas de producción de gas pobre.

Hernández Aviles, Joe Ralph⁴, realizó en el 2011, en Ecuador, un estudio técnico para la obtención de briquetas de fácil encendido a partir de carbón de la cascarilla de palma africana y su producción en la empresa TYSAI S.A., cuyo resultado fue que el tratamiento con cisco al 50 % alcanzó un tiempo de encendido menor a 30 min.

Da Silva Arce, Derlis Disglide⁵, en el 2013, en Paraguay, realizó el estudio “Proyecto de creación de una fábrica de briquetas de aserrín en Santa Rosa del Aguaray”, cuyos resultados indicaron la implementación del mismo.

1.1.1. Investigaciones realizadas en la elaboración de briquetas en Guatemala

Ríos Marticonera, Víctor Enrique⁶, efectuó en el 2014, la investigación “Aprovechamiento de la cachaza, la colofonia y la arcilla como aglutinantes en la formulación de briquetas energéticas utilizando residuos de aserrío”; tuvo como resultado que la colofonia

³ Fonseca, Edison y Luis, Tierra. *Desarrollo de un proceso tecnológico para la obtención de briquetas de aserrín de madera y cascarilla de arroz y pruebas de gas pobre*. Tesis Ingeniería Mecánica. Escuela Superior Politécnica de Chimborazo. Ecuador: Facultad de mecánica, 2011.

⁴ Hernández Aviles, Joe Ralph. *Estudio técnico para la obtención de briquetas de fácil encendido a partir de carbón de la cascarilla de palma africana y su producción en la empresa TYSAI S.A.* Tesis Ingeniería Industrial. Escuela Superior Politécnica de Chimborazo. Ecuador: Facultad de mecánica, 2011.

⁵ Da Silva Arce, Derlis Disglide. *Proyecto de creación de una fábrica de briquetas de aserrín en Santa Rosa del Aguaray*. Licenciatura en Ciencias Administrativas. Universidad Tecnológica Intercontinental. Paraguay: Facultad de Ciencias Empresariales, 2013.

⁶ Ríos Marticonera, Víctor Enrique. *Aprovechamiento de la cachaza, la colofonia y la arcilla como aglutinantes en la formulación de briquetas energéticas utilizando residuos de aserrío*. Tesis Ingeniería Química, Universidad de San Carlos de Guatemala. Guatemala: Facultad de Ingeniería, 2014.

aumenta el poder calorífico y provee a la briqueta de propiedades fisicoquímicas y mecánicas adecuadas.

Montúfar del Valle, Douglas Israel⁷, efectuó en el 2012, un estudio y evaluación del “Uso de la biomasa como combustible alternativo en la producción de ladrillos de barro cocido en el municipio el Tejar, Chimaltenango”, el cual tuvo como resultado la reducción de costos y de impactos al ambiente.

Actualmente no existe investigación alguna sobre la elaboración de briquetas ecológicas con los residuos pulpa de café y aserrín, debido a esto no se cuenta con información técnico-científica para el aprovechamiento de dichos residuos agroforestales en la región de la Verapaces.

1.2. TECNOLOGÍA PARA LA OBTENCIÓN DE BRIQUETAS

1.2.1. Tipos de tecnología para la fabricación de briquetas

Según Fonseca Edison y Tierra Luis⁸, existen 3 tipos de tecnología utilizadas para la fabricación de briquetas y se clasifican en:

1.2.1.1. Artesanal

Este tipo de proceso es casero, se utilizan medios primarios, para la elaboración de la máquina briquetadora, es decir, no intervienen equipos sofisticados debido a que no se requiere para producir grandes cantidades, antes de prensar la biomasa en el molde, generalmente se usa

⁷ Montúfar del Valle, Douglas Israel. *Evaluación del uso de biomasa como combustible alternativo en la producción de ladrillos de barro cocido en el municipio de el Tejar Chimaltenango*. Tesis Ingeniero Civil. Universidad de San Carlos de Guatemala. Guatemala: Facultad de Ingeniería, 2012.

⁸ Fonseca, Edison y Luis, Tierra. *Desarrollo de un proceso tecnológico para la obtención de briquetas de aserrín de madera y cascarilla de arroz y pruebas de gas pobre*. Tesis Ingeniería Mecánica. Escuela Superior Politécnica de Chimborazo. Ecuador: Facultad de mecánica, 2011.

aglutinante para la mezcla, la humedad de la materia prima debe de ser 20 %.

En este proceso práctico y sencillo, solo importa la obtención de leña, por lo que la briqueta no tiene forma continua, ni rigurosidad en la proporción de la mezcla de los residuos con el aglutinante y el densificado. Tampoco se tiene precisión en cuanto a las características físico-químicas de la briqueta y el método de secado no tiene forma concreta.

En cuanto a la presión de compactación, se alcanza en promedio 5 MPa (Megapascales), una presión muy baja, por lo que la cohesión de las partículas del material se da por las altas cantidades de distintos tipos de aglutinante utilizados para la mezcla. El proceso de producción termina con el secado.

1.2.1.2. Semi-industrial

En este tipo de procesos las cantidades de uso del aglutinante disminuyen o se hacen nulas, debido a que la presión de compactación que ejerce la máquina briquetadora es mayor, se encuentra en un rango de 5 MPa a 100 MPa, lo cual permite mayor grado de aglomeración para la materia prima. Debido a esto se hace necesario secar la materia prima previo al prensado, se aceptan rangos de humedad de 15 % al 20 %.

La producción es medía y ya es posible ser preciso en algunos parámetros físico-químicos de la briqueta.

1.2.1.3. Industrial

La tecnología empleada en este proceso para la máquina briquetadora es muy alta, se tienen presiones mayores a 100 MPa, la producción de briquetas es continua, se hace completamente nulo el uso de aglutinantes, se tiene completa precisión en los parámetros físico-químicos de la briqueta. La humedad de la materia prima debe estar en un rango de 7 % al 15 %, siendo este un rango óptimo, el tamaño de las partículas debe de ser menor a 15 mm.

Debido a que se tiene varias fases de compactado, se usan secadoras, trituradoras, tamizadoras, filtros y recolectores de polvos e impurezas, se aumenta la auto-aglomeración de la materia prima, por lo cual se obtiene una briqueta de buena calidad con excelentes propiedades físico-químicas.

1.3. Briqueta

Es un combustible sólido, que se obtiene mediante la compactación de distintos materiales. Se considera una bioenergía sólida, cuando se elabora a partir de residuos orgánicos, los residuos más utilizados son biomasa agrícola (hojarasca, cáscaras de café, coco, cascarilla de arroz, etc.), residuo de industria forestal (particularmente el aserrín), residuo industrial, biomasa residual urbana, carbón vegetal y residuos ganaderos, entre otros, así mismo puede ser la mezcla de dos o varios de los residuos antes mencionados.⁹

La briqueta es un producto renovable y 100 % ecológico, usado frecuentemente en el sector doméstico (en estufas y chimeneas), e industrial para la generación de calor o producción de energía (en cocinas industriales, hornos, calderas, como combustible limpio, etc.).

⁹ Marcos Martín, Francisco. "Pélets y Briquetas". *AITIM 171*, (1995): 54-62.

El briquetado es un proceso de compactación o densificación para incrementar la baja densidad aparente de la biomasa a una densidad mayor, las briquetas se han desarrollado para darle uso a residuos que se consideran inservibles, para aumentar su densidad y revalorizar su poder calorífico. Esto facilita y disminuye costos de transporte, y genera una propuesta para sustituir el uso de combustibles fósiles y reducir la presión sobre los recursos naturales.¹⁰

Según la normalización y estandarización de los biocombustibles, en Europa, una briqueta debe contar como mínimo, con las siguientes especificaciones de calidad:¹¹

- Diámetro (cm): 1 - 10
- Longitud (cm): 6 - 30
- Humedad (% masa): ≤ 12
- Cenizas (% masa): < 5
- Poder calorífico inferior (kcal / kg): 4.182 - 4.657

1.3.1. Ventajas de las briquetas

Cuando las briquetas son elaboradas a base de residuos orgánicos, se tienen las siguientes ventajas:

- Mayor poder calorífico (al densificar el residuo o biomasa a emplear)
- Fácil y rápido encendido
- Baja humedad
- Alta densidad
- Ocupan menos espacio

¹⁰ *Ibíd.*

¹¹ *Normalización y estandarización de biocombustibles.* http://www.inti.gob.ar/ue/proyecto2003/pdf/normativa_biocombustibles.pdf (21 de octubre de 2016).

- Ecológicas
- Homogéneas
- Fácil manipulación
- Sin malos olores
- Menor porcentaje de cenizas y menor porcentaje de humo
- Energía limpia (no contaminante)
- Fuente renovable
- 100% reciclado
- Orgánico, no tóxico¹²

1.3.2. Briquetado

Proceso por el cual se generan mecánicamente elevadas presiones en diferentes materiales, a través de la implementación de tecnologías, lo cual origina la plastificación de la lignina u otros materiales, que actúa como auto-aglomerante de la materia prima o residuos a utilizar, este proceso da lugar a la conformación de la briqueta.

Cuando se generan bajas y medianas presiones, se necesita del uso de un aglomerante para lograr la compactación. El propósito del briquetado o briquetación es obtener combustibles con mayor densidad, que la materia original empleada para hacerlos.¹³

A través de la información mostrada en el numeral 1.2. (p. 11), sobre la tecnología usada para la elaboración de briquetas, se pueden clasificar las presiones de compactación en:

¹² Ríos Marticonera, Víctor Enrique. *Aprovechamiento de la cachaza, la colofonia y la arcilla como aglutinantes en la formulación de briquetas energéticas utilizando residuos de aserrío*. Tesis Ingeniería Química, Universidad de San Carlos de Guatemala. Guatemala: Facultad de Ingeniería, 2014.

¹³ Ortiz, Luis y JL, Miguez. *Energías Renovables y Medio Ambiente*. España: Editorial Ayuntamiento de Vigo, 1994.

- Altas (mayores a 100 MPa)
- Medias (5 MPa – 100 MPa)
- Bajas (menores a 5 Mpa)

De acuerdo a estas presiones de compactación existen diferentes tipos de máquinas, entre las que se pueden mencionar: briquetadora de pistón, briquetadora de tornillo, briquetadora de rodillos y briquetadora hidráulica o neumática.

1.3.2.1. Briquetadora hidráulica o neumática

La presión en este tipo de máquinas es producida mediante el accionamiento de uno o varios pistones, accionados por sistemas hidráulicos o neumáticos. Es un tipo de equipo de muy bajo costo y mantenimiento, generalmente se utiliza cuando no se requiere una briqueta de buena calidad, es ideal para reducir el espacio ocupado por residuos de muy mala calidad, en promedio estas máquinas producen de 50 kg / h a 5000 kg / h.¹⁴

1.3.3. Materia prima apropiada para el briquetado

Las características que debe tener una materia prima ideal para briquetas es, que se encuentre en el medio y en grandes cantidades, que garantice un bajo costo de fabricación, utilizar un porcentaje bajo de aglutinante para su compactación, el aglutinante a emplear debe de ser 100 % orgánico, combustible y amigable con el medio ambiente.¹⁵

¹⁴ Ortiz, Luis. *Aprovechamiento energético de la biomasa forestal*. España: Editorial Gamesal, 1996.

¹⁵ ----- . *Procesos de densificación de la biomasa forestal*. España: Editorial Gamesal, 2003.

Para el tamaño de partícula (granulometría) existe una gran diversidad de criterios, que van de la mano con la tecnología a emplear, en muchos países europeos que importan pélets y briquetas, como el caso de España, para la elaboración de briquetas se emplean materiales finos, cuyo tamaño está comprendido entre 0,1 cm y 1 cm. Al emplear estos tamaños se obtiene mayor uniformidad estructural y mayor calidad.¹⁶

La materia prima debe tener adecuado porcentaje de humedad y tipo de aglutinante, el porcentaje a emplear del aglutinante, va acorde al tipo de tecnología empleada en la fabricación de briquetas.

1.3.4. Composición de la mezcla para el briquetado

Existen dos tipos de briquetado, el seco y el húmedo, generalmente se usa el húmedo, debido a que es menos complejo, en el briquetado húmedo se homogeniza el tamaño de las partículas de la materia prima, luego se le aplica el aglomerante (el porcentaje de aglomerante a aplicar varía de acuerdo al tipo) y una cantidad de agua, hasta obtener una mezcla pastosa y manejable al tacto.

Las partículas de la materia prima deben ser pre-humedecidas, antes de aplicar el aglutinante, para facilitar el proceso de homogenización de la mezcla. Esto se debe a que el agua es por excelencia el ligante universal para el aumento de volumen, la cantidad de agua a emplear varía de material a material, por lo que se debe determinar en base a la consistencia de la mezcla.

¹⁶ -----, "Producción de biocombustibles sólidos de alta densidad en España". *CIDEU* 5, (2008): 107-123.

Para determinar la cantidad de agua a emplear, en la práctica se realiza el ensayo de humedad, que consiste en dos fases, la primera en observar el estado pastoso de la mezcla, esta no debe pegarse al recipiente que lo contiene o correrse como el lodo, si esto ocurre indica que la mezcla está muy húmeda; la segunda consiste en formar una bola con la mezcla y verificar su consistencia, si no se forma está muy húmeda y si se parte le hace falta humedad (ver figura 2).¹⁷

1.3.5. Aglutinante

Son materiales con propiedades adhesivas, capaces de unir fragmentos de materiales o sustancias y dar cohesión, por métodos físicos, químicos o térmicos, dan como resultado un producto aglomerado.¹⁸

Existen varios tipos de aglutinantes, su efecto es distinto en cuanto a las características físicas de la briqueta, de manera general por su uso en la fabricación de briquetas se clasifican en dos grandes grupos: el primero es el de los combustibles obtenidos de tejidos vegetales o secreciones de insectos y sintéticos, por ejemplo los aceites, ceras, lacas, gomas, resinas, estiércol, alquitrán, etc. El segundo es el de los no combustibles: limo, arcilla, barro, cemento, cal, etc.

Para la elaboración de briquetas ecológicas los aglutinantes deben cumplir los siguientes aspectos:

¹⁷ Fonseca, Edison y Luis, Tierra. *Desarrollo de un proceso tecnológico para la obtención de briquetas de aserrín de madera y cascarilla de arroz y pruebas de gas pobre*. Tesis Ingeniería Mecánica. Escuela Superior Politécnica de Chimborazo. Ecuador: Facultad de mecánica, 2011.

¹⁸ Gennaro, Alfonzo. *Remington Farmacia*. Argentina: Editorial Médica Panamericana, 2003.

- ✓ De fácil preparación, aplicación y obtención
- ✓ Costo relativamente bajo
- ✓ Favorecer la durabilidad
- ✓ No ser contaminante durante su combustión
- ✓ Al entrar en contacto con la piel no debe ser nocivo
- ✓ Facilidad de mezclado con la materia prima
- ✓ Poseer buenas propiedades de adhesión
- ✓ Presentar resistencia mecánica considerable¹⁹

1.3.5.1. Melaza

La melaza o miel de caña es un subproducto líquido-meloso que se obtiene de la caña de azúcar, es el residuo de las cubas de extracción de azúcares, su apariencia es parecida a la miel de abeja, pero su color es más oscuro. Se elabora mediante la cocción y evaporación de jugo de caña de azúcar, su contenido de sacarosa es del 32 %.

La melaza tiene un alto contenido de vitaminas del grupo B y nitratos de carbono, tiene bajo contenido de agua, lo cual indica que es orgánico e ideal para su uso como aglutinante.²⁰

Las propiedades adhesivas de la melaza, por ser un aglomerante orgánico, al ser amasado con agua, se comportan fraguando primero y después endureciendo. Para elaborar briquetas con melaza, se usan rangos comprendidos entre el 25 % y 40 % de melaza, esto permite que las partículas del material tengan una cohesión

¹⁹ *Efectos de los aglutinantes en las briquetas.* <https://prezi.com/uztiqhv23l-v/efectos-aglutinantes-briquetas/> (14 de noviembre de 2015).

²⁰ *Principales características de la melaza.* <http://www.quiminet.com/articulos/conozca-mas-de-las-principales-caracteristicas-de-la-melaza-2700315.htm> (15 de noviembre de 2015).

consistente; algunas investigaciones reportan valores del 16 %.²¹

1.3.6. Secado

El secado es el proceso por el cual se elimina el mayor porcentaje de humedad de la materia, en la producción de briquetas a través del briquetado húmedo, los rangos 10 % a 15 % son los más adecuados, debido a que permiten una buena combustión. Este proceso puede realizarse en muflas, hornos, secadoras solares, secador tipo invernadero o al ambiente; cuando el secado es al aire libre el tiempo de secado varía, por factores ambientales como la humedad y la temperatura de cada lugar.

Durante la combustión la formación de hidrógeno se facilita con la humedad, pero también reduce la eficiencia térmica, es importante mencionar que una briqueta o cualquier biomasa más allá de su punto de equilibrio de secado, empieza a recuperar la humedad al entrar en contacto con el aire.²²

1.4. Caracterización de las briquetas

1.4.1. Propiedades físicas

Las propiedades físicas son aquellas que se pueden medir sin cambiar la naturaleza química de la sustancia.²³ En el caso de las briquetas estas propiedades son:

²¹ Moreno, Jesús Blesa. *Briquetado de lignitos con aditivos, seguimiento físico-químico del proceso*. Tesis Doctoral en Ciencias Químicas. Instituto de Carboquímica. Facultad de ciencias químicas. Universidad de Zaragoza. España: 2002.

²² Instituto para la diversificación y ahorro de la energía -IDEA-. *Biomasa Y Gasificación*. España: 2007.

²³ *Propiedades físicas y químicas*. http://depa.fquim.unam.mx/amyd/archivero/U1temas1.5a1.7_19118.pdf (18 de octubre de 2015).

- ✓ Peso
- ✓ Forma
- ✓ Humedad superficial y humedad gravimétrica
- ✓ Densidad
- ✓ Dureza
- ✓ Color
- ✓ Friabilidad

1.4.2. Propiedades químicas

Las propiedades químicas de un material se hacen evidentes durante una reacción química y su medición conduce a un cambio en la estructura química de la sustancia.²⁴ En la combustión de briquetas o biomasa estas propiedades son:

- ✓ Volátiles
- ✓ Carbono fijo
- ✓ Cenizas
- ✓ Poder coquizante
- ✓ Poder calorífico
- ✓ Temperatura de combustión
- ✓ Densidad del humo desprendido

1.4.2.1. Combustión

Es un proceso exotérmico, donde la biomasa se combina con el oxígeno del aire para producir calor, desde un punto de vista estequiométrico, primero la biomasa debe pirolizarse para después sufrir una combustión parcial, una gasificación, esto antes de alcanzar la combustión completa, esto indica que la combustión de la biomasa es más compleja que la pirolisis y la gasificación.

²⁴ Ibíd.

La carbonización o pirólisis es el proceso por el cual se calientan los materiales orgánicos en ausencia de aire, se usa el término carbonización cuando se obtiene un resultante sólido carbonizado, tal es el caso del carbón vegetal.

Tres fases se distinguen durante la carbonización de la biomasa, las cuales producen una serie de cambios químicos, que se indican a continuación:

- a. Cuando se alcanzan los 170 °C, se produce una pequeña degradación de la biomasa, deshidratación y formación de algunos aceites esenciales.
- b. Se produce abundante desprendimiento de gases, principalmente de monóxido de carbono y dióxido de carbono; también se desprenden líquidos acuosos al alcanzar los 270 °C.
- c. En la última etapa, hasta los 600 °C, se produce pirólisis o carbonización; se desprende gran cantidad de sustancias volátiles y el residuo sólido resultante es el carbón vegetal.²⁵

1.4.2.2. Humo

El humo se conforma por pequeñas partículas sólidas en suspensión en el aire y es el resultado de una combustión incompleta de un combustible, por lo que es un subproducto no deseado de la combustión, producido en fogatas, brasas,

²⁵ Hernández Aviles, Joe Ralph. *Estudio técnico para la obtención de briquetas de fácil encendido a partir de carbón de la cascarilla de palma africana y su producción en la empresa TYSAI S.A.* Tesis Ingeniería Industrial. Escuela Superior Politécnica de Chimborazo. Ecuador: Facultad de mecánica, 2011.

motores de gasolina y diésel. Cuando una combustión es correcta y completa, los únicos subproductos son agua, dióxido de carbono y compuestos de diversos elementos.²⁶

Los componentes tóxicos del humo, como el monóxido de carbono y pequeñas partículas sólidas, pueden taponar los alveolos pulmonares de quien lo respira y asfixiar al individuo. Así mismo el humo puede contener partículas cancerígenas y provocar cáncer después de estar en exposición por un largo tiempo, por lo que no se recomienda usar estufas o calderas dentro de hogares.²⁷

Para medir la densidad aparente del humo en campo, se usa la escala de Ringelmann, que se utiliza para determinar por comparación visual, el grado de opacidad ocasionado por los humos de combustión que son emitidos a la atmósfera a través de un ducto o chimenea.

Consta de 5 niveles con diferentes tonalidades de la menor a mayor son: el 0 (cero) es la no presencia de humo, la tonalidad 1 representa un 20 %, 2 un 40 %, 3 un 60 %, 4 un 80 % y el 5 un 100 % (ver Fig. 3).²⁸

²⁶ *Quema de leña fuente de dioxinas y otros contaminantes*. <http://www3.cec.org/islandora/es/item/11474-wood-burning-es.pdf> (17 de noviembre de 2016).

²⁷ *Ibíd.*

²⁸ *Escala de Ringelmann*. <http://www.estrategiaambiental.com/normatividad/aire/resolucion-6982-de-2011-prevencion-y-control-de-la-contaminacion-atmosferica-por-fuentes-fijas-y-proteccion-de-la-calidad-del-aire/> (17 de noviembre de 2016).

1.4.2.3. Ceniza

Producto de la combustión de un combustible y está compuesto por sustancias no combustibles, como sales minerales que queda en forma de polvo en el lugar donde se ha quemado el combustible.²⁹

1.4.2.4. Análisis inmediato

Es un análisis simplificado que se usa frecuentemente en la práctica industrial, cuando no se cuenta con equipos caros y sofisticados para hacer otro tipo de análisis, como el análisis elemental o no se cuenta con una bomba calorimétrica. Consiste en separar la humedad total (W_t), el contenido de combustibles volátiles (V), el carbono fijo (CF) y las cenizas (a), de esta manera se tiene que:

$$W_t + V + CF + a = 1$$

Para efectuar los ensayos de este análisis se debe emplear una mufla eléctrica, cerrada o con salida de humos, con una muestra que pese entre 1 g y 2 g.

- a) La humedad higroscópica se obtiene a través de la disminución en peso de la muestra mantenida entre 105 °C - 110 °C, durante 100 min - 150 min.

$$W_t = (m - m_1) / m$$

²⁹ *Quema de leña fuente de dioxinas y otros contaminantes.* <http://www3.cec.org/islandora/es/item/11474-wood-burning-es.pdf> (17 de noviembre de 2016)

- b) Los volátiles se obtienen mediante la pérdida de peso que experimenta la muestra a 925 °C durante 7 min.

$$V = (m_1 - m_2) / m$$

- c) Las cenizas se obtienen mediante la incineración del residuo m_2 (coque) a 825 °C, temperatura a la que los carbonatos se han descompuesto y el yeso no.

$$m_3 = a$$

- d) El carbono fijo, se determina mediante las cenizas.

$$CF = (m_2 - m_3) / m^{30}$$

1.5. MARCO REFERENCIAL

1.5.1. Ubicación y localización del área experimental

La investigación se llevó a cabo en la granja experimental Chisap de la hidroeléctrica RENACE, en el municipio de San Pedro Carchá, Alta Verapaz, localizada geográficamente en las coordenadas 15°30'1,8" latitud norte y 90°11'0" longitud oeste.

1.5.2. Variables climáticas

El INSIVUMEH (Instituto Nacional de Sismología, Vulcanología, Meteorología e Hidrología), reporta las siguientes condiciones en el 2013.

³⁰ Fuentes de energía no renovables. http://josanna.webs.uvigo.es/pdf/Tecnologia_Energetica/Carbon/TEN-T03-CARBON.pdf (10 de octubre de 2015).

- Temperatura media anual de 20,6 °C
- Temperatura máxima promedio de 24,4 °C
- Temperatura mínima promedio de 14,9 °C
- Humedad relativa anual de 84 %

1.5.3. Material experimental

1.5.3.1. Aserrín o residuo maderable

Desperdicio del proceso de serrado de la madera, como el que se produce en grandes cantidades en los aserraderos. La corteza, costeros, virutas, recortes, menudos y aserrín, son residuos que alcanzan un 39 % (0,39 m³) por cada m³ de madera en rollo, el aserrín representa un 10 % del total de los residuos, así mismo se produce en el bosque al escuadrar el fuste y alcanza una proporción del 5 % del árbol talado.³¹

Las briquetas elaboradas con aserrín, según Agroindustria Gerona (*Agico Group*), tienen un valor calorífico neto de 4,314 kcal / kg.³²

1.5.3.2. Pulpa de café

Subproducto que se genera durante la etapa del despulpado del fruto y representa en base húmeda, alrededor del 43,58 % del peso del fruto fresco. Su producción media es de 2,25 toneladas frescas/ha-año y se constituye en el principal subproducto del proceso de beneficio.³³

³¹ Organización para la Alimentación y Agricultura -FAO-. *Aprovechamiento del residuo forestal*. <http://www.fao.org/docrep/t0269s/t0269S10.htm> (01 de mayo de 2015.)

³² *Poder calorífico de las briquetas*. <http://www.agicogroup.com> (01 de mayo de 2015).

³³ *Manejo de subproductos*. http://www.cenicafe.org/es/index.php/cultivemos_cafe/manejo_de_subproductos (01 de mayo de 2015).

Las briquetas elaboradas con pulpa de café, según Agroindustria Gerona (*Agico Group*), tienen un valor calorífico neto de 4,461 kcal / kg.³⁴

1.5.3.3. Leña de encino

Los encinos (*Quercus s.p*) habitan desde el nivel del mar hasta los 3 500 msnm, Guatemala es uno de sus centros de origen, se distribuyen en la mayoría de regiones templadas, tropicales y subtropicales. Según la dirección general de investigación de la universidad de san Carlos de Guatemala, solo en Alta Verapaz se registran 17 especies de encino de las 46 que Muller (1942) reconoce en Centroamérica.

Los encinos son árboles cuya longevidad se puede estimar en siglos, su crecimiento es lento, en Alta Verapaz son fuente principalmente de leña y carbón, por lo que se encuentran altamente presionados por el cambio de suelo y la demanda de leña y no se valoran por sus múltiples servicios ecosistémicos que prestan al ambiente natural.³⁵

La leña obtenida del árbol de encino (*Quercus s.p*), Según la FAO, tiene un valor calorífico neto de 4,329 kcal / kg y su tiempo de combustión es prolongado, por lo que en la región este tipo de leña es muy cotizada³⁶

³⁴ Poder calorífico de las briquetas. <http://www.agicogroup.com> (01 de mayo de 2015).

³⁵ Los encinos. <https://www.uv.mx/cienciahombre/revistae/vol25num2/articulos/encinos/> (01 de mayo de 2015).

³⁶ Janczak, Jacek. *Técnicas simples para la obtención de combustibles básicos*. <http://www.fao.org/docrep/p2070s/p2070s06.htm> (01 de mayo de 2015).

CAPÍTULO 2

HIPÓTESIS

La leña de encino es un combustible sólido con una fuerte demanda en la región, debido a su prolongado tiempo de combustión, se utiliza para la obtención de energía, con mucha frecuencia en el sector doméstico, tanto en el área urbana como rural, haciéndose esencial e indispensable en el área rural, también tiene uso en procesos industriales, en hornos, calderas, etc.

La transformación de distintos tipos de residuos (industriales, agroforestales, ganaderos, urbanos, entre otros) que no tienen uso benéfico o si lo tienen es parcial y que generalmente contaminan, en briquetas ecológicas, las cuales tienen grandes ventajas sobre la leña de madera, podría reducir la demanda de leña y mitigar efectos negativos de los residuos al medio ambiente.

Según la Agroindustria Gerona (*Agico Group*), las briquetas elaboradas con pulpa de café y aserrín, tienen un poder calorífico neto promedio de 4,387 kcal / kg, por otro lado la FAO en Guatemala indica que el poder calorífico neto de la leña de encino es de 4,329 kcal / kg.

Con base a lo anterior se planteó la hipótesis: “Que la combustión de la briquetas ecológicas elaboradas en base a pulpa de café y aserrín, presentará menor densidad de humo, menor porcentaje de cenizas, mayor tiempo de combustión y mayor temperatura que la combustión de leña de encino, debido a su densificación lograda por el uso de una fuerza de presión de 1,95 MPa y melaza como aglutinante orgánico y contenido de humedad”. Ya que en cuanto

a poder calorífico neto las briquetas de pulpa de café y aserrín, no tienen gran diferencia sobre el poder calorífico neto de la leña de encino.

CAPÍTULO 3

METODOLOGÍA

A continuación, se detallan los métodos y técnicas que se utilizaron para llevar a cabo la investigación, los cuales se describen en los primeros cinco incisos. El primero hace referencia al diseño de la máquina briquetadora adecuado a las condiciones socioeconómicas y culturales de la región, el segundo se centra en los tratamientos evaluados en la investigación, en el tercero se establece el diseño experimental y el análisis estadístico utilizado. El cuarto inciso hace énfasis a las variables respuesta evaluadas y en el último se incluyen las actividades de manejo del experimento.

3.1. DISEÑO DE MÁQUINA BRIQUETADORA

Para realizar la investigación, fue necesario construir una máquina briquetadora, tomando en cuenta aspectos socioeconómicos y culturales de la población en la región, como la costumbre de usar leños con forma cilíndrica, el almacenamiento de forma apilado y la comercialización por carga de leña.

El diseño de esta máquina es básicamente una prensa hidráulica conformada por una estructura metálica, los moldes, un pistón, un filtro y un gato hidráulico de 16 toneladas, el diseño de la máquina permitió elaborar briquetas en forma cilíndrica, para imitar la forma de los leños tradicionales.

De acuerdo a lo anterior se utilizó el siguiente diseño de máquina briquetadora.

FIGURA 1
MÁQUINA BRIQUETADORA



Fuente: Datos de campo 2 016.

En las figuras 1 y 14, se observa el funcionamiento de la máquina briquetadora (1), en donde el pistón tiene movimiento vertical y es empujado por el gato hidráulico (2). La mezcla de las briquetas es introducida en los tubos molde, el martillo hidráulico o pistón se encaja con los moldes, se asegura el sistema y se empieza a ejercer presión de manera manual con el brazo del gato hidráulico, de esta manera el muelle de extensión tiene movimiento vertical descendente, empuja el pistón con la placa inferior del gato, ejerce presión a la mezcla y elimina el agua a través de la escotilla filtro. Cuando el sistema empieza a tronar, indica que el proceso de prensado ha finalizado, se abre la escotilla filtro y se procede a sacar la briqueta, ejerciendo presión con el martillo y el gato hidráulico, esto para no deformar la briqueta.

Con esta máquina briquetadora se elaboraron leños en forma cilíndrica con un diámetro de 0,08 m y una altura de 0,105 m a 0,15 m acorde al material a densificar y el tipo de aglutinante, ya que no todos los materiales tienen la misma capacidad de adhesión.

Esta máquina briquetadora ejerce presión a través de un gato hidráulico de 16 toneladas de capacidad (16 000 kg), por lo tanto ejerce una presión de 1,95 MPa (19,89 kg / cm²).

3.2. TRATAMIENTOS EVALUADOS

Se evaluó la combustión de las briquetas ecológicas elaboradas a partir de dos tipos de residuos; aserrín y pulpa de café. De los cuales se obtuvo 5 tratamientos con distintas composiciones de cada residuo, en los que se incluyeron 100 % de cada residuo, mezclas de pulpa de café – aserrín, que iban en composiciones de 25 % - 75 %, 50 % - 50 % y 75 % - 25 %.

Así mismo se conoció el efecto de la melaza, que fue usado como aglutinante, en las propiedades físicas y de formación de la briqueta, previo a la combustión.

3.3. DISEÑO EXPERIMENTAL

Para la evaluación de la combustión de las briquetas se tomaron 2 tipos de residuos como tratamientos, usando el diseño experimental arreglo completamente al azar con 4 repeticiones, cada repetición en el proceso de incineración tuvo un total de 5 briquetas.

R: Repeticiones (5 briquetas por repetición)

T: Tratamiento.

Los tratamientos se distribuyeron de la siguiente manera:

T1: Briqueta elaborada en base a 100 % pulpa de café

T2: Briqueta elaborada en base a 75 % pulpa de café - 25 % aserrín

T3: Briqueta elaborada en base a 50 % pulpa de café - 50 % aserrín

T4: Briqueta elaborada en base a 25 % pulpa de café - 75 % aserrín

T5: Briqueta elaborada en base a 100 % aserrín

T₀: Testigo (leña de encino).

El tamaño total del área experimental fue de 12 m², 4 m² se usaron para la implementación de la máquina briquetadora, 8 m² para el secado, el cual se dividió de la siguiente manera; 4 m² para el secado de los 2 tipos de residuos previo al prensado de las briquetas y 4 m² secado de las briquetas después del prensado.

El área experimental de secado para los tratamientos fue un tapanco, que en la finca se usa para el secado de granos básicos, como maíz y frijol.

3.3.1. Análisis estadístico

El análisis se basó en el siguiente modelo estadístico:

$$Y_{ij} = \mu + S_{pi} + E_{ij}$$

En Donde:

i: 1, 2, 3, 4, 5 tratamientos

j: 1, 2, 3, 4 repeticiones

Y_{ij} : Variable respuesta correspondiente al i -ésimo tratamiento (combustión de briquetas elaboradas en base a 2 tipos de residuos) de la j -ésima repetición (número de briquetas utilizadas para el proceso de incineración).

μ : Efecto de la media general común antes de los tratamientos, referente a las condiciones homogéneas en la elaboración de las briquetas a evaluar durante su combustión a través del proceso de incineración.

S_{pi} : Efecto i -ésimo tratamiento (combustión de briquetas elaboradas en base a 2 tipos de residuos a evaluar).

E_{ij} : Error experimental correspondiente al i -ésimo tratamiento.

3.4. VARIABLES RESPUESTA

VARIABLES que fueron determinadas a través del análisis inmediato de un combustible sólido, basándose en la metodología de la investigación “Fabricación de briquetas con aserrín blanco de pino. Análisis inmediato y obtención de su poder calorífico”, del Grupo de Investigación en Energías Renovables (*GIDER*) y la metodología del documento Fuentes de energía no renovables, de la Universidad de Vigo, Pontevedra, España. Ambas metodologías toman en cuenta las normas ISO 1171, 589 y 562, establecidas por la Organización Internacional de Normalización (*ISO*). Y las normas ASTM D-3173, D-3303, D-3174 y D-3172 de la Sociedad Americana de Prueba de Materiales (*ASTM*).

3.4.1. Características de la briqueta medidas durante la combustión

Para medir estas variables fue necesario que las briquetas alcancen un 12 % de humedad y reducir su tamaño a fragmentos no mayores de 2 cm de diámetro, los pedazos de las briquetas fueron pesados en una balanza analítica para obtener masas exactas.

3.4.1.1. Tiempo de incineración y temperatura máxima alcanzada

Fue determinado a través de la combustión completa de los fragmentos de briqueta cuyo tamaño era menor a 2 cm de diámetro, en una estufa prefabricada tipo *Rocket* o cohete.

Se obtuvo a través de la combustión de 10 g de la briqueta, de cada tratamiento, en la estufa prefabricada. Midiendo la temperatura a través de un pirómetro y el tiempo desde que inicia la quema de la briqueta hasta la extinción, las tomas de datos se hicieron con intervalos de un minuto, cuando la briqueta alcanzó la combustión completa el tiempo se detuvo (cuando solo quedaba cenizas).

3.4.1.2. Densidad de humo producido

Para determinar este porcentaje se hicieron capturas fotográficas del humo producido durante la combustión de las briquetas, con un fondo blanco para no distorsionar el color, para luego comparar las imágenes obtenidas con la escala de Ringelmann. Así mismo al observar el humo producido por la combustión de la briqueta, fue comparado con la escala Ringelmann, esto para no tener variaciones en los resultados (ver figura 3).

3.4.1.3. Porcentaje de cenizas

Se pesó 10 g de la briqueta, de cada tratamiento, que se combustionaron en la estufa de campo tipo cohete hasta llegar a ceniza, por último se pesó la ceniza que quedó en la estufa.

De esta manera el contenido de cenizas vendrá dado por:

$$\% \text{ Cenizas (a)} = (m_1 / m) \times 100$$

Donde:

m: masa de la briqueta

m₁: masa de la ceniza

Para la medición de cada variable respuesta durante la combustión de los tratamientos (briquetas), se valoró la medición de parámetros físicos como; la humedad, densidad, dureza, color y friabilidad, ya que influyen en el comportamiento energético de la briqueta. Así mismo garantizan la calidad de la briqueta.

3.4.2. Caracterización física de la briqueta

3.4.2.1. Porcentaje de humedad

Se determinó la humedad de las briquetas de cada tratamiento a través de su masa, la cual se midió después de 5, 10, 15, 20, 25, 30, y 35 días, durante el proceso secado hasta alcanzar el 12 % de humedad, para ello se empleó el método gravimétrico.

Porcentaje de humedad gravimétrica: fue necesario reducir el tamaño de la briqueta a granos de 1 mm, esto con la ayuda de un tamiz de 1 mm, los granos de las briquetas fueron pesados en una balanza analítica para obtener masas exactas. Así mismo todo crisol utilizado fue previamente calcinado durante 15 min en la mufla a 105 °C, esto también precalentó el horno para eliminar la humedad dentro del mismo.

Se etiquetaron y pesaron 2 crisoles por separado, se colocó y pesó en cada crisol 10 g de briqueta por cada tratamiento. Los crisoles se introdujeron a la mufla a una temperatura de 105 °C durante 24 h, después de haber transcurrido ese tiempo fueron pesados de nuevo.

De esta manera el contenido de humedad en la muestra vendrá dada por:

$$\% \text{ Humedad higroscópica } (\% w_t) = ((m - m_1) / m) \times 100$$

Donde:

m: masa de la briqueta después del secado en campo

m_1 : masa de la briqueta después del secado en campo -
masa de la briqueta secada al horno

3.4.2.2. Densidad

Se calculó después del secado de las briquetas, cuando estas alcanzaron el 12 % de humedad, se tomó en cuenta la relación cociente entre la masa de la briqueta y su volumen.

$$\rho = m / V$$

Donde:

ρ : es la densidad

m : es la masa

V : es el volumen, dado por $V = \pi * r^2 * h$, donde r es el radio de la briqueta y h su altura.

3.4.2.3. Dureza

La dureza se determinó a través del uso de los lápices de dureza del laboratorio de la Carrera de Geología del CUNOR y la tabla de dureza de Mohs (ver cuadro 15).

3.4.2.4. Color

Se determinó a través de la comparación del color de la briqueta, después del secado, con los colores de la tabla de Munsell del laboratorio de Suelos de la Carrera de Agronomía del CUNOR.

3.4.2.5. Friabilidad

Este parámetro fue determinado a través del método "Golpe contra el suelo", el cuál consistió en dejar caer las 20 briquetas de cada tratamiento sobre suelo cerámico desde una altura de 1 m, posteriormente se contó cuantas se

quebraron en 2, 3, 4, o más trozos, este método se basa en el índice de friabilidad (FR), cuya fórmula es:

$$FR = NF / NI$$

Donde:

NF: número de briquetas al final del ensayo (se cuentan las enteras y las fracciones de las que se quebraron)

NI: número de briquetas al inicio del ensayo

Regularmente el valor de FR es mayor o igual a 1, por lo tanto a mayor valor de FR, mayor será la friabilidad y menor la resistencia al golpeteo.

3.5. MANEJO DEL EXPERIMENTO

El manejo del experimento estuvo en función de la recolección de los residuos agroforestales pulpa de café y aserrín, la elaboración de las briquetas con los residuos agroforestales, el uso de melaza como aglutinante. Así mismo el secado para los residuos agroforestales antes del briquetado, y después de este, con el objeto de evaluar las propiedades físicas y químicas de las briquetas.

3.5.1. Obtención de los residuos agroforestales

La pulpa de café fue obtenida de la finca El Rosario, ubicada en el municipio de San Pedro Carchá, el aserrín de pino (*Pino maximinoi*) se obtuvo de las carpinterías del municipio de San Juan Chamelco, Alta Verapaz.

Una vez recolectado el residuo agroforestal se procedió a realizar una limpieza de impurezas, que consistió en eliminar todos los residuos que no sean pulpa de café o aserrín.

3.5.2. Secado de los residuos agroforestales

Se dejó secar 20 días el residuo en un tapanco utilizado para el secado de granos básicos en la finca Chisap, con el afán de alcanzar una humedad de 10 % - 12 %, para que la humedad de los residuos no interfiera en el proceso de briquetado. Así mismo para eliminar el mayor contenido de mucilago de la pulpa de café.

3.5.3. Producción de briquetas con residuos agroforestales (pulpa de café y aserrín)

3.5.3.1. Composición de la mezcla para briquetación

Las diferentes composiciones de los tratamientos mencionados en el apartado 3.3. (Diseño experimental), fueron mezclados con agua y melaza, en relación 5 partes de residuos por 1,5 partes de agua, de la cual se obtuvo una mezcla pastosa. La melaza fue disuelta en agua, conformando el 16 % de 1,5 partes de agua.

3.5.3.2. Proceso de mezclado y homogenización de la mezcla

El proceso de mezclado se realizó de manera manual, con la ayuda de una pala de mano.

Para verificar si la mezcla contenía la cantidad de agua adecuada, se realizó el ensayo de humedad, que consistió en formar una bola con la mezcla y verificar su consistencia, si no se desmorona es la adecuada (ver figura 2).

3.5.3.3. Compactación de la mezcla

Proceso por el cual se obtuvieron las briquetas de forma cilíndrica, esto debido a la compactación de los residuos agroforestales brindada por la máquina briquetadora. Esta

compactación consistió en pasar la mezcla por la máquina (prensa) para moldearla y así eliminar la mayor cantidad de líquido de la masa. Al densificar las partículas de los residuos agroforestales se eliminan también los poros entre ellas.

3.5.3.4. Secado de briquetas

El secado de las briquetas húmedas, obtenidas de la compactación de la mezcla, se realizó en el tapanco para el secado de granos básicos de la finca Chisap, hasta alcanzar un 12 % de humedad.

3.5.4. Empacado y almacén de las briquetas

El empaque consistió en envolver las briquetas en papel film, cada paquete de 4 briquetas. Los paquetes fueron almacenados bajo techo sobre una tarima de madera.

3.5.5. Caracterización de las briquetas

En esta etapa de la investigación se registraron las principales características físicas y químicas que influyen en el comportamiento energético de las briquetas, las cuales son:

→ Físicas:

- ✓ Forma
- ✓ Tamaño
- ✓ Color
- ✓ Dureza
- ✓ Densidad
- ✓ Humedad
- ✓ Friabilidad

→ Químicas:

- ✓ Composición química por compuestos (%)
- ✓ Poder calorífico (kcal / kg)

3.6. RECURSO HUMANO

El recurso humano que se utilizó durante el desarrollo de las distintas actividades para llevar a cabo la investigación fueron:

- a. Asesor de tesis
- b. Estudiante de tesis
- c. 2 Trabajadores de campo de la empresa RENACE

3.7. EQUIPO, MATERIALES E INSUMOS

a. Equipo e instrumentos

- Máquina briquetadora
- Mufla
- Pirómetro
- Tarimas de madera
- Tapesco para el secado de granos básicos
- Estufa prefabricada tipo *Rocket*
- Balanza analítica
- Lápices de dureza
- Tabla de Munsell
- Cámara fotográfica
- Escala de Ringelmann
- Crisoles
- Tamiz de 1 mm
- Recipientes con medidas de volumen

→ Cronómetro

b. Materiales y herramientas

→ Libreta de campo

→ Machete

→ Palas

→ Cubetas plásticas

→ Tijeras

c. Insumos

→ Papel *film*

→ Residuos agroforestales (pulpa de café y aserrín)

→ Agua

→ Caña de azúcar (melaza)

→ Papel bond blanco

CAPÍTULO 4

ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS

El presente capítulo detalla los resultados obtenidos durante el tiempo de ejecución del estudio, se divide en tres partes fundamentales. La primera consiste en la tabulación de resultados de la combustión de los distintos tratamientos (briquetas elaboradas a partir de pulpa de café y aserrín), su análisis y discusión. La segunda comprende un análisis sobre el uso de la melaza como aglutinante, sobre las propiedades físicas de las briquetas evaluadas y los parámetros obtenidos. Y la última en un análisis económico para comparar los costos entre las briquetas de pulpa de café, aserrín y la leña de encino.

4.1. VARIABLES RESPUESTA

Los resultados promedio obtenidos de las variables respuesta de la combustión de las briquetas elaboradas a base de aserrín, pulpa de café y la leña de encino, se resumen en el cuadro 1.

CUADRO 1
PROMEDIO DE LAS VARIABLES RESPUESTA

Tratamientos	Tiempo de incineración (min)	Temperatura máxima alcanzada (°C)	Porcentaje de ceniza (% en masa)	Porcentaje de humo producido (% Densidad)
T1	28,92	413	6,44	20
T2	27,08	403	6,92	20
T3	26,22	413,8	7,318	20
T4	24,48	400,6	8,264	20
T5	22,6	393,6	8,998	20
T _o	28,38	393	11,12	20

* 5 repeticiones por combustión (cada repetición 4 briquetas).

Fuente: investigación de campo 2016.

En el cuadro 1, se observa que mientras mayor sea el tiempo de incineración, es mejor la combustión, se produce menor cantidad de ceniza y se tiene más tiempo de calor, aunado a esto, las altas temperaturas son favorables, por lo que T1 muestra en general más criterios para ser seleccionado como una mejor opción o alternativa a la leña de encino.

4.1.1. Tiempo de incineración

En el cuadro 1, se puede observar que el tratamiento 1 presentó el mayor tiempo de incineración, fue de 28,92 min, seguido del tratamiento 2, el cual presentó un tiempo de 27,08 min y que invariablemente el tiempo de incineración disminuyó a medida que aumentaba el porcentaje de aserrín en los tratamientos.

Los resultados obtenidos sobre el tiempo de incineración de las briquetas para cada tratamiento se presentan en el siguiente cuadro.

CUADRO 2
TIEMPO DE INCINERACIÓN PARA CADA TRATAMIENTO Y
REPETICIÓN (min)

Repetición	Tratamiento					
	T1	T2	T3	T4	T5	T _o
I	28	28	25,3	24,3	21,9	26
II	28,5	27,4	26,9	25	22,9	29
III	30	26	25,7	24	23	30
IV	29	26,7	26,2	24,7	22,7	27,3
V	29,1	27,3	27	24,4	22,5	29,6
Promedio	28,92	27,08	26,22	24,48	22,6	28,38

Fuente: investigación de campo 2016.

En el cuadro 2, se observan los resultados sobre el tiempo de incineración de las briquetas de cada tratamiento, obtenidos durante la ejecución del estudio, así mismo se muestra el tiempo de incineración por repetición y el promedio para cada tratamiento.

El análisis de varianza de la variable tiempo de incineración de las briquetas de cada tratamiento se presenta en el siguiente cuadro.

CUADRO 3
ANDEVA TIEMPO DE INCINERACIÓN

FV	SC	GL	CM	Fo.	Ft.
Tratamientos	144,028	5	28,805 6	35,635 7	2,620 6
Error	19,4	24	0,808 3		
Total	163,428	29			

Fuente: investigación de campo 2016.

El cuadro 3, indica que existe diferencias altamente significativas en los distintos tratamientos evaluados, en el que la F observada tiene un valor de 35,635 7 que sobrepasa el valor de 2,620 6 de la F tabulada con un nivel de significancia de 0,05. Por lo que se decidió efectuar la prueba de comparación múltiple de medias de TUKEY, cuyo valor de comparación es de 1,676 6. El resumen se muestra en el siguiente cuadro:

CUADRO 4
PRUEBA DE TUKEY TIEMPO INCINERACIÓN (min)

Tratamiento	Promedio	Agrupación TUKEY
T1	28,92	A
T ₀	28,38	A
T2	27,08	B
T3	26,22	B
T4	24,48	C
T5	22,6	D

Fuente: investigación de campo 2016.

Puede observarse que los tratamientos 1 y el testigo tuvieron mayor tiempo de incineración y por pertenecer a la misma agrupación se consideran estadísticamente iguales, seguido por los tratamientos 2 y 3, estadísticamente iguales y con menor tiempo de

incineración los tratamientos 4 y 5, son las agrupaciones C y D respectivamente.

El cuadro 4, también indica que el tratamiento 1 fue el único que sobrepasó el tiempo de combustión del testigo, aunque pertenezca a la misma agrupación estadística.

Lo anterior demuestra que a medida que aumenta la cantidad de pulpa (o disminuye la cantidad de aserrín), se obtiene una mejor calidad de briqueta. Esto porque las propiedades de la pulpa, tales como tamaño de grano, facilidad de compresión y absorción de humedad, permite que la presión ejercida logre menos porosidad y por lo tanto mayor densidad aparente, lo que incide en mayor tiempo de incineración.

4.1.2. Temperatura máxima alcanzada

En el cuadro 1, se puede observar que el tratamiento 3 presentó la temperatura más alta, fue de 413,8 °C, seguido del tratamiento 1 con una temperatura de 413 °C, en tercer lugar se encuentra el tratamiento 2 con una temperatura de 413 °C y que invariablemente la temperatura disminuyó hasta el tratamiento 5.

Los resultados obtenidos sobre las temperaturas máximas producidas por las briquetas para cada tratamiento se presentan en el siguiente cuadro.

CUADRO 5
TEMPERATURA MÁXIMA ALCANZADA POR CADA
TRATAMIENTO Y REPETICIÓN (°C)

Repetición	Tratamiento					T _o
	T1	T2	T3	T4	T5	
I	423	393	404	408	388	403
II	408	410	417	406	386	401
III	419	408	419	390	400	383
IV	412	399	414	395	398	384
V	403	405	415	404	396	394
Promedio	413	403	413,8	400,6	393,6	393

Fuente: investigación de campo 2016.

En el cuadro 5, se observan los resultados sobre la temperatura máxima alcanzada de las briquetas de cada tratamiento, obtenidos durante la ejecución del estudio, así mismo se muestra la temperatura máxima alcanzada por repetición y el promedio para cada tratamiento.

El análisis de varianza de la variable temperatura máxima alcanzada de las briquetas de cada tratamiento se presenta en el siguiente cuadro.

CUADRO 6
ANDEVA TEMPERATURA MÁXIMA ALCANZADA

FV	SC	GL	CM	Fo.	Ft.
Tratamientos	2 052,966	5	410,593 3	7,402 5	2,620 6
Error	1331,2	24	55,466 6		
Total	3 384,166	29			

Fuente: investigación de campo 2016.

El cuadro 6, indica que existe diferencias altamente significativas en los distintos tratamientos evaluados, en el que la F observada tiene un valor de 7,402 5 que sobrepasa el valor de 2,620 6 de la F tabulada con un nivel de significancia de 0,05.

Por lo que se decidió efectuar la prueba de comparación múltiple de medias de TUKEY, cuyo valor de comparación es de 13,888 8. El resumen se muestra en el siguiente cuadro:

CUADRO 7
PRUEBA DE TUKEY TEMPERATURA MÁXIMA ALCANZADA (°C)

Tratamiento	Promedio	Agrupación TUKEY
T3	413,8	A
T1	413	A
T2	403	A
T4	400,6	A
T5	393,6	B
Testigo	393	B

Fuente: investigación de campo 2016.

Puede observarse que el tratamiento 3, tuvo la mayor temperatura, seguido del tratamiento 1, con una diferencia de 0,8. Los tratamientos 1, 2 y 4, al igual que el tratamiento 3 pertenecen a la misma agrupación (A), es decir estadísticamente iguales, por último con menor temperatura los tratamientos 5 y testigo, con agrupación B, estadísticamente diferentes al grupo A.

El cuadro 4, también indica que el tratamiento 5 fue el único que no supero la temperatura máxima producida por el testigo.

Lo anterior demuestra que a medida que aumenta la densidad aparente de la briqueta, se produce mayor temperatura durante la combustión, las mezclas entre pulpa de café y aserrín (T1, T2, T3 y T4), permitieron una mejor densificación debido a que la pulpa al entrar en contacto con la solución de agua y melaza, se vuelve un material viscoso, ya que absorbe mejor el aglutinante que el aserrín.

4.1.3. Densidad de humo producido

En el cuadro 1, se puede observar que la combustión de las briquetas de los distintos tratamientos y el testigo, presentó la misma densidad de humo.

Los porcentajes de humo, producidos por la combustión de las briquetas para cada tratamiento, se presentan en el siguiente cuadro.

CUADRO 8
DENSIDAD DE HUMO PRODUCIDO POR CADA TRATAMIENTO Y
REPETICIÓN (%)

Repetición	Tratamiento					
	T1	T2	T3	T4	T5	T _o
I	20	20	20	20	20	20
II	20	20	20	20	20	20
III	20	20	20	20	20	20
IV	20	20	20	20	20	20
V	20	20	20	20	20	20
Promedio	20	20	20	20	20	20

Fuente: investigación de campo 2016.

En el cuadro 8, se observan los resultados sobre la densidad de humo producida por la combustión de las briquetas de cada tratamiento, obtenidos durante la ejecución del estudio, así mismo se muestra la densidad de humo producida por repetición y el promedio para cada tratamiento.

No fue necesario realizar el análisis de varianza de la variable densidad de humo producido por la combustión de las briquetas de cada tratamiento, ya que no existe varianza entre los tratamientos ni las repeticiones. Esto se debe a que todos los tratamientos alcanzaron el 12 % de humedad, que según las especificaciones de las normas ISO para un combustible sólido, el parámetro permite una combustión completa, ya que una alta densidad de humo indica una combustión incompleta, debido al material a combustionar y la humedad.

Sin embargo es de hacer notar que la combustión de la leña de encino produjo humo de manera constante, desde el inicio hasta el final, en cambio las briquetas produjeron humo únicamente al inicio y al extinguirse la llama, no durante el tiempo que se mantuvo llama intensa.

4.1.4. Porcentaje de ceniza

En el cuadro 1, se puede observar que el testigo durante la combustión produjo mayor cantidad de ceniza 11,12 %, seguido por el tratamiento T5 con 8,998 %, el T4 con 8,264 %, el T3 con 7,318 %, el T2 con 6,92 % y finalmente el tratamiento que menos produjo ceniza fue el T1 con 6,44 %.

Los resultados obtenidos sobre los porcentajes en masa de la combustión producida por las briquetas para cada tratamiento se presentan en el siguiente cuadro.

CUADRO 9
PORCENTAJE DE CENIZA PRODUCIDO POR CADA
TRATAMIENTO Y REPETICIÓN (% masa)

Repetición	Tratamiento					
	T1	T2	T3	T4	T5	T _o
I	5,4	6,25	8	8,1	8,86	10,4
II	7	6,83	7	8,18	9,65	10,69
III	6,9	7	7,34	8,44	8,34	11,8
IV	6,3	7,4	7,11	7,6	9	10,71
V	6,6	7,12	7,14	9	9,14	12
Promedio	6,44	6,92	7,318	8,264	8,998	11,12

Fuente: investigación de campo 2016.

En el cuadro 9, se observan los resultados sobre el porcentaje de ceniza producido por la combustión de las briquetas de cada tratamiento, obtenidos durante la ejecución del estudio, así mismo se muestra el porcentaje de ceniza producido por repetición y el promedio para cada tratamiento.

El análisis de varianza de la variable porcentaje de ceniza producido por las briquetas de cada tratamiento se presenta en el siguiente cuadro.

CUADRO 10
ANDEVA PORCENTAJE DE CENIZA

FV	SC	GL	CM	Fo.	Ft.
Tratamientos	73,389 7	5	14,677 9	49,752 4	2,620 6
Error	7,080 4	24	0,295		
Total	80,470 2	29			

Fuente: investigación de campo 2016.

El cuadro 10, indica que existe diferencias altamente significativas en los distintos tratamientos evaluados, en el que la F observada tiene un valor de 49,752 4 que sobrepasa el valor de 2,620 6 de la F tabulada con un nivel de significancia de 0,05.

Por lo que se decidió efectuar la prueba de comparación múltiple de medias de TUKEY, cuyo valor de comparación es de 1,012 9. El resumen se muestra en el siguiente cuadro:

CUADRO 11
PRUEBA DE TUKEY PORCENTAJE DE CENIZA (% masa)

Tratamiento	Promedio	Agrupación TUKEY
T ₀	11,12	A
T5	8,998	B
T4	8,264	C
T3	7,318	D
T2	6,92	E
T1	6,44	F

Fuente: investigación de campo 2016.

Puede observarse que el tratamiento 1, tuvo el menor porcentaje de ceniza producido, su agrupación es completamente distinta a la de los demás tratamientos, por lo que estadísticamente es distinto. Todos los tratamientos son de agrupación distinta, es decir estadísticamente distintos, mientras más aserrín contenían los tratamientos, mayor ceniza se produjo.

El cuadro 4, también indica que todos los tratamientos, al momento de ser combustionados produjeron menor cantidad de ceniza que el testigo.

Lo anterior demuestra que a medida que aumenta la cantidad de pulpa (o disminuye la cantidad de aserrín) en los tratamientos, se obtiene una mejor densificación. Esto porque las propiedades de la pulpa, tales como tamaño de grano, facilidad de compresión y absorción de la solución de agua y melaza, permite que la presión ejercida de 1,95 MPa (considerada una presión muy baja en procesos de densificación) logre menos porosidad y por lo tanto mayor densidad aparente, lo que incide en menor cantidad de ceniza.

4.2. Uso de la melaza como aglutinante para la elaboración de briquetas

Para la masa de las briquetas, se usó una relación en volumen de la biomasa y el agua de 5-1,5, es decir 5 partes de residuos agroforestales, ya sea aserrín, pulpa de café o la mezcla entre ellos en los porcentajes que requerían los tratamientos.

La melaza fue disuelta con agua, conformando el 16 % de la 1,5 partes de agua. Es decir por cada litro de agua empleado en el proceso de briquetado se utilizó 0,160 litros de melaza.

El uso de la melaza como aglutinante, en el proceso de briquetado, le confirió a los 5 tratamientos, ciertas características físicas de calidad a las briquetas producidas con pulpa de café y aserrín, las cuales se presentan en el siguiente cuadro.

CUADRO 12
PROMEDIO DE LAS CARACTERÍSTICAS FÍSICAS DE LAS BRIQUETAS DE CADA
TRATAMIENTO

Trat.	Largo (m)	Diámetro (m)	Forma	Días de secado	Humedad (%)	Masa (kg)	Densidad aparente (kg / m ³)	Dureza Mohs	Friabi- lidad	Color Munsell
T1	0,15	0,08	Cilíndrica	35	12	0,272	90,7	2	1	HUE 7.5YR 3/2
T2	0,13			29		0,241	93	2		HUE 10YR 4/6
T3	0,125			25		0,251	100,64	2		HUE 7.5YR 3/3
T4	0,12			22		0,181	75,67	1		HUE 10YR 5/6
T5	0,105			19		0,153	73,03	1		HUE 10YR 6/6

Fuente: investigación de campo 2016.

* Color Munsell, ver cuadro y figura

En el cuadro 12, se puede observar que los 5 tratamientos, tuvieron el mismo dato en cuanto a ciertas propiedades como; humedad de 12 %, lo cual indica que el combustible sólido (briqueta), presenta una buena combustión y friabilidad con una valor de 1, es decir que es material resistente al golpeo.

El diámetro fue de 8 cm, mismo para todos los tratamientos, ya que se utilizó la misma máquina briquetadora, la altura varió, ya que los residuos agroforestales no tienen la misma capacidad de adhesión ni el mismo tamaño de partículas, lo cual no permitió aumentar su altura, ya que las briquetas presentaban grietas o deformidades.

En la ejecución del proyecto se observó que a menor tamaño de la partícula, con una presión constante de 1,95 MPa, menor será la altura de la briqueta, esto se observó con el comportamiento del tratamiento 5 (100 % aserrín). Es decir a menor tamaño de la partícula, mayor será la fuerza de presión necesaria para la fabricación de briquetas, de lo contrario la briqueta tendrá mayor espacio poroso, eso significa mayor capacidad de retención agua, menor dureza, baja densidad aparente, lo cual dará como resultado una combustión con productos no deseados, como la ceniza.

En cuanto al parámetro masa. los tratamientos que mayor valor presentaron son los que contenían mayor cantidad de pulpa (tratamientos 1, 2 y 3), esto influyó de manera directa en el valor de la densidad aparente, esto se demostró con el tratamiento 3, que tuvo el mayor valor de masa y la densidad más altas, seguido por los tratamientos 2 y 1, lo cual influyó en el proceso de incineración, ya que una alta densificación da como resultado un biocombustible que presente altas temperaturas al ser combustionado, esto se logró observar en la variable temperatura máxima alcanzada, en donde el tratamiento 3 tuvo la más alta temperatura, seguido por los tratamientos 1 y 2, siendo de la misma agrupación según la prueba de Tukey, es decir estadísticamente iguales.

La dureza en madera es un parámetro de calidad, ya que a mayor dureza, más alta es la densidad y mejor será la combustión, esto se demostró durante la ejecución del proyecto en donde los tratamientos 1, 2 y 3 presentaron los mejores resultados.

Después de determinar la humedad a través del método gravimétrico o con la ayuda de un higrómetro, el color es un parámetro que podría determinar el contenido de humedad de la briqueta en campo. Ya que mientras más seco este un material generalmente tiende a presentar colores más claros.

En cuanto al tiempo de secado el tratamiento 5, fue el que mejor resultado presentó, alcanzando el 12 % de humedad a los 19 días, después del densificado, el tiempo de secado fue aumentando conforme el tratamiento contenía mayor porcentaje de pulpa de café.

4.3. ANÁLISIS ECONÓMICO

La máquina briquetadora semi-industrial utilizada para este estudio, tiene la fuerza de presión de 1,95 MPa (19,89 kg / cm²), esto hace que sea una máquina briquetadora hidráulica con tecnología semi-industrial debido a su tipo de estructura, aunque ejerza una presión menor a 5 MPa, esta máquina tiene un costo de 4 000 quetzales.

El diseño de la máquina no permite ser maniobrada por una persona, es necesario contar con dos para la extracción de las briquetas después del densificado, como se observa en la figura 7, en donde una persona ejerce presión con el gato hidráulico y la otra sujeta una bandeja para extraer las briquetas, lo que hace el proceso de briquetado poco eficiente y aumenta el costo de mano de obra.

El tiempo promedio para la elaboración de 4 briquetas, desde la mezcla de los residuos hasta el briquetado, es de 8 minutos. Si solo se toma en cuenta los tratamientos 1, 2 y 3, que presentaron las mejores características físicas y químicas, la masa promedio de cada briqueta sería de 0,255 2 kg. Esto indica que la máquina briquetadora tiene la

capacidad de producir 30 briquetas por hora (7,66 kg), con un jornal de 8 horas diarias se podrá tener una producción de 240 briquetas.

El precio de los residuos agroforestales, aserrín y pulpa de café, comercializado en saco de 45 kg (100 libras) es de Q. 5,00, el traslado de donde se producen los residuos hasta la fincan experimental Chisap fue de Q. 7,00 por saco. El precio de la melaza, comercializado por galón es de Q. 25,00 y se emplea 0,30 litros por cada 2 kg de residuos agroforestales a densificar.

Según el Ministerio de Trabajo y Previsión Social, el salario mínimo diario para actividades agrícolas es de Q. 86,90.

En el siguiente cuadro se presenta el costo de producción mensual de briquetas con una masa de 0,255 2 kg:

CUADRO 13
COSTO DE PRODUCCIÓN DE 7 200 BRIQUETAS

	Mensual (Q)	Q.
Costos directos		7 755
Materia prima consumida		
Residuos agroforestales	216	
Aglutinante (melaza)	1 875	
Empaque	450	
Mano de obra directa (2 personas)	5 214	
Costos indirectos		925,73
Mano de obra indirecta (Asesoría técnica)	200	
Depreciación maquina briquetadora	66,67	
Insumos o recursos físicos (cubetas, palas, etc.)	50	
Transporte de residuos agroforestales	302,4	
Alquiler taller de briquetado, secado y almacén	250	
Servicio agua entubada	5	
Mantenimiento maquina briquetadora	10	
Análisis de laboratorio (caracterización física y química)	41,66	
Total costos de producción		8 680,73
	Descripción	
Número de unidades fabricadas	7 200	
Costo unitario de producción		1,205 6
Utilidad por producto	15 %	0,180 8
Valor de venta (no incluye impuestos)		1,386 5

Fuente: investigación de campo 2016.

De acuerdo a lo anterior, el valor de venta de una briqueta de 0,255 2 kg, es de Q. 1,386 5.

La carga de leña de encino en el mercado local tiene un precio de Q. 10,00, la cual consta en promedio de 10 -12 leños, leños con un largo de 0,45 m - 0,60 m, con un porcentaje de humedad de 10 % - 12 %, cuya masa promedio es de 9 kg.

Lo anterior indica que 1 kg de encino tiene un precio de Q. 1,11. El equivalente en briquetas tiene un precio de Q. 5,546, esto hace que la briqueta elaborada a partir de aserrín y pulpa de café, desde un punto de vista económico sea una alternativa de combustible sólido poco atractiva para las personas en un mercado local y nacional sin conciencia ambiental, debido a que su precio es mayor.

De un árbol de encino maduro se obtiene aproximadamente 12 metros de leña estero, alrededor de 30 cargas de leña de una masa promedio de 9 kg, lo cual indica que la masa de los 12 m de leña estero es de 3 240 kg.

En cuanto a precios, la briqueta se encuentra en desventaja ante la leña de encino, pero las ventajas ambientales que ofrece son mayores, ya que revaloriza residuos agroindustriales que contaminan y podría reducir la presión sobre los recursos naturales que generalmente son limitados. El equivalente de los 3 240 kg de encino, es de 12 696 briquetas que se fabrican en 1,76 meses de producción constante, que resulta mínimo comparado a los 40 o 45 años, que es el tiempo en que los árboles de encino tardan en llegar a su madurez para ser aprovechados como leña.

Las briquetas son una alternativa de leña con altas propiedades físicas y químicas, que mejoran la combustión del encino y que podrían ser un sustituto del mismo. Por otro lado la apreciación, valorización y conservación del encino brinda funciones ecosistémicas, que son

beneficios a los que es difícil darle un valor económico, entre estas funciones están; fuente importante de vida, debido a su utilidad como especie forestal, hábitat para numerosas especies, restauración de bosques, protección contra erosión de suelos, abastecimiento a mantos acuíferos alimento de animales, incorporación de biomasa, liberación de oxígeno, entre otros. Esto a su vez podría permitir un aprovechamiento sostenible del encino, como la elaboración de productos medicinales, colorante, corchos y artesanías con la nuez, hojas, tallos y flores, sin necesidad de talar el árbol.

La demanda de leña según la FAO en Guatemala, es de 3,85 kg en área rural y 2,2 kg en área urbana al día, esta demanda de leña en briquetas, con la máquina briquetadora semi-industrial utilizada en este estudio, se produce en 0,52 h y 0,29 h.

CONCLUSIONES

General

El estudio evaluación de la combustión de briquetas ecológicas, elaboradas a base de pulpa de café y aserrín de pino (*Pinus maximinoi*), generó información sobre la tecnología de fabricación y comportamiento de las briquetas, a través de un proceso semi-industrial que podría adaptar e implementar cualquier persona y deja plasmada otra alternativa para la reutilización, aprovechamiento, reducción de impactos negativos al medio ambiente y generación de combustibles sólidos para la obtención de energía en la región.

Específicas

- a) Los productos de la combustión de los diferentes tratamientos de las briquetas ecológicas elaboradas en base a aserrín y pulpa de café, presentaron diferencias estadísticamente significativas sobre los productos de la combustión de la leña de encino, estos productos fueron mayor tiempo de incineración, mayor temperatura, menor porcentaje de humo y de ceniza.
- b) La combustión del tratamiento 1, 100 % pulpa de café, fue el que mejores resultados presentó en cuanto a tiempo de incineración, que duró 28,92 min, a 413 °C, que estadísticamente es igual al tratamiento 3 (413,8 °C), menor porcentaje de ceniza producido 6,44 %, y una densidad de humo de 20 %, estos datos mejoran los productos de la combustión de leña de encino.

- c)** La combustión de los 5 tratamientos produjeron una densidad de humo de 20 %, esto se debe a que las briquetas alcanzaron el 12 % de humedad, que se recomienda para que el contenido de agua no interfiera en el proceso de combustión, la densidad de humo de 20 % también indica que ecológicamente es una fuente de energía con un grado de contaminación muy bajo según la escala de Ringelmann.

- d)** El uso de la melaza como aglutinante en concentración de 16 % en agua, para la fabricación de briquetas, confirió buenas características físicas a los tratamientos, esto se valoró con densidades comprendidas entre 73 kg / m^3 a 100 kg / m^3 , durezas de 1 a 2 según escala de Mohs y buena resistencia a golpeteo, al momento de ser manipuladas, ya que todos los tratamientos presentaron un FR de 1. La melaza también permitió una forma cilíndrica sin deformación y por su origen orgánico permitió una combustión completa que se reflejó con el 20 % de densidad de humo producido y porcentaje de ceniza menor al 10%, ya que si son inorgánicos produce una densidad de humo mayor y quedan residuos después de la combustión debido a su origen sintético.

- e)** Los tratamientos 1, 2, y 3 presentaron una densidad relativamente alta, mayor a 90 kg / m^3 , esto debido a que contenían mayor cantidad de pulpa de café y las partículas de este residuo, generalmente tienen un tamaño de 5 mm a 10 mm, lo que permite ser aglomeradas con una presión baja ($1,95 \text{ MPa}$), como la que ejerce la máquina briquetadora empleada en el proyecto.

- f)** La dureza 2 según la escala de Mohs, indica que las briquetas presentan una dureza parecida al yeso, tomando en cuenta que son el producto de la densificación de residuos, dato que está por debajo de los 2,5 de dureza que tiene la mayoría de maderas duras, en las que se encuentra el encino.

- g)** Una vez alcanzado el 12 % de humedad, el color de la briqueta es una propiedad física que puede determinar la humedad en campo, esto se debe a que generalmente durante el proceso de secado la biomasa utilizada para la elaboración de briquetas tiende a tomar tonalidades claras.
- h)** La máquina briquetadora hidráulica semi-industrial por su estructura metálica, produce briquetas en forma cilíndrica, como los leños tradicionales, permite obtener una producción constante de 7,66 kg / h (30 briquetas), pero su baja capacidad de presión de 1,95 MPa, no permite la aglomeración de residuos cuyo tamaño de partícula es menor a 0,5 mm, esto se observó durante la ejecución del proyecto con los tratamientos 4 y 5, que contenían mayor porcentaje de aserrín, mismos que presentaron los valores más bajos en cuanto a productos de combustión y características físicas.
- i)** El precio de venta de 1 kg de leña de encino es de Q. 1,11, el equivalente en briquetas tiene un precio de Q. 5,546, lo cual indica que el precio de la leña de encino es 5 veces menor, pero en cuanto a las ventajas ecológicas que ofrecen como; 100 % reciclado, fuente de energía con bajo grado de contaminación, mayor tiempo de incineración, altas temperatura y menor cantidad ceniza producido. Las briquetas podrían ser una alternativa para la obtención de energía y satisfacer en menor tiempo la demanda de leña que según la FAO en Guatemala, es de 3,85 kg en área rural y 2,2 kg en área urbana al día, ya que en un día se producen 61,25 kg (240 briquetas) con un precio de venta de Q. 339,70, que resulta ser una gran cantidad de leña comparado a 0,2 kg de leña que produce un árbol de encino durante el día, cuyo precio es de Q. 0,22 y no incluye el valor intangible de las funciones ecosistémicas de cada árbol de encino para el ambiente natural

RECOMENDACIONES

- a) Elaborar briquetas a base de 100 % pulpa de café con fines de comercialización, por las ventajas estadísticamente significativas que tiene en cuanto a combustión y las propiedades físicas de calidad que alcanza con presiones de densificación bajas.
- b) Mejorar el proceso de secado con el uso de secadoras solares tipo invernadero, hornos o muflas, ya que la pulpa de café es un residuo agrícola que guarda mucha humedad y alarga el proceso de secado al ambiente de la briqueta.
- c) Incluir en el proceso de densificado de los residuos agroforestales para la obtención de briquetas u otros aglutinantes orgánicos, que mejoren las características físicas y que influyan de manera positiva en la combustión de las briquetas, así mismo que tengan un menor precio para reducir costos de producción.
- d) Determinar el color de la briqueta con un rango de 12 % de humedad, evitará repetir durante el secado, el proceso de la metodología gravimétrica para obtener la humedad, lo cual facilitará la determinación de la humedad en el campo, por el cambio de color de la briqueta a tonalidades más claras.
- e) Para densificar residuos agroforestales, cuyas partículas no sean mayor a 5 mm, se debe emplear como mínimo una máquina briquetadora que ejerza una presión de 12,79 MPa (130 kg / cm²), lo que aumentará la densidad, dureza, brindará una buena friabilidad y aumentará el tamaño de la briqueta.

- f)** Para determinar diseño de la máquina briquetadora y la tecnología a emplear se debe contemplar, el destino de producción, ya sea para consumo en el hogar o para ser comercializada y de acuerdo a la demanda de leña en el mercado se debe aumentar la capacidad de transformación de residuos de la máquina briquetadora.

- g)** Para hacer más eficiente el diseño de la máquina briquetadora semi-industrial tipo hidráulica, usada en este estudio y reducir el costo en mano de obra, se debe incorporar al sistema un juego de resortes con una placa que mantenga fijo el gato hidráulico y le regrese a su estado inicial o cambiar el gato hidráulico por un compresor, esto permitirá que la máquina sea maniobrada por una sola persona (ver figura 14).

BIBLIOGRAFÍA

Análisis próximos. http://www.unalmed.edu.co/~ctcarbon/analisis_proximos.htm (01 de octubre 2015).

Asociación Nacional del Café -ANACAFE-. *Usos de la pulpa de café*. https://www.anacafe.org/glifos/index.php?title=Usos_pulpa_de_cafe (25 de abril de 2015).

Centro de Desarrollo e Investigación en Termofluidos -CEDIT-. "Briquetas de residuos sólidos orgánicos como fuente de energía calorífica en cocinas no convencionales". *Revista científica CEDIT 2*, (2007): 26-29.

Da Silva Arce, Derlis Disglide. *Proyecto de creación de una fábrica de briquetas de aserrín en Santa Rosa del Aguaray*. Licenciatura en Ciencias Administrativas. Universidad Tecnológica Intercontinental. Paraguay: Facultad de Ciencias Empresariales, 2013.

Efectos de los aglutinantes en las briquetas. <https://prezi.com/uztiqhv23l-v/efectos-aglutinantes-briquetas/> (14 de noviembre de 2015).

Escala de Ringelmann. <http://www.estrategiaambiental.com/normatividad/aire/resolucion-6982-de-2011-prevencion-y-control> (17 de noviembre de 2016).

Fonseca, Edison y Luis, Tierra. *Desarrollo de un proceso tecnológico para la obtención de briquetas de aserrín de madera y cascarilla de arroz y pruebas de gas pobre*. Tesis Ingeniería Mecánica. Escuela Superior Politécnica de Chimborazo. Ecuador: Facultad de mecánica, 2011.

Fuentes de energía no renovables. http://josanna.webs.uvigo.es/pdf/Tecnologia_Energetica/Carbon/TEN-T03-CARBON.pdf (10 de octubre de 2015).

Gennaro, Alfonzo. *Remington Farmacia*. Argentina: Editorial Médica Panamericana, 2003.

Grupo de investigación en energías renovables -GIDER-. *Fabricación de briquetas con aserrín blanco de pino. Análisis inmediato y obtención de su poder calorífico*. Universidad Nacional del Nordeste. Argentina: Facultad de Ingeniería, 2012.

Hernández Aviles, Joe Ralph. *Estudio técnico para la obtención de briquetas de fácil encendido a partir de carbón de la cascarilla de palma africana y su producción en la empresa TYSAI S.A.* Tesis Ingeniería Industrial. Escuela Superior Politécnica de Chimborazo. Ecuador: Facultad de mecánica, 2011.

Instituto para la diversificación y ahorro de la energía -IDEA-. *Biomasa Y Gasificación*. España: 2007.

Janczak, Jacek. *Técnicas simples para la obtención de combustibles básicos*. <http://www.fao.org/docrep/p2070s/p2070s06.htm> (01 de mayo de 2015).

Los encinos. <https://www.uv.mx/cienciahombre/revistae/vol25num2/articulos/encinos/> (01 de mayo de 2015).

Manejo de subproductos. http://www.cenicafe.org/es/index.php/cultivemos_cafe/manejo_de_subproductos (01 de mayo de 2015).

Marcos Martín, Francisco. "Pélets y Briquetas". *AITIM 171*, (1995): 54-62.

Montúfar del Valle, Douglas Israel. *Evaluación del uso de biomasa como combustible alternativo en la producción de ladrillos de barro cocido en el municipio de el Tejar Chimaltenango*. Tesis Ingeniero Civil. Universidad de San Carlos de Guatemala. Guatemala: Facultad de Ingeniería, 2012.

Moreno, Jesús Blesa. *Briquetado de lignitos con aditivos, seguimiento físico-químico del proceso*. Tesis Doctoral en Ciencias Químicas. Instituto de Carboquímica. Facultad de ciencias químicas. Universidad de Zaragoza. España: 2002.

Normalización y estandarización de biocombustibles. http://www.inti.gob.ar/ue/proyecto2003/pdf/normativa_biocombustibles.pdf (21 de octubre de 2016).

Organización para la Alimentación y Agricultura -FAO-. *Aprovechamiento del residuo forestal*. <http://www.fao.org/docrep/t0269s/t0269S10.htm> (01 de mayo de 2015.)

----- . *Estado actual de la información sobre madera para energía*. <http://www.fao.org/docrep/006/ad402s/AD402s07.htm> (25 de abril de 2015).

Ortiz, Luis y JL, Miguez. *Energías Renovables y Medio Ambiente*. España: Editorial Ayuntamiento de Vigo, 1994.

Ortiz, Luis. *Aprovechamiento energético de la biomasa forestal*. España: Editorial Gamesal, 1996.

----- . "Producción de biocombustibles sólidos de alta densidad en España". *CIDEU 5*, (2008): 107-123.

----- *Procesos de densificación de la biomasa forestal*. España: Editorial Gamesal, 2003.

Poder calorífico de las briquetas. <http://www.agicogroup.com> (01 de mayo de 2015).

Principales características de la melaza. <http://www.quiminet.com/articulos/conozca-mas-de-las-principales-caracteristicas-de-la-melaza-2700315.htm> (15 de noviembre de 2015).

Propiedades físicas y químicas. http://depa.fquim.unam.mx/amyd/archivero/U1temas1.5a1.7_19118.pdf (18 de octubre de 2015).

Quema de leña fuente de dioxinas y otros contaminantes. <http://www3.cec.org/islandora/es/item/11474-wood-burning-es.pdf> (17 de noviembre de 2016)

Ríos Marticonera, Víctor Enrique. *Aprovechamiento de la cachaza, la colofonia y la arcilla como aglutinantes en la formulación de briquetas energéticas utilizando residuos de aserrío*. Tesis Ingeniería Química, Universidad de San Carlos de Guatemala. Guatemala: Facultad de Ingeniería, 2014.

Sistema milpa roza, tumba y quema. <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=46123333007> (24 de abril de 2015).

Universidad de Alcalá. *Determinación de propiedades combustibles (carbones)* Manual de prácticas de química industrial. España: 2012.



V.ºB.º

Adán García Véliz

Adán García Véliz
Licenciado en Pedagogía e Investigación Educativa
Bibliotecario



ANEXOS

CUADROS

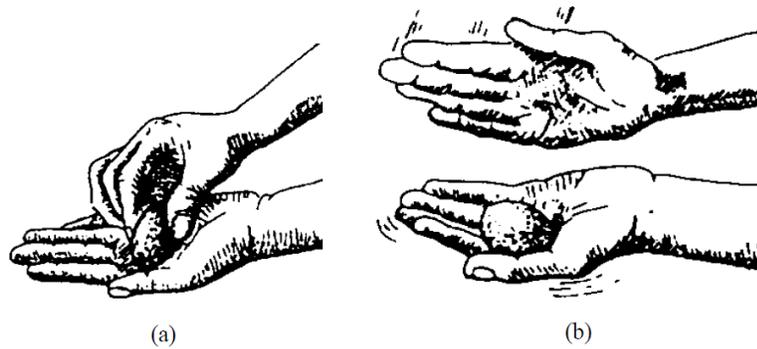
CUADRO 14
ESCALA DE MOHS

Dureza Mohs	Mineral de referencia	Dureza rayado	Dureza Knoop	Observaciones
1	Talco laminar	0,03	300	Se raya fácil con la uña
2	Yeso	1,25	450	Se raya con la uña
3	Calcita	4,5	500	Se raya con un cobre
4	Fluorita	5,0	750	Se raya fácil con una navaja
5	Apatito	6,5	850	Se raya con una navaja
6	Ortosa	37	1 000	Se raya con lima de acero
7	Cuarzo	120	1 200	Raya el vidrio
8	Topacio	170	1 500	Muy dura
9	Corindón	1 000	2 000	Muy dura
10	Diamante	140 000	8 000	La más dura

Fuente: <http://www.onixoro.es/index.php?page=dureza>

FIGURAS

FIGURA 2
ENSAYO DE HUMEDAD



Fuente: Fonseca, Edison. Tierra, Luis. “Desarrollo de un proceso tecnológico para la obtención de briquetas de aserrín de madera y cascarilla de arroz y pruebas de gas pobre” 2011

a) Formación de bola y b) verificación de la consistencia.

FIGURA 3
ESCALA DE RINGELMANN



Fuente: <http://revista.fct.unesp.br/index.php/geografiaematos/article/viewFile/2134/pdf>

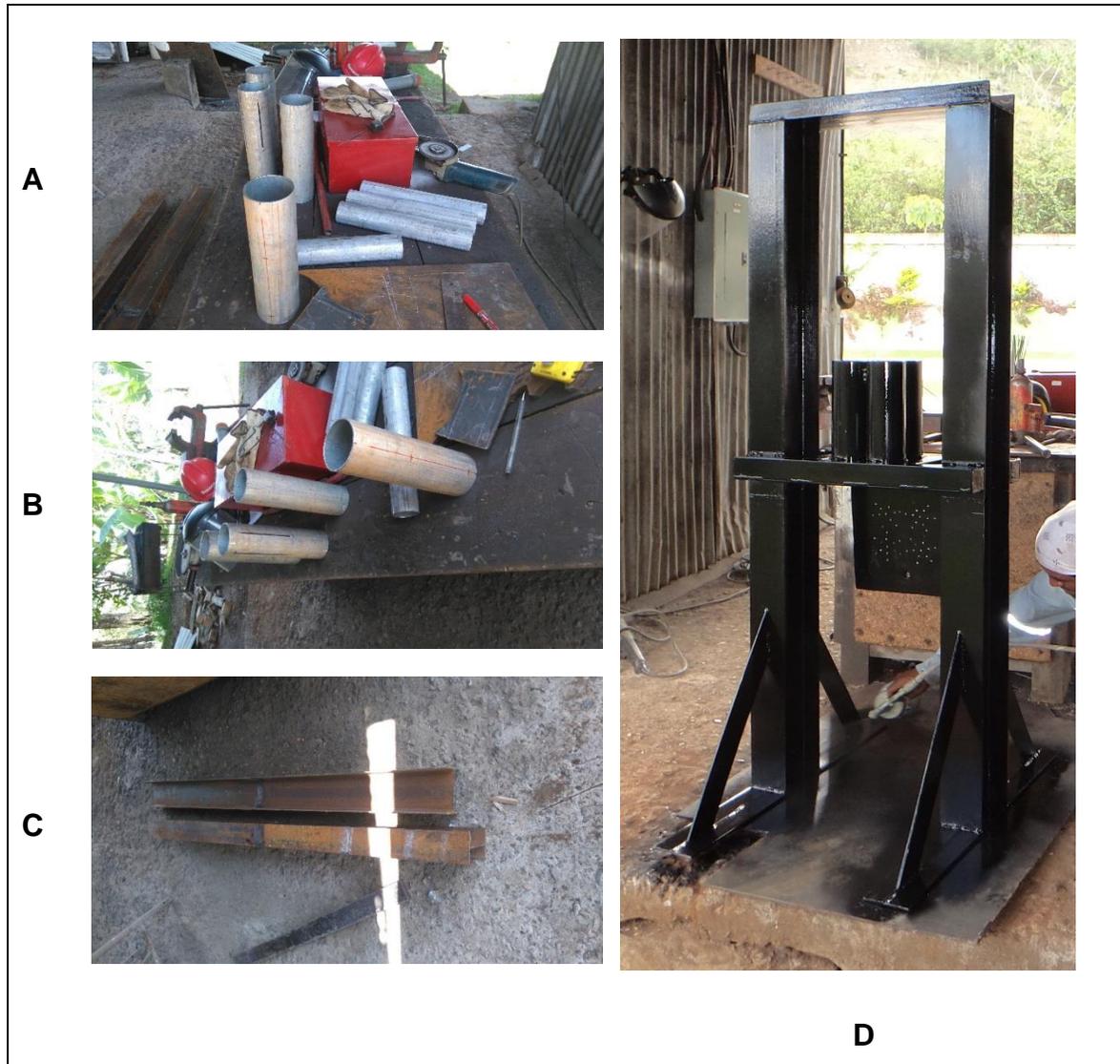
FIGURA 4 MÁQUINAS BRIQUETADORAS



Fuente: Fonseca, Edison. Tierra, Luis. “Desarrollo de un proceso tecnológico para la obtención de briquetas de aserrín de madera y cascarilla de arroz y pruebas de gas pobre” 2011

- A: Briquetadora artesanal,
- B: Briquetadora semi-industrial
- C: Briquetadora industrial.

FIGURA 5 FABRICACIÓN DE LA MÁQUINA BRIQUETADORA



Fuente: Estuardo Chub, 2016.

En la figura 5, se observa la fabricación de la máquina briquetadora a través de las fotografías; A, B y C: Materiales metálicos para la elaboración de la máquina briquetadora y D: Diseño máquina briquetadora con gato hidráulico móvil.

FIGURA 6
OBTENCIÓN DE RESIDUOS AGROFORESTALES



Fuente: Estuardo Chub, 2016.

En la figura 6, se puede observar la extracción y forma de transporte de pulpa de café en el beneficio de la finca el Rosario, San Pedro Carchá, Alta Verapaz.

FIGURA 7
ELABORACIÓN DE BRIQUETAS



Fuente: Estuardo Chub, 2016.

En la figura 7, se puede observar el proceso de elaboración de las briquetas a base de pulpa de café y aserrín desde el inicio (A) hasta la obtención de las briquetas de los tratamientos 1, 2 y 3.

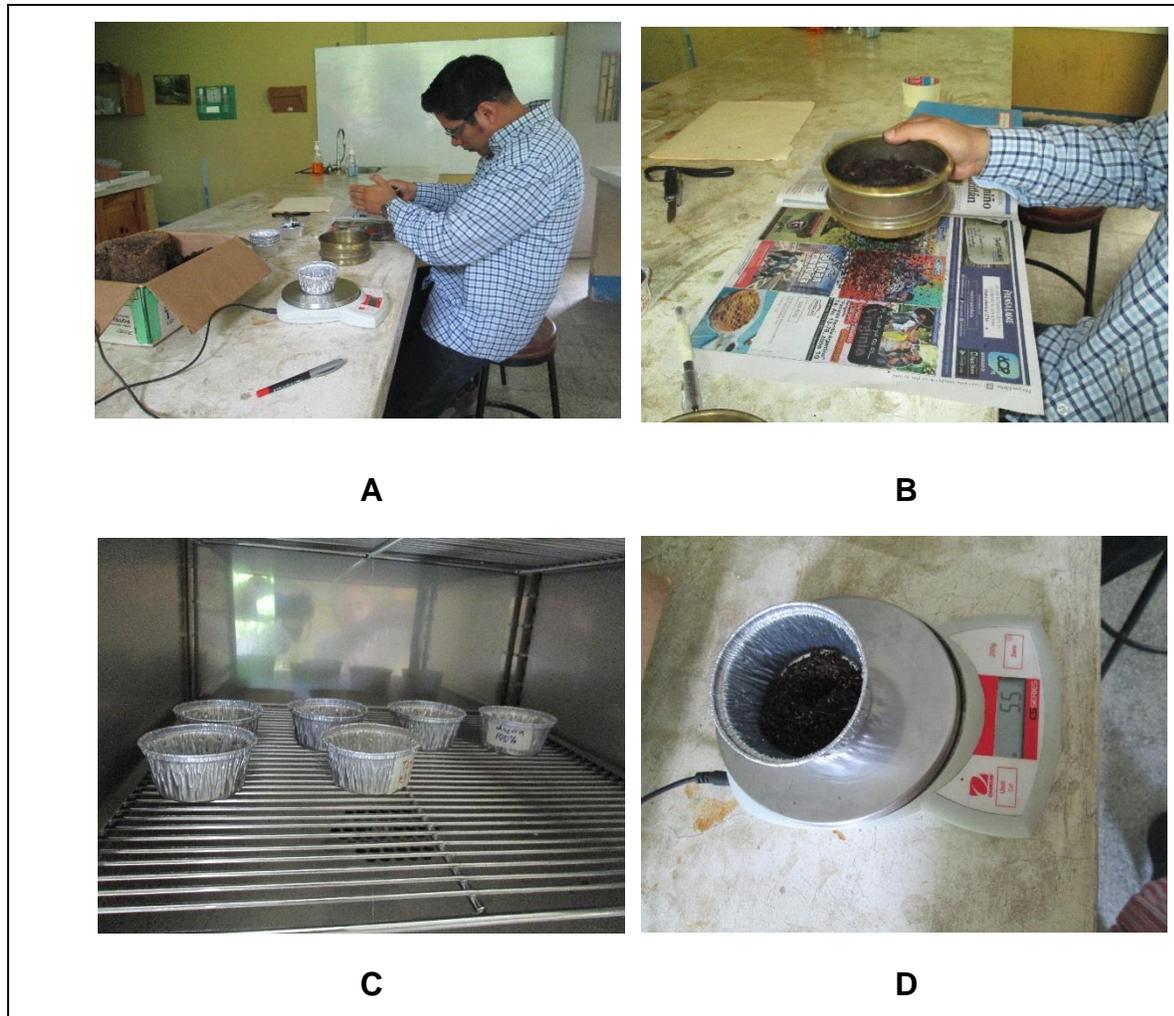
FIGURA 8
ESTUFA TIPO COHETE



Fuente: Estuardo Chub, 2016.

En la figura 8, se puede observar los materiales, el proceso de fabricación (A) y la estufa prefabricada tipo cohete (B), en la que se utilizó arena de fundición como aislante entre los cilindros de la estufa y cada pieza se encajó a presión.

FIGURA 9 HUMEDAD GRAVIMÉTRICA DE LAS BRIQUETAS



Fuente: Estuardo Chub, 2016.

En la figura 9, se puede observar cómo se obtuvo la humedad de la briqueta a través del método gravimétrico, donde se redujo las briquetas a partículas de 1 mm de tamaño (A y B), se hizo uso de una muja por 24 horas a 105 °C (C) y obtención de las masas a través de una balanza analítica (D).

FIGURA 10
TEMPERATURA MÁXIMA ALCANZADA



Fuente: Estuardo Chub, 2016.

En la figura 10, se puede observar la combustión de las briquetas en la estufa tipo cohete (A) y la temperatura alcanzada por la combustión tomada a través del pirómetro (B).

FIGURA 11
DENSIDAD DE HUMO Y PORCENTAJE DE CENIZA



Fuente: Estuardo Chub, 2016.

En la figura 11, se puede observar cómo se midió la densidad el humo producido por la combustión de la briqueta a través de la escala de Ringelmann (A) y como se obtuvo el porcentaje en peso de las cenizas producidas durante el proceso de incineración (B).

FIGURA 12
ALTURA Y COLOR DE BRIQUETA



Fuente: Estuardo Chub, 2016.

En la figura 12, se puede observar la diferencia de alturas entre los 5 tratamientos (A), los tratamientos durante el secado en tapanco (B) y la determinación del color de la briquetas a través de la escala de Munsell, después de alcanzar el 12 % de humedad.

FIGURA 13

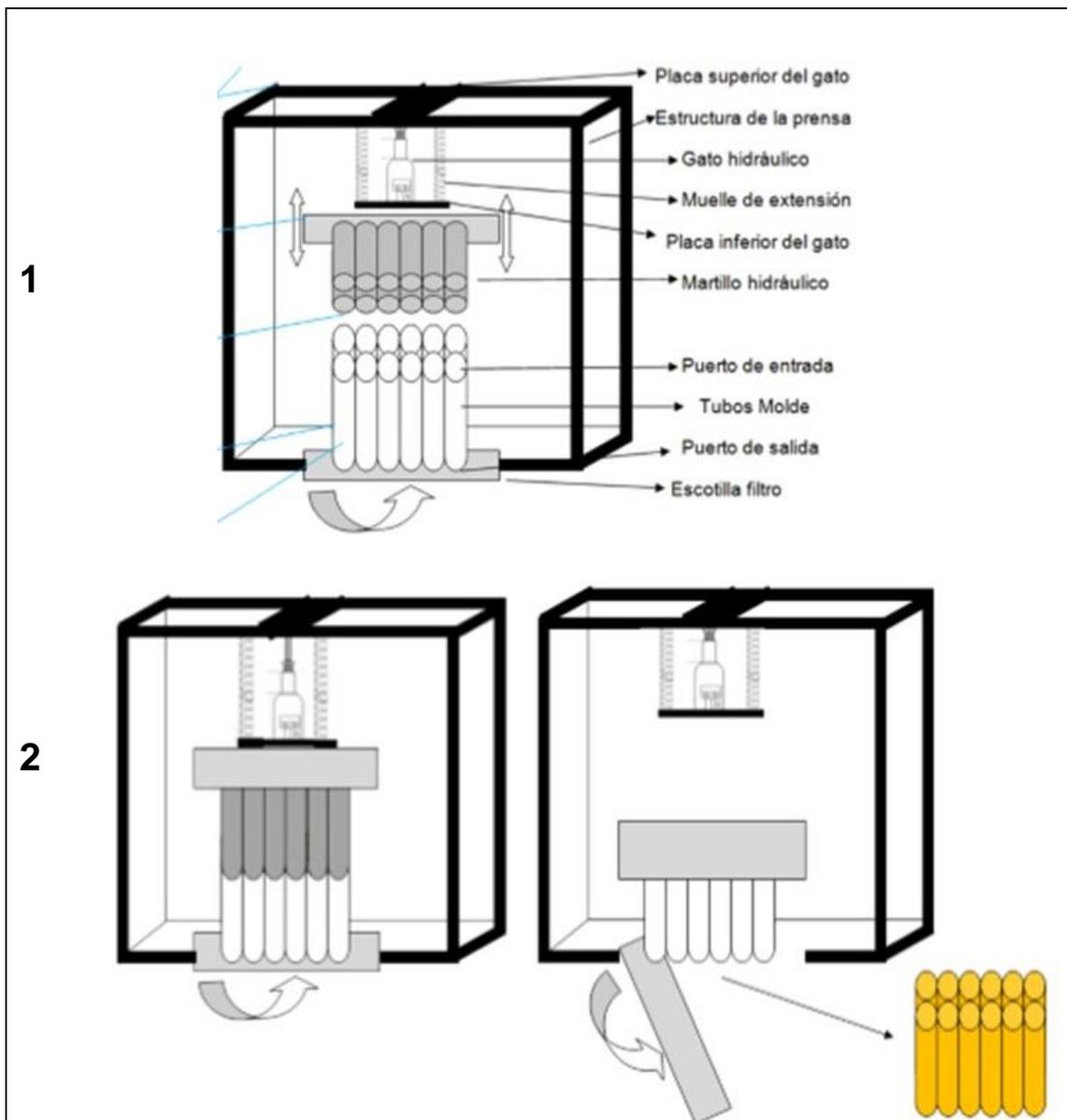
DUREZA Y FRIABILIDAD DE LAS BRIQUETAS



Fuente: Estuardo Chub, 2016.

En la figura 13, se puede observar cómo se determinó la dureza de las briquetas a través de los lápices de Mohs (A) y la determinación de la friabilidad a través del método del Golpe (B).

FIGURA 14
MÁQUINA BRIQUETADORA CON GATO HIDRÁULICO FIJO



Fuente: Estuardo Chub, 2016.

En la figura 14, se puede observar que el gato hidráulico está asegurado en una placa el cual tiene un muelle de expansión que le permite tener movimientos en el eje vertical y regresar el pistón del gato hidráulico después de ejercer presión.

CUADRO 15
COLOR DE LAS BRIQUETAS DE CADA TRATAMIENTO

COLOR DE BRIQUETAS			
Foto	matiz	Claridad/pureza VALUE/CHROMA	Nombre del color
T5			
	HUE 10YR	6/6	Café brillante
T1			
	HUE 7.5YR	3/2	Negro parduzco
T2			
	HUE 10YR	4/6	Café

T3			
	HUE 7.5 YR	3/3	Café oscuro
T4			
	HUE 10YR	5/6	Café Amarillento

Fuente: Estuardo Chub, 2016.

GLOSARIO

ASTM: La Asociación Americana de Ensayo de Materiales, es una organización de normas internacionales que desarrolla y publica acuerdos voluntarios de normas técnicas para una amplia gama de materiales, productos, sistemas y servicios.

Bioenergía: Es la energía que se obtiene de fuentes naturales virtualmente inagotables, ya sea por la inmensa cantidad de energía que contienen, o porque son capaces de regenerarse por medios naturales.

Carbono fijo (ASTM D-3172): El carbono fijo es la parte que no es volátil y que quema en estado sólido. Se encuentra en el residuo de coque que queda en el crisol luego de determinadas las materias volátiles. Si a este residuo se le restan las cenizas se obtiene el carbono fijo, por lo que generalmente el porcentaje de carbono fijo no se obtiene pesando el residuo, sino por diferencia una vez conocidas la humedad, las cenizas y las materias volátiles.

Combustible: Es cualquier material capaz de liberar energía cuando se oxida de forma violenta con desprendimiento de calor.

Coque: Combustible sólido, ligero y poroso que resulta de calcinar ciertas clases de carbón mineral.

Densidad: Es una propiedad intensiva que describe el cociente de la masa del material y el volumen que éste ocupa.

Dureza: Es la oposición que ofrecen los materiales a alteraciones como la penetración, la abrasión, el rayado y la cortadura, entre otras.

Gasificación: La gasificación es la conversión de un material sólido como el carbón vegetal, el petróleo o la biomasa en gas para utilizarlo como combustible.

Humedad residual (ASTM D3173): Es la humedad que pierde un carbón seco al aire cuando se le somete a una temperatura de 106 °C. Por ejemplo, una humedad superficial entre 1,5 % y 3% evita la generación de polvo.

Humedad superficial: Es la humedad que pierde el carbón cuando se le seca al aire del medio ambiente del laboratorio.

Humedad total (ASTM D3302M ISO 589): Es la suma de la humedad superficial y la humedad residual. Es necesario conocerla en los contratos de compra y venta, en la evaluación y construcción de procesos industriales, manejo y pulverización del carbón.

ISO: Organización Internacional de Normalización, es el ente encargado para la creación de estándares internacionales de propietarios, industriales y comerciales, reconocidos por autoridades de cada país.

Materias volátiles (ASTM 3175, ISO 562): Las materias volátiles son desprendimientos gaseosos de la materia orgánica durante el calentamiento. A medida que el carbón se calienta, se desprenden productos gaseosos y líquidos. Los constituyentes son principalmente agua, hidrógeno, dióxido de carbono, monóxido de carbono, sulfuros de hidrógeno, metano, amoníaco, benceno, tolueno, naftaleno y vapores alquitranes.

Mitigación: medidas tomadas para reducir los impactos adversos sobre el medio ambiente, después de la emisión de contaminantes.

Opacidad: es el grado de interferencia en la transmisión de la luz y su paso a través de una emisión que procede de una fuente fija.

Pélets: Producto totalmente natural, catalogado como biomasa sólida, está formado por cilindros muy pequeños, de unos pocos milímetros de diámetro.

Pirolización: Es el proceso mediante el cual se produce la descomposición de productos complejos en otros más simples por la acción del calor.

Poder Calorífico (ASTM. D 2015): Representa la energía de combustión del carbono e hidrógeno en la fracción orgánica y del azufre, generalmente se expresa en cal / g (calorías por gramo). El poder calorífico depende de la proporción y calidad de la fracción orgánica; que se ve reducida en todos los rangos por el porcentaje de humedad y ceniza.

Poder calorífico inferior: Es la cantidad total de calor desprendido en la combustión completa de una unidad de masa de combustible, sin contar la parte correspondiente al calor latente del vapor de agua generado en la combustión, ya que no se produce cambio de fase, y se expulsa como vapor.

Poder calorífico superior: Es la cantidad total de calor desprendido en la combustión completa de una unidad de masa de combustible cuando el vapor de agua originado en la combustión está condensado y, por consiguiente, se tiene en cuenta el calor desprendido en este cambio de fase.

Poder coquizante: Es la cantidad de coque a obtener de un carbón coquizable.

Presión: Es la fuerza aplicada por unidad de área.

**USAC
CUNOR**

Universidad de San Carlos de Guatemala
Centro Universitario del Norte



El Director del Centro Universitario del Norte de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer los dictámenes de la Comisión de Trabajos de Graduación de la carrera de:

INGENIERIA AGRONOMICA

Al trabajo titulado:

EVALUACIÓN DE LA COMBUSTIÓN DE BRIQUETAS ECOLÓGICAS, ELABORADAS A BASE DE PULPA DE CAFÉ Y ASERRÍN DE PINO (*Pinus maximinoi*)

Presentado por el (la) estudiante:

BYRON ESTUARDO CHUB CAAL

Autoriza el

IMPRIMASE

Cobán, Alta Verapaz 28 de Marzo de 2017.

Lic. Erwin Gonzalo Eskenasy Morales
DIRECTOR

