



Universidad de San Carlos de Guatemala
Facultad de Ingeniería
Escuela de Ingeniería Mecánica

**DETERMINACIÓN DEL PODER CALORÍFICO DE LOS RESIDUOS DE CASCARILLA DE
CARDAMOMO Y SUS POTENCIALES USOS ENERGÉTICOS**

Osber Isabel Carías Palencia

Asesorado por el Ing. José Ismael Véliz Padilla

Guatemala, octubre de 2020

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

**DETERMINACIÓN DEL PODER CALORÍFICO DE LOS RESIDUOS DE CASCARILLA DE
CARDAMOMO Y SUS POTENCIALES USOS ENERGÉTICOS**

TRABAJO DE GRADUACIÓN

PRESENTADO A LA JUNTA DIRECTIVA DE LA
FACULTAD DE INGENIERÍA
POR

OSBER ISABEL CARÍAS PALENCIA
ASESORADO POR EL ING. JOSÉ ISMAEL VÉLIZ PADILLA

AL CONFERÍRSELE EL TÍTULO DE

INGENIERO MECÁNICO

GUATEMALA, OCTUBRE DE 2020

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA
FACULTAD DE INGENIERÍA



NÓMINA DE JUNTA DIRECTIVA

DECANA	Inga. Aurelia Anabela Cordova Estrada
VOCAL I	Ing. José Francisco Gómez Rivera
VOCAL II	Ing. Mario Renato Escobedo Martínez
VOCAL III	Ing. José Milton de León Bran
VOCAL IV	Br. Christian Moisés de la Cruz Leal
VOCAL V	Br. Kevin Vladimir Armando Cruz Lorente
SECRETARIO	Ing. Hugo Humberto Rivera Pérez

TRIBUNAL QUE PRACTICÓ EL EXAMEN GENERAL PRIVADO


DECANA	Inga. Aurelia Anabela Cordova Estrada
EXAMINADOR	Ing. Jorge Iván Cifuentes Castillo
EXAMINADOR	Ing. Gilberto Enrique Morales Baiza
EXAMINADOR	Ing. Julio Cesar Campos Paíz
SECRETARIO	Ing. Hugo Humberto Rivera Pérez

HONORABLE TRIBUNAL EXAMINADOR

En cumplimiento con los preceptos que establece la ley de la Universidad de San Carlos de Guatemala, presento a su consideración mi trabajo de graduación titulado:

DETERMINACIÓN DEL PODER CALORÍFICO DE LOS RESIDUOS DE CASCARILLA DE CARDAMOMO Y SUS POTENCIALES USOS ENERGÉTICOS

Tema que me fuera asignado por la Dirección de la Escuela de Ingeniería Mecánica, con fecha 12 de noviembre de 2019.



Osber Isabel Carías Palencia

Guatemala, 08 de julio de 2020

Ingeniero
Gilberto Enrique Morales Baiza
DIRECTOR
Escuela de Ingeniería Mecánica
Facultad de Ingeniería
Universidad De San Carlos De Guatemala

Ingeniero Morales:

Por este medio hago constar que he revisado y aprobado el trabajo de graduación del estudiante **OSBER ISABEL CARIÁS PALENCIA**, con carné 201212805 y DPI 2348 01042 0206 el cual lleva como título: **“DETERMINACIÓN DEL PODER CALORÍFICO DE LOS RESIDUOS DE CASCARILLA DE CARDAMOMO Y SUS POTENCIALES USOS ENERGÉTICOS”**.

Con base en lo anterior, hago de su conocimiento esta información a efecto de continuar con el trámite respectivo para su aprobación, sin otro particular,

Atentamente,



Ing. José Ismael Véliz Padilla
Ingeniero Mecánico
Colegiado 3646
ASESOR

JOSE ISMAEL VÉLIZ PADILLA
INGENIERO MECÁNICO
COLEGIADO 3646

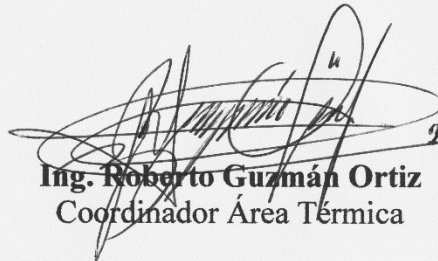


USAC
TRICENTENARIA
Universidad de San Carlos de Guatemala

Facultad de Ingeniería
Escuela de Ingeniería Mecánica

El Coordinador del Área Térmica de la Escuela de Ingeniería Mecánica, luego de conocer el dictamen favorable del Asesor y habiendo revisado en su totalidad el trabajo de graduación titulado “**DETERMINACIÓN DEL PODER CALORÍFICO DE LOS RESIDUOS DE CASCARILLA DE CARDAMOMO Y SUS POTENCIALES USOS ENERGÉTICOS**” desarrollado por el estudiante **Osber Isabel Carías Palencia**, recomienda su aprobación.

ID Y ENSEÑAD A TODOS



Ing. Roberto Guzmán Ortiz
Coordinador Área Térmica

Roberto Guzmán Ortiz
INGENIERO MECANICO
COLEGIADO No. 4465

Guatemala, agosto del 2,020

RG0/



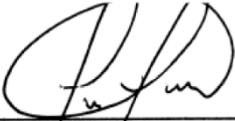
USAC
TRICENTENARIA
Universidad de San Carlos de Guatemala

Facultad de Ingeniería
Escuela de Ingeniería Mecánica

Ref.EIM.139.2020

El Director de la Escuela de Ingeniería Mecánica, de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer el dictamen del Asesor y con la aprobación del Coordinador del Área de Diseño de Máquinas, al trabajo de graduación titulado: **DETERMINACIÓN DEL PODER CALORÍFICO DE LOS RESIDUOS DE CASCARILLA DE CARDAMOMO Y SUS POTENCIALES USOS ENERGÉTICOS** del estudiante **Osber Isabel Carías Palencia**, DPI **2348010420206**, Reg. Académico **201212805** y luego de haberlo revisado en su totalidad, procede a la autorización del mismo.

"Id y Enseñad a Todos"



Vo./Bo. Ing.



Ing. Gilberto Enrique Morales Baiza
Director
Escuela de Ingeniería Mecánica

Guatemala, octubre de 2020

/aej



DTG. 287.2020.

La Decana de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer la aprobación por parte del Director de la Escuela de Ingeniería Mecánica, al Trabajo de Graduación titulado: **DETERMINACIÓN DEL PODER CALORÍFICO DE LOS RESIDUOS DE CASCARILLA DE CARDAMOMO Y SUS POTENCIALES USOS ENERGÉTICOS**, presentado por el estudiante universitario: **Osber Isabel Carías Palencia**, y después de haber culminado las revisiones previas bajo la responsabilidad de las instancias correspondientes, autoriza la impresión del mismo.

IMPRÍMASE:



Inga. Anabela Córdova Estrada

Decana



Guatemala, octubre de 2020

AACE/asga

ACTO QUE DEDICO A:

Mis padres	Abidán Carías Hurtado y Susana Palencia Polanco, por su apoyo incondicional y por ser mi modelo de vida.
Mis hermanos	Abidán, Jerebeth y Gerson Carías Palencia, por formar parte de todo este esfuerzo y por ser los mejores al momento de apoyarme en toda esta travesía.
Tío Esdras	Por el valioso apoyo moral y material en cada momento que lo necesité.
Mis abuelos	Vidal Carías Carranza, Luz Angélica Hurtado, María Belén Polanco e Isabel Palencia.
Mi familia	Por su apoyo moral durante mi carrea.
Mis mejores amigos	Gerson Ortega, Derick Carrera, Allam de Paz, Wilzon Lima, Roberto Morales, Luis Arriaza, Otto Arriaza, Byron Borrayo, Sergio Marroquín, Eduardo de Paz, por estar siempre en las buenas y en las malas, por brindarme su amistad, su aprecio y apoyo desde siempre.

AGRADECIMIENTOS A:

Universidad de San Carlos de Guatemala	Por dárme todo, el sentimiento de ser san carlista es único.
Facultad de ingeniería	Por formarme académicamente, y brindarme mi primera oportunidad laboral.
LIEXVE	Por las incontables oportunidades de formación y por darme la oportunidad de ser parte de su equipo de trabajo.
Departamento de Química General	Por darme la oportunidad de desarrollarme como docente y ser mi génesis laboral, gracias miles a la Dra. Casta Zeceña.
Ing. Mario Mérida	Por ser una guía y un amigo, y el mejor jefe.
Inga. Telma Cano	Por cada uno de sus conejos, por creer en mí y por darme tantas oportunidades, agradecido infinitamente.
Ing. Ismael Veliz	Por su tiempo, dedicación y asesoría que siempre brindó.
Mayra Morales de Sosa	Por confiar en mis talentos y hacerme creer que puedo lograr todo lo que me proponga.

ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES.....	V
LISTA DE SÍMBOLOS	VII
GLOSARIO	IX
RESUMEN.....	XI
OBJETIVOS.....	XIII
HIPÓTESIS.....	XV
INTRODUCCIÓN	XVII
1. CONCEPTOS BÁSICOS.....	1
1.1. Biomasa.....	1
1.2. Central termoeléctrica.....	1
1.3. Cardamomo.....	1
1.4. Calorimetría	2
1.5. Poder calorífico.....	2
1.6. Aceite esencial	3
2. CARDAMOMO	5
2.1. Características de la cascara de cardamomo.....	5
2.2. Valoración agronómica de la cascara de cardamomo.....	5
2.3. Efectos de la cascara de cardamomo en los suelos y cosechas	5
2.4. Fuentes de biocombustible.....	6
2.4.1. Residuos forestales	6
2.4.2. Desechos agrícolas	6
2.4.3. Desechos industriales.....	6

2.4.4.	Plantaciones energéticas	7
2.4.5.	Desechos urbanos	7
3.	PROCESO DE CONVERSIÓN DE BIOCOMBUSTIBLES	9
3.1.	Proceso de combustión directa	9
3.1.1.	Densificación	10
3.2.	Proceso termoquímico	10
3.2.1.	Carbonización	11
3.2.2.	Gasificación.....	11
4.	ENERGÍA GENERADA POR BIOCOMBUSTIBLES	13
4.1.	Calor y vapor.....	13
4.2.	Electricidad.....	13
4.3.	Cogeneración (calor y electricidad).....	13
5.	IMPACTOS GENERADOS POR LA PRODUCCIÓN DE BIOCOMBUSTIBLES.....	15
5.1.	Impacto en recurso edáfico	17
5.2.	Impacto en recurso hídrico.....	17
5.3.	Impacto atmosférico	18
5.4.	Impacto social	18
6.	ANÁLISIS TERMODINÁMICO	19
6.1.	Fuentes energéticas biomásicas.....	19
6.1.1.	Biocombustibles sólidos	19
6.1.2.	Biocombustibles líquidos	21
6.1.3.	Biocombustibles gaseosos	22
6.2.	Poder calorífico	23
6.2.1.	Poder calorífico superior (PCS).....	24

6.2.2.	Poder calorífico inferior (PCI).....	24
6.2.2.1.	Factores que inciden en el poder calorífico	25
7.	CALCULO DEL PODER CALORIFICO CON BASE A LA NORMA ASTM D-240.....	29
7.1.	Bomba calorimétrica	31
8.	DISEÑO METODOLÓGICO	33
8.1.	Variables.....	33
8.1.1.	Variables dependientes	33
8.1.2.	Variable independiente	34
8.2.	Delimitación del campo de estudio	34
8.2.1.	Área de obtención de la materia prima	34
8.2.2.	Cálculo del poder calorífico.....	34
8.2.3.	Cálculo de las emisiones de CO ₂	35
8.3.	Recursos humanos disponibles.....	35
8.4.	Recursos materiales disponibles	35
8.5.	Técnica cuantitativa	35
8.5.1.	Técnica de muestreo y ordenamiento de las muestras.....	36
8.5.2.	Preparación de las muestras	36
8.5.3.	Métodos y modelos de los datos según tipo de variable	37
8.5.3.1.	Determinación del poder calorífico de la cascarilla de cardamomo	37

8.5.3.2.	Determinación de la cantidad emisiones de CO ₂ en gramos por unidad de gramos de materia prima vegetal combustionada	37
8.6.	Recolección y ordenamiento de la información	39
8.7.	Análisis estadístico.....	41
8.7.1.	Media muestral.....	42
8.7.2.	Varianza.....	42
8.7.3.	Desviación estándar	43
8.7.4.	Análisis de varianza	43
9.	RESULTADOS.....	47
10.	INTERPRETACION DE RESULTADOS	55
	CONCLUSIONES.....	59
	RECOMENDACIONES	61
	BIBLIOGRAFÍA.....	63
	APÉNDICES.....	65

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

FIGURAS

1.	Efectos del contenido de humedad en poder calorífico de la madera ..	26
2.	Poder calorífico respecto al porcentaje de aceite esencial.....	47
3.	Emisiones de CO ₂ respecto al porcentaje de aceite esencial.....	48
4.	Poder calorífico y su cantidad de emisiones en CO ₂	49
5.	Especies vegetales y su poder calorífico	50
6.	Emisiones de CO ₂ en biomasas	51
7.	Poder calorífico de cascarilla de cardamomo agotada y sin agotar de su fracción de aceite esencial y un combustible convencional (Bunker-C).....	52
8.	Emisiones de CO ₂ en distintos combustibles	53

TABLAS

I.	Impactos ambientales generados en producción de biocombustibles	16
II.	Poder calorífico inferior de la leña seca	25
III.	Poder calorífico en función del contenido de humedad.....	27
IV.	Variables dependientes.....	33
V.	Variables independientes	34
VI.	Cantidad de emisiones en gramos de CO ₂ por gramo de materia prima de cascarilla de cardamomo agotada.....	39

VII.	Cantidad de emisiones en gramos de CO ₂ por gramo de materia prima de cascarilla de cardamomo sin agotar de su fracción natural de aceite esencial	40
VIII.	Poder calorífico en diferentes unidades de medición de cascarilla de cardamomo sin agotar de su fracción natural de aceite esencial.....	40
IX.	Poder calorífico en diferentes unidades de medición de cascarilla de cardamomo agotadas de su fracción natural de aceite esencial	41
X.	Factores de emisión de gases CO ₂ en gramos por cada gramo de materia prima combustionada de varios combustibles utilizados para la generación de energía	41
XI.	Análisis de varianza de un factor para el poder calorífico de cascarilla de cardamomo en función natural de aceite esencial contenido y agotado del mismo	45
XII.	Análisis de varianza de un factor, para la cantidad de emisiones de CO ₂ en gramos, por cada gramo de materia prima combustionada en función de su fracción natural de aceite esencial contenido y agotado del mismo luego del proceso de pirolisis.....	45

LISTA DE SÍMBOLOS

Símbolo	Significado
g	Gramos
gCO₂	Gramos de dióxido de carbono
gM.P	Gramos de materia prima
Kcal	Kilocaloría
Kg	Kilogramos
Psi	Libra sobre pulgada cuadrada
L	Litro
MJ	Mega Julios
Btu	Unidad térmica británica

GLOSARIO

Aceite esencial	Un aceite esencial es un líquido aromático de aspecto fluido o espeso y de color variable según las plantas de las que esté extraído. Es segregado por células especiales que se encuentran tanto en las hojas, frutos, semillas y raíces de plantas.
ASTM	En inglés American Society of Testing Materials, que significa, Asociación Americana de Ensayo de Materiale.
Biomasa	Cantidad de productos obtenidos por fotosíntesis, susceptibles de ser transformados en combustible útil para el hombre y expresada en unidades de superficie y de volumen.
Caldera	La caldera, en la industria, es una máquina o dispositivo de ingeniería diseñado para generar vapor. Este vapor se genera a través de una transferencia de calor a presión constante, en la cual el fluido, originalmente en estado líquido, se calienta y cambia su fase a vapor saturado.
Calorimetría	Parte de la física que trata de la medición del calor y de las constantes térmicas.

Cardamomo

El vocablo genérico cardamomo se aplica indistintamente a unas cuantas especies aromáticas de hierbas perennes de los géneros Amomum, Aframomum, Elettaria de la familia de las Zingiberaceae.

Mesh

Es una palabra inglesa cuya traducción literal es malla.

Poder calorífico

Es la cantidad de calor que se genera, por kilogramo o metro cúbico de esa sustancia, al oxidarse de forma completa.

RESUMEN

El presente trabajo de graduación se basó en la determinación del poder calorífico proveniente de la cascarilla de cardamomo (*Elettaria cardamomum*), comparando la incidencia en el mismo y la cantidad de aceite esencial presente en la cascarilla, por lo que se tomaron dos parámetros de análisis, una cascarilla agotada de su fracción natural de aceite esencial y otra no agotada de su fracción natural de aceite esencial. La cuantificación de emisiones de CO₂ procedentes de la combustión de ambas cascarillas en estudio, posteriormente se compararon los valores obtenidos con los de combustibles convencionales usados en la industria de generación energética.

Para obtener el poder calorífico se preparó la materia previamente, realizando un proceso de secado a la cascarilla de cardamomo para extraer su fracción natural de aceite esencial que posee, luego se procedió a disminuir el tamaño de partícula de ambas utilizando un *mesh* número 100, esto se realizó para cumplir los requisitos que establece la norma ASTM D-240, se realizaron tres repeticiones para cada uno de los casos estudiados (con y sin su fracción natural de aceite esencial), el proceso de determinación del poder calorífico se llevó a cabo en el laboratorio de hidrocarburos del ministerio de energía y minas de Guatemala, obteniendo una diferencia significativa entre ambos siendo la cascarilla de cardamomo sin agotar de su fracción natural de aceite esencial la de mayor valor medio (16,22 MJ/Kg), mientras que la agotada tuvo un valor de 14,01 MJ/Kg.

Para la obtención de la cantidad de gramos de CO₂ emitidos por unidad de materia prima combustionada se preparó la materia prima estandarizando el tamaño de la misma a un tamaño de tamiz *mesh* número 60, se realizaron dos lotes, uno de la cascarilla de cardamomo agotada de su fracción natural de aceite esencial y el otro sin agotar de su fracción natural de aceite, cada lote constó de tres muestras de materia prima, a las cuales primeramente se les realizó un proceso de pirolisis, luego de ello se procedió a combustionar el residuo de la pirolisis, y con los valores obtenidos se calculó mediante estequiometria la cantidad de emisiones de CO₂ por gramo de materia prima vegetal combustionado, obteniendo una diferencia significativa entre la materia prima sin agotar de su fracción natural de aceite esencial (0,833 gCO₂/gM.P), y la agotada (0,743 gCO₂/gM.P).

Los valores de emisiones son cuatro veces menores que los valores de un combustible convencional (Bunker-C) ampliamente utilizado en la generación energética, y dichos valores son al mismo tiempo sumamente aceptables cuando se les comparó con un combustible biomàsico como la leña que posee un factor de emisiones de 0,840 gCO₂/gM.P.

La cascarilla de cardamomo con y sin su fracción natural de aceite esencial demostró ser una buena opción para considerar al momento querer implementar una planta de generación energética utilizando dicha materia prima que en muchas ocasiones simplemente es descartada.

OBJETIVOS

General

Determinar el poder calorífico de los residuos de cascarilla de cardamomo procedentes del beneficiado de cardamomo de Guatemala y sus potenciales usos energéticos en plantas de vapor.

Específicos

1. Describir los usos productivos de la cascarilla de cardamomo en plantas de vapor.
2. Determinar el poder calorífico de la cascarilla de cardamomo agotada y no agotada de aceite esencial según la normal ASTM D-240.
3. Comparar el poder calorífico de la cascarilla de cardamomo en función de su contenido de aceite esencial.
4. Comparar las emisiones de Dióxido de carbono de la cascarilla de cardamomo en función de su contenido de aceite esencial con las de un combustible convencional (Bunker C).

HIPÓTESIS

- Hipótesis nula:
 - $H_{o,1}$: el poder calorífico de la cascarilla de cardamomo (*Elettaria cardamomum*), no varía con la fracción natural de aceite esencial que contiene.
 - $H_{o,2}$: la cantidad de emisiones de CO₂ producto de la combustión de la cascarilla de cardamomo (*Elettaria cardamomum*), no varía con la fracción natural de aceite esencial que contiene.

- Hipótesis alternativa:
 - $H_{i,1}$: el poder calorífico de la cascarilla de cardamomo (*Elettaria cardamomum*), varía con la fracción natural de aceite esencial que contiene.
 - $H_{i,2}$: la cantidad de emisiones de CO₂ producto de la combustión de la cascarilla de cardamomo (*Elettaria cardamomum*), no varía con la fracción natural de aceite esencial que contiene.

INTRODUCCIÓN

La generación de energía desde los orígenes de la humanidad misma siempre ha sido de mucha importancia, en la actualidad se cuenta con diferentes métodos de generación de la misma, los métodos de generación de energía mediante vapor y usando combustibles biomásicos de residuos han sido eficientados debido a la demanda energética.

Las centrales termoeléctricas de biomasa son centrales que a través de la combustión de biomasa permiten producir energía eléctrica. Son centrales renovables y con un impacto medio ambiental mucho inferior a las centrales termoeléctricas tradicionales. Al contrario de otras energías renovables como la solar fotovoltaica o la eólica, estas tienen una capacidad de almacenamiento, y por esta razón parecen interesantes para el respaldo de las centrales renovables no programables y para el aporte de algunos servicios de red.

Guatemala el mayor productor de cardamomo a nivel mundial como parte de sus residuos de dicha actividad, cuenta con un residuo llamado “cascarilla” al cual se le dan diversos usos, desde su venta para la extracción de aceite esencial, hasta la utilización de abono para las mismas plantaciones, es por ello que se busca darle un uso distinto a este residuo, con la implementación de pruebas para la determinación del poder calorífico se buscara conocer sus potenciales usos energéticos en centrales térmicas de biomasa.

1. CONCEPTOS BÁSICOS

1.1. Biomasa

La biomasa es aquella materia orgánica de origen vegetal o animal, incluyendo los residuos y desechos orgánicos, susceptible de ser aprovechada energéticamente. Las plantas transforman la energía radiante del sol en energía química a través de la fotosíntesis, y parte de esta energía queda almacenada en forma de materia orgánica.

1.2. Central termoeléctrica

Una central termoeléctrica es una instalación empleada en la generación de energía eléctrica a partir de la energía liberada por combustibles fósiles como petróleo, gas natural, carbón y núcleos de uranio. Este calor es empleado por un ciclo termodinámico convencional para mover un alternador y producir energía eléctrica, liberando dióxido de carbono a la atmósfera.

1.3. Cardamomo

El vocablo genérico cardamomo se aplica indistintamente a unas cuantas especies aromáticas de hierbas perennes de los géneros *Amomum*, *Aframomum*, *Elettaria* de la familia de las *Zingiberaceae*. Hay dos especies principales de cardamomo: *Elettaria cardamomum*, el cardomomo verde o cardomomo verdadero que se extiende desde la India hasta Malasia y *Amomum costatum* así como *Amomum subulatum*, el cardomomo negro o cardomomo de Nepal que se distribuye principalmente en Asia y Australia.

Además, otra especie, *Aframomum corrorima*, el cardamomo de Etiopía o falso cardamomo crece y es usado como especia en África (Tanzania, Etiopía, Sudán y Uganda).

1.4. Calorimetría

La calorimetría es la ciencia o el acto de medir los cambios en las variables de estado de un cuerpo con el propósito de derivar la transferencia de calor asociada con los cambios de su estado debido, por ejemplo, a reacciones químicas, cambios físicos o transiciones de fase bajo restricciones específicas. La calorimetría se realiza con un calorímetro. La palabra calorimetría se deriva de la palabra latina calor, que significa calor y la palabra griega μέτρον (metrón), que significa medida. Se dice que el médico y científico escocés Joseph Black, quien fue el primero en reconocer la distinción entre calor y temperatura, es el fundador de la ciencia de la calorimetría.

1.5. Poder calorífico

Es la cantidad de energía que se puede desprender al producirse una reacción de oxidación por una unidad de masa o de volumen. La unión química entre un combustible y el comburente libera una determinada energía. El poder calorífico de un combustible expresa la cantidad de energía liberada durante la combustión completa de una unidad de masa del combustible. Una parte de la energía liberada en la combustión se gasta en la evaporación de agua, por lo que ya no se puede utilizar para ningún fin térmico, si no se especifica, el poder calorífico se refiere al poder calorífico inferior.

1.6. Aceite esencial

Un aceite esencial es un líquido aromático de aspecto fluido o espeso y de color variable Según las plantas de las que esté extraído.

2. CARDAMOMO

2.1. Características de la cascara de cardamomo

El cardamomo guarda sus semillas en pequeños sacos, las cuales son las más importantes al momento de la comercialización de la misma, estas semillas representan el valor neto del producto al momento de su comercialización, el saco donde se encuentran dichas semillas es conocido como cascarilla de cardamomo, un saco que al secarse se torna de un color amarillo pálido y es rico en fibras.

2.2. Valoración agronómica de la cascara de cardamomo

El cardamomo como producto completo (cascarilla y semilla) es uno de los productos más exportados de Guatemala, su principal valoración agronómica es la obtención de aceite esencial de los mismos, siendo para la semilla un mayor porcentaje de extracción, en la cascarilla los porcentajes de rendimientos son inferiores, pero su bajo costo compensa los mismos rendimientos.

2.3. Efectos de la cascara de cardamomo en los suelos y cosechas

La cascara de cardamomo usualmente se vende a la industria extractiva de aceites esenciales, aunque en otros casos debido a la humedad relativa en el ambiente genera algunos tipos de mohos y cuando esto sucede ya no se puede distribuir en el mercado de la extracción de aceites, por lo que se procede a utilizarla como una alternativa a un abono orgánico para las mismas plantaciones de cardamomo, contribuyendo a la sostenibilidad de la cosecha.

2.4. Fuentes de biocombustible

A continuación, se describen las cinco fuentes biocombustibles con las que se cuentan.

2.4.1. Residuos forestales

Son una importante fuente de biomasa que actualmente es poco.

Explotada en el área centroamericana. Se considera que, de cada árbol extraído para la producción maderera, sólo se aprovecha comercialmente un porcentaje cercano al 20 %. Se estima que un 40 % es dejado en el campo, en las ramas y raíces, a pesar de que el potencial energético es mucho mayor y otro 40 % en el proceso de aserrío, en forma de astillas, corteza y aserrín.

2.4.2. Desechos agrícolas

La agricultura genera cantidades considerables de desechos (rastros): se estima que solo en el campo el porcentaje es más del 60 %, y en desechos de proceso, entre 20 % y 40 %. Se considera que el 50 % de estos es utilizado como leña para uso doméstico en zonas aledañas. En este rubro se incluye el estiércol de animales de granja generalmente utilizado como abono orgánico.

2.4.3. Desechos industriales

Están constituidos por residuos sólidos y líquidos con un alto contenido de azúcares y carbohidratos, los cuales pueden ser convertidos en combustibles gaseosos. La industria alimenticia genera una gran cantidad de residuos y subproductos, que pueden ser usados como fuentes de energía; los

provenientes de todo tipo de carnes (avícola, vacuna, porcina) y vegetales (cáscaras, pulpa) cuyo tratamiento como desechos representan un costo considerable para la industria.

2.4.4. Plantaciones energéticas

Son grandes plantaciones de árboles o plantas cultivadas con el fin específico de producir energía. Para ello se seleccionan árboles o plantas de crecimiento rápido y bajo mantenimiento, las cuales usualmente se cultivan en tierras de bajo valor productivo. Su período de cosecha varía entre los tres y los diez años. Además, existen cultivos agrícolas que pueden ser utilizados para la generación de energía: caña de azúcar, maíz, sorgo y trigo. Igualmente, se pueden usar plantas oleaginosas como palma de aceite, *jatropha*, girasol o soya y algunas plantas acuáticas como jacinto de agua o las algas, para producir combustibles líquidos como el etanol y el biodiesel. También se utilizan arbustos que pueden ser podados varias veces durante su crecimiento, para extender la capacidad de cosecha de la plantación; adicionalmente, este tipo de cultivos sirve para controlar la erosión y la degradación de los suelos.

2.4.5. Desechos urbanos

Se encuentran constituidos principalmente por; residuos alimenticios, papel, cartón, madera y aguas negras, generados en su mayoría por centros urbanos; estos compuestos tienen un considerable valor energético que puede ser utilizado para la generación de energía limpia; aproximadamente el 80 % de toda la basura orgánica urbana puede ser convertida en energía.

La mayoría de los países centroamericanos carecen de adecuados sistemas para su procesamiento, lo cual genera grandes problemas de

contaminación de suelos y cuencas; sobre todo por la inadecuada disposición de la basura y por sistemas de recolección y tratamiento con costos elevados de operación.

3. PROCESO DE CONVERSIÓN DE BIOCOMBUSTIBLES

Para elegir el proceso de conversión de biomasa adecuado se debe evaluar la factibilidad técnica y económica de este, considerar parámetros y condiciones que permitan estimar los beneficios económicos y ambientales esperados.

Las tecnologías de conversión incluyen desde procesos simples y tradicionales, como la producción de carbón vegetal en hogueras bajo tierra; hasta procesos de alta eficiencia como la dendroenergía y la cogeneración.

A continuación, se presenta un resumen de los procesos de conversión para la elaboración de combustibles de origen biomásico.

3.1. Proceso de combustión directa

Los sistemas de combustión directa son aplicados para generar calor, el cual puede ser utilizado directamente, por ejemplo, para la cocción de alimentos o para el secado de productos agrícolas.

También se aprovecha en la producción de vapor para procesos industriales y electricidad. Las tecnologías de combustión directa van desde sistemas simples, como estufas, hornos y calderas, hasta otros más avanzados como combustión de lecho fluidizado.

Los procesos tradicionales de este tipo, generalmente, son muy ineficientes porque mucha de la energía liberada se desperdicia y puede causar contaminación cuando no se realizan bajo condiciones controladas.

Estos resultados pueden eficientizar considerablemente el proceso con prácticas de operación mejoradas y un diseño adecuado del equipo, por ejemplo, secar la biomasa antes de usarla, reduciendo así la cantidad de energía utilizada para la evaporación del agua en la misma.

En el caso de los procesos industriales, usar pequeños pedazos de leña y atender continuamente el fuego, supliendo pequeñas cantidades, resulta en una combustión más completa y eficiente y la regulación de entrada del aire para lograr una combustión más completa y con aislamiento para minimizar las pérdidas de calor.

3.1.1. Densificación

Proceso para compactar la biomasa en briquetas o pellets, para facilitar su utilización, almacenamiento y transporte. Generalmente son empleados en usos domésticos, comerciales e industriales. La materia prima puede ser aserrín, desechos agrícolas y partículas de carbón vegetal, y se compacta bajo presión alta.

3.2. Proceso termoquímico

Estos procesos transforman la biomasa en un producto de más alto valor, con densidad y valor calorífico mayor, permitiendo un uso y transporte más eficiente. Cuando la biomasa es quemada bajo condiciones controladas, sin hacerlo completamente, su estructura se rompe en compuestos gaseosos,

líquidos y sólidos, que pueden ser usados como combustible para generar calor y electricidad. El proceso básico se llama pirólisis o carbonización y se divide en:

3.2.1. Carbonización

Es la forma más común de la conversión termoquímica de temperatura mediana. La biomasa se quema con una disponibilidad restringida de aire, lo cual impide que la combustión sea completa. El residuo sólido se usa como carbón vegetal, y tiene mayor densidad energética que la biomasa original, no produce humo y es ideal para uso doméstico. La materia prima más común es la madera, aunque también se utilizan residuos forestales como cáscaras de coco y algunos residuos agrícolas; el 29 proceso se lleva a cabo en hornos de tierra, de mampostería y de acero, estos últimos incrementan los costos de producción.

3.2.2. Gasificación

Utiliza una mayor proporción de oxígeno a mayores temperaturas, con el objetivo de optimizar la producción del llamado “gas pobre”, constituido por una mezcla de monóxido de carbono, hidrógeno y metano, con proporciones menores de dióxido de carbono y nitrógeno. Este se puede utilizar para generar calor y electricidad, y se puede aplicar en equipos convencionales, como los motores de diesel. La composición y el valor calorífico del gas dependen de la biomasa utilizada.

4. ENERGÍA GENERADA POR BIOCOMBUSTIBLES

A través de los diferentes procesos de conversión de biomasa en biocombustibles, esta es transformada generalmente en tres tipos de energía.

4.1. Calor y vapor

A través de la combustión de biomasa o biogás. El calor puede ser el producto principal para aplicaciones en calefacción y cocción, o ser un subproducto de la generación de electricidad en ciclos combinados de electricidad y vapor.

4.2. Electricidad

Este tipo de energía ofrece nuevas opciones al mercado; su costo permitirá a los usuarios soportar mayores niveles de inversión en tecnologías eficientes, lo cual incrementará la industria bioenergética. La electricidad generada a partir de los recursos biomásicos puede ser comercializada como energía verde, pues no contribuye al efecto invernadero por estar libre de emisiones de dióxido de carbono (CO₂).

4.3. Cogeneración (calor y electricidad)

Se refiere a la producción simultánea de vapor y electricidad, aplicable en muchos procesos industriales que requieren las dos formas de energía.

En América Central este proceso es muy común en los ingenios de azúcar, que aprovechan los desechos del proceso, principalmente el bagazo de caña disponible en grandes cantidades; en los últimos años ha existido la tendencia a mejorar el proceso para generar más electricidad y vender el excedente a la red eléctrica.

5. IMPACTOS GENERADOS POR LA PRODUCCIÓN DE BIOCOMBUSTIBLES

La conferencia de alto nivel sobre la Seguridad Alimentaria Mundial. Los Desafíos del Cambio Climático y la Bioenergía 2008, convocada por la FAO, convinieron en que es esencial evaluar detalladamente las perspectivas, riesgos y oportunidades que plantean los biocombustibles.

Entre los posibles riesgos ambientales por producción se estiman el deterioro de los recursos edáficos e hídricos inherentes y un incremento en los precios de los alimentos al comprometer su producción por la producción de materia prima para biocombustibles.

Los efectos que las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI), tienen en el cambio climático, generan impactos ambientales que ocasionan la pérdida total y parcial, temporal o permanentes de los diferentes ecosistemas y los recursos naturales del país y que también repercuten en la pérdida de la producción alimentaria.

Existe además la generación de subproductos durante la elaboración de biocombustibles, glicerina en la producción de biodiesel y las aguas mieles en 43 el caso de la producción del etanol que contaminan los diferentes recursos naturales debido a la ineficiente disposición final de los mismos.

El impacto ambiental que genera la producción de biocombustibles puede clasificarse a través de diferentes ámbitos entre ellos, por el impacto en los recursos naturales afectados. En la figura 1 se presenta una matriz con el

resumen de los impactos ambientales generados por la producción de biocombustibles en los recursos naturales comprometidos y las acciones de mitigación recomendadas.

Tabla I. **Impactos ambientales generados en producción de biocombustibles**

RECURSOS NATURALES	FUENTE	IMPACTO AMBIENTAL	MEDIDAS DE MITIGACION
Sistema hídrico	Ríos, arroyos, lagunas, lluvia, fuentes subterráneas	Moderado a alto con desarrollo sostenible	<ul style="list-style-type: none"> • Uso controlado y sostenible • Tratamiento de aguas residuales • Restricción con agroquímicos
Sistema edáfico	Áreas agrícolas, bosques naturales y cultivados	Moderado a alto con desarrollo sostenible	<ul style="list-style-type: none"> • Restricción de agroquímicos • Rotación en uso • Tratamientos orgánicos
Sistema atmosférico	Microclimas, temperatura, humedad relativa	Moderado a alto con desarrollo sostenible	<ul style="list-style-type: none"> • Restricción de agroquímicos • Restricción uso de rosas • Control deforestación
Flora y fauna	Flora y faunas nativas	Moderado a alto con desarrollo sostenible	<ul style="list-style-type: none"> • Respeto por ecosistemas naturales nativos

Fuente: GUEVARA ABAUTA, Luz María. *Síntesis y cálculos sobre contenido energético, equivalencias energéticas y precios de los combustibles de biomasa en Guatemala, como elemento de decisión para uso de proyectos energéticos.* p. 43.

La ponderación de los impactos ambientales referidos en la matriz anterior, fueron establecidos a través del listado taxativo de proyectos, obras, industrias y actividades publicados en la página del Ministerio de Ambiente y Recursos Naturales.

La producción de biocombustibles se encuentra dentro de la categoría de Agricultura, Ganadería, Caza y Silvicultura, División 01 Agricultura, Ganadería, Caza y Actividades de Servicio Conexas, y División 02 Silvicultura, Extracción de madera y actividades conexas, donde la ponderación dependerá de la extensión de áreas a cultivar y cantidad de ganado que genera materia prima (estiércol).

5.1. Impacto en recurso edáfico

Son generados principalmente por el cambio en el uso de suelos, se considera que este tipo de impactos, además de transformar los ecosistemas (flora y fauna) al cambiar los cultivos tradicionales, deterioran los suelos por el uso excesivo de agroquímicos (abonos y pesticidas) que garantizan la calidad y cantidad de las producciones, provocan erosiones por el tipo de monocultivos que se emplean, contribuyen con la disminución de captación hídrica por lluvias debido a la eliminación de bosques naturales, por competir en espacio y en nutrientes con plantaciones para producir materia prima, entre otras.

5.2. Impacto en recurso hídrico

Son ocasionados por contaminación con abonos y pesticidas (insumos químicos) utilizados en las plantaciones para garantizar la producción de materia prima y que modifican la flora y fauna regional, en especial los ecosistemas aledaños a los efluentes hídricos.

Influyen en la cantidad de agua necesaria para riego de plantaciones especialmente en verano, y para la elaboración de biocombustibles que compiten por recursos hídricos con las zonas agrícolas alimentarias, modificando el caudal ecológico de efluentes regionales que brindan abastecimiento a comunidades aledañas para usos domésticos y por la ineficiente disposición de los subproductos y residuos que la producción de estos genera, sin que exista una disposición final adecuada de los mismos.

5.3. Impacto atmosférico

La reducción de bosques naturales para áreas de cultivos disminuye las fuentes de captación hídrica generan tierras áridas, erosionables, provocando disminución del manto acuífero subterráneo y generando modificaciones en la temperatura y humedad relativa del lugar (microclima).

5.4. Impacto social

El cultivo de materia prima para la producción de biocombustibles requiere de grandes extensiones de tierra para que su producción sea económicamente rentable, poniendo en riesgo la seguridad alimentaria local y nacional, por la competencia de áreas cultivables y recursos hídricos disponibles.

Es necesaria una socialización efectiva de los proyectos energéticos de biocombustibles en las comunidades rurales, para que su desarrollo no se vea afectado por los impactos sociales, entre ellos la migración por déficit habitacional debido a las grandes extensiones de tierras usadas para siembras.

6. ANÁLISIS TERMODINÁMICO

6.1. Fuentes energéticas biomásicas

Los estudios realizados por Organización Latinoamericana de Energía OLADE, refieren que los países latinoamericanos tienen potencial de generación energética a partir de una matriz con componentes de energías renovables primarias y secundarias, suficientes para abastecer sus demandas energéticas. La oferta de energías renovables en Guatemala es grande y diversa 52 905,47; el uso eficiente y sostenible de los biocombustibles, garantiza una disminución de la crisis energética ocasionada por los costos que el uso indiscriminado e ineficiente de combustibles fósiles genera.

En la actualidad, la producción y uso de los combustibles biomásicos está condicionada a la disponibilidad de la materia prima y biocombustibles, la facilidad de distribución y almacenamiento, los equipos y tecnología para su producción y uso, y por los precios de estos en el mercado energético. El uso de los biocombustibles en el país se encuentra determinado por sus características físicas que finalmente determinan el equipo a utilizar para su consumo, dividiéndolos de la siguiente forma:

6.1.1. Biocombustibles sólidos

Obtenidos de la producción sustentable de leña a través de plantaciones energéticas residuos forestales por podas, raleos o mantenimiento de plantaciones y bosques, cascarillas de arroz y café, bagazo de caña, residuos de la industria maderera.

Se utilizan para la generación de calor en calderas, para generación de vapor con propósitos distintos; generación de calor o de electricidad, para la cocción de alimentos en el sector residencial y en el sector servicios; panaderías, tortillerías restaurantes, en el sector industrial; secado de granos y deshidrataciones, para procesos artesanales de caleras, salinas, entre otros.

La Organización Latinoamericana de Energía OLADE y la Comisión Económica para América Latina y el Caribe CEPAL, en colaboración con los Estados Miembros de Naciones Unidas, entre otras, han realizado proyectos de investigación como: Proyecto Leña y Propuesta de Política Pública para el Aprovechamiento Sostenible y Eficiente de la Leña en Guatemala, respectivamente, con la finalidad de determinar el uso de leña a nivel nacional.

El consumo de energía en los países centroamericanos se caracteriza por una alta participación de la biomasa, en su mayor parte leña; 35 % de abastecimiento energético en el área rural es adquirido a través de residuos agroforestales (rastros), mientras que el Ministerio de Energía y Minas publicó en el Informe de Balance Energético 2010, que el consumo energético de leña para Guatemala, representa el 70 % del total de las fuentes energéticas primarias en el país.

La leña es utilizada en los hogares principalmente para cocción de alimentos y calentamiento de la vivienda. Se estima que cerca de un 51% de la población centroamericana (19 millones de habitantes, alrededor del 50 % de la población) continúa dependiendo de la leña, para realizar sus actividades domésticas.

Tres países centroamericanos, Guatemala, Honduras y Nicaragua, reportan la mayor demanda de leña, propuesta de política pública para el

aprovechamiento sostenible y eficiente de la leña en Guatemala 2011. La demanda de leña en las áreas rurales se debe a que son las regiones más pobres del país, es decir que carecen de poder adquisitivo para comprar energéticos convencionales (de origen fósil) de mayor eficiencia energética y los equipos adecuados para su uso (estufas, hornos, contenedores o cilindros para su almacenamiento), y por la falta de infraestructura vial que brinde acceso y permita un abastecimiento continuo de los mismos.

Generalmente, la adquisición de la leña como residuo forestal, es gratuita especialmente en temporadas de limpias, de fácil recolección y almacenamiento, porque no necesita contenedores especiales ni tiene un periodo de degradación corto, además no necesita de equipos específicos para su uso.

6.1.2. Biocombustibles líquidos

En la producción de biocombustibles es la industria con mayor desarrollo tecnológico del país en la actualidad, por la demanda en el sector transporte e industrial como complemento de los combustibles fósiles. Se encuentran constituidos por el etanol, elaborado a través de azúcares (caña, remolacha, melaza y frutas), almidones (maíz, yuca y papa) o material celulósico (bagazo de caña, madera y pulpa de papel), el metanol elaborado a través de destilación de madera y el biodiesel elaborado a través de aceites vegetales, grasas animales, vírgenes o recicladas, mixtas o puras.

El mayor porcentaje de la producción de etanol, 80 %, en 2009 fue exportado a; Centroamérica 2,25 %, Norteamérica 22,26 %, diferentes destinos de la Unión Europea 75,49 % y a Suramérica 0,000139 %; cifras referidas por Asociación de Gremial de Exportadores, especialmente para el sector

transporte e industrial, un pequeño porcentaje es utilizado en la industria nacional de bebidas, sector farmacéutico y cosmético, y es obtenido principalmente de la caña de azúcar según lo describe la Asociación de Azucareros de Guatemala.

Los destinos específicos del etanol en porcentajes son: del 76 % exportado a Europa; 42 % a Holanda, 30 % a Italia, 4 % a España, 18 % a Suiza y 6 % a Alemania. El 22 % exportado a Norteamérica; 99,9 % a México y 0,00002 % a Estados Unidos. Del 2 % exportado a Centroamérica, 47 % a El Salvador y 53 % a Nicaragua, Mientras que a Suramérica el 100 % para Colombia. La producción nacional de biodiesel, de acuerdo con publicaciones del Ministerio de Agricultura, Ganadería y Alimentos MAGA, el Ministerio de Energía y Minas MEM a través de la Dirección General de Hidrocarburos aún no genera volúmenes de producción suficientes para satisfacer la demanda de consumo a nivel nacional, tanto para el sector transporte como para el sector industrial.

6.1.3. Biocombustibles gaseosos

Los biocombustibles en estado gaseoso se encuentran constituidos por el biogás procedente de residuos orgánicos, el gas pobre obtenido por destilación destructiva de madera y los gases de incineración generados por residuos orgánicos e inorgánicos. En la actualidad no cuentan con un volumen de producción que les permita la competitividad con los combustibles fósiles homólogos (gas natural y gas licuado de petróleo), para abastecer la demanda energética nacional.

El volumen, poder energético, densidad, y demás características fisicoquímicas de los biocombustibles gaseosos dependen de la materia prima

que los genera, generalmente diversa e irregular; y los volúmenes disponibles de esta, son los que finalmente determinan el costo de los mismos. En el país actualmente la generación de estos biocombustibles se realiza en pequeñas escalas, principalmente en fincas agropecuarias y comunidades del área rural para autoconsumo, los costos para equipos, instalación, almacenamiento y traslado no permiten su competitividad en el mercado energético actual para producciones a gran escala.

Otro de los inconvenientes para la incorporación de los biocombustibles gaseosos en el mercado energético nacional es la falta de capacitación de los usuarios tanto para el proceso de producción, como para el manejo y mantenimiento de los equipos necesarios para su uso. Los usos más relevantes, para los biocombustibles, son la generación de calor y vapor y como complementos o sustitutos de los combustibles fósiles en el sector residencial, transporte y el sector industrial.

El uso de los biocombustibles se encuentra limitado en la actualidad por la falta de inversión en desarrollo tecnológico para la producción, transporte y almacenamiento, equipo adecuado para el uso de los biocombustibles tanto sólidos, líquidos y gaseosos, y la capacitación mínima necesaria para los productores y usuarios finales.

6.2. Poder calorífico

Es la cantidad de energía que se puede desprender al producirse una reacción de oxidación por una unidad de masa o de volumen. La unión química entre un combustible y el comburente libera una determinada energía. El poder calorífico de un combustible expresa la cantidad de energía liberada durante la combustión completa de una unidad de masa del combustible.

Una parte de la energía liberada en la combustión se gasta en la evaporación de agua, por lo que ya no se puede utilizar para ningún fin térmico, si no se especifica, el poder calorífico se refiere al poder calorífico inferior.

6.2.1. Poder calorífico superior (PCS)

Es el calor verdaderamente producido durante la reacción de combustión completa de un kilogramo de combustible a 0 a 760 mm de mercurio de presión, es decir el calor desprendido en el cambio de fase, cuando el vapor de agua que se originó en la combustión está condensado. El PCS es una de las variables más importantes para estudiar el comportamiento energético de los biocombustibles, es medido por medio de una bomba calorimétrica.

6.2.2. Poder calorífico inferior (PCI)

Es el calor producido sin contar la energía de la condensación del agua, es el calor que realmente se aprovecha, es decir cuando el agua presente en el combustible y la resultante de la combustión se mantienen en estado de vapor.

No existe el cálculo directo para la determinación del PCI, por lo que se calcula a partir del PCS y del valor de la humedad. Este es el valor que se utiliza en la práctica industrial. En ella, la temperatura no alcanza el punto de rocío por lo que se usa este valor.

Se presenta en la siguiente tabla poderes caloríficos para algunos tipos de leña seca, ver tabla II.

Tabla II. **Poder calorífico inferior de la leña seca**

Poder calorífico inferior de la leña seca	
Especie	(kJ/kg)
Eucalipto	19,228
Pino	20,482
Cedro	18,066
Ciprés	21,443
Encino	19,500
Media	19,744

Fuente: Organización Latinoamericana de Energía, OLADE. *Documentos de trabajo de OLADE*.
<http://www.olade.org/documentos-de-trabajo-olade/>. Consulta: 25 de febrero de 2020.

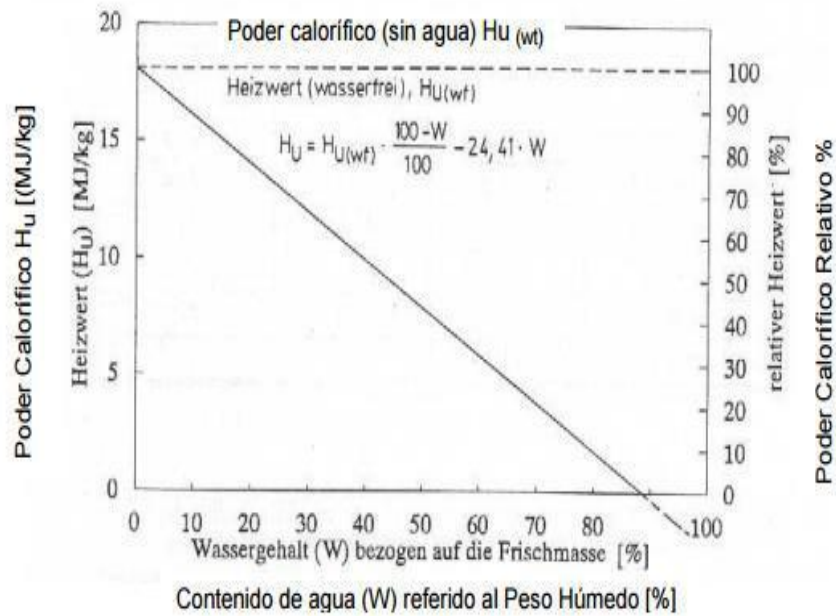
6.2.2.1. Factores que inciden en el poder calorífico

- La relación entre el peso y el volumen del cuerpo leñoso formado por una serie de sustancias y huecos que están ocupados por aire o agua, conocido como Densidad o peso específico aparente.
- Clase y especie de leña utilizada.
- La edad del árbol.
- La parte del árbol de la cual proceda la muestra, sea de ramas o del tronco y los productos de su combustión.
- Contenido en cenizas que, durante la combustión, puede propiciar la fusión completa de las partículas al aumentar la temperatura, pero al usar combustibles con temperaturas de fusión de las cenizas bajas, se puede formar escoria, la cual perturba el proceso de combustión.¹
- El contenido de humedad de la madera altera el poder calorífico de esta última reduciéndolo comenta Francescato. El rango de humedad de leña recién cortada varía entre 30 % y 50 %. Si se seca puede llegar a un 0 %

¹ FRANCESCATO, Valter., ANTONINI, Eliseo; ZUCCOLI BERGOMI, Luca. *Manual de combustibles de madera, producción, requisitos de calidad, comercialización*. p. 26.

en secado industrial y al natural menor al 30 %. Se puede observar la reducción de la leña en función de la humedad. Ver figura 1 y tabla III.

Figura 1. **Efectos del contenido de humedad en poder calorífico de la madera**



Fuente: Organización Latinoamericana de Energía, OLADE. *Documentos de trabajo de OLADE*.
<http://www.olade.org/documentos-de-trabajo-olade/>. Consulta: 25 de febrero de 2020.

Tabla III. Poder calorífico en función del contenido de humedad

Poder calorífico inferior de la leña en función del contenido de humedad	
Contenido de humedad	(kJ/kg)
0	19 880
10	17 644
20	15 412
30	13 180
40	10 947
50	8 715
60	6 483

Fuente: Organización Latinoamericana de Energía, OLADE. *Documentos de trabajo de OLADE*.
<http://www.olade.org/documentos-de-trabajo-olade/>. Consulta: 25 de febrero de 2020.

7. CALCULO DEL PODER CALORIFICO CON BASE A LA NORMA ASTM D-240

La metodología que engloba la utilización de una norma ASTM conlleva una serie de condiciones a cumplir y considerar, la norma ASTM D-240, aunque el diseño de la norma establece como su principal campo de análisis a los combustibles líquidos, la misma puede adaptarse para la realización con pruebas de combustibles sólidos.

A continuación, se muestra parte de la metodología experimental que se requiere seguir para la realización de este método.

- Tomar con una pinza para crisol una cápsula tarada
- Colocar en la cápsula de 0,9 a 1 g de muestra
- Colocar la cápsula en la canasta de la tapa de la bomba y poner 10 cm de alambre de platino en los agujeros de la canasta, de modo que un poco de alambre quede dentro de la muestra, pero sin tocar las paredes de la cápsula.
- Añadir 2 mL de agua destilada en la bomba.
- Cerrar la bomba herméticamente.
- Verificar que la válvula de purga esté cerrada.

- Colocar la bomba en el soporte y conectar en el cilindro de oxígeno. Abrir la válvula de paso de oxígeno y cerrarla cuando la presión se encuentre en 30 PSI.
- Colocar la bomba en un recipiente metálico con agua.
- El recipiente metálico con la bomba, introducirlo en el calorímetro adiabático.
- Nivelar la temperatura del calorímetro y del baño del recipiente metálico hasta una temperatura de 24,1 a 24,2 °C. Nivelar la temperatura del calorímetro usando el control que posee este equipo. Haciendo pasar agua caliente o fría según los requerimientos. la temperatura del recipiente metálico se nivela con la adición manual de agua caliente o fría.
- Una vez nivelada la temperatura, conectar el circuito de ignición y observar que se prenda la luz del equipo cuando se produzca ignición.
- Observar el ascenso progresivo de la temperatura producida por la ignición, tomando la precaución de que este ascenso de temperatura se nivele con la temperatura del calorímetro. Se registra como dato la temperatura más alta que se ha alcanzado.
- Sacar la bomba del recipiente metálico y del calorímetro. Enfriar con agua, abrir la válvula de la bomba de purga de CO₂.
- Abrir la bomba y retirar la cápsula y ésta colocarla en un vaso de precipitación.

- Medir la longitud final del alambre.
- Lavar la bomba con agua destilada. El lavado se realiza en un vaso de precipitación hasta que alcance los 400 mL de líquido.
- Tomar 40 mL de agua de lavado y adicionar media gota de anaranjado de metilo y titular con carbonato de sodio (0,0725 M) hasta el cambio de coloración. Registrar el volumen de titulación.

Por lo que es sumamente importante conocer el equipo necesario para poder implementar dicha prueba, como lo es la bomba calorimétrica.

7.1. Bomba calorimétrica

La bomba calorimétrica es un dispositivo clásico utilizado para determinar el poder calorífico de muestras de combustible sólido y líquido a un volumen constante.

Básicamente, este dispositivo quema una muestra de combustible y transfiere el calor a una masa de agua conocida. el poder calorífico puede calcularse a partir del peso de la muestra de combustible y el aumento de temperatura del agua. el poder calorífico obtenido en un ensayo con bomba calorimétrica representa el calor de combustión bruto por unidad de masa de la muestra de combustible. este es el calor producido cuando se quema la muestra más el calor cedido cuando se condensa el vapor de agua recién formado y se enfría a la temperatura de la bomba. la determinación de los poderes caloríficos es extremadamente importante; los combustibles se encuentran entre las mayores materias primas del mundo por su poder calorífico.

El objetivo del estudio con la bomba calorimétrica es obtener un mejor entendimiento de los principios de funcionamiento de la bomba calorimétrica y también averiguar los poderes caloríficos brutos de distintos tipos de combustibles líquidos.

8. DISEÑO METODOLÓGICO

8.1. Variables

Las variables pueden ser de dos maneras, y representan la forma en que las características pueden cambiar, se pueden representar como variables dependientes y las variables independientes.

8.1.1. Variables dependientes

A continuación, se describen las variables dependientes en la tabla IV.

Tabla IV. **Variables dependientes**

No	Variable	Dimensional	Descripción
1	Emisiones	Gramos CO ₂	Emisiones de gas que hay en el proceso de combustión de la cascarilla de cardamomo.
2	Poder Calorífico	MJ/Kg	Energía liberada por unidad de masa de cascarilla de cardamomo.

Fuente: elaboración propia.

8.1.2. Variable independiente

En la tabla V se describen las variables independientes.

Tabla V. **Variables independientes**

No	Variable	Dimensional	Descripción
1	Contenido de aceite esencial de cardamomo	Adimensional	Porcentaje de aceite esencial en la muestra

Fuente: elaboración propia.

8.2. Delimitación del campo de estudio

A continuación, se describe la delimitación del campo de estudio.

8.2.1. Área de obtención de la materia prima

El área que se estableció para poder realizar el trabajo de investigación fue el beneficiado de cardamomo de la República de Guatemala.

8.2.2. Cálculo del poder calorífico

La cascarilla de cardamomo fue la parte que se utilizó para ser sometida a las pruebas de análisis de poder calorífico, el cual se llevó a cabo en los laboratorios de hidrocarburos del Ministerio de Energía y Minas Diagonal 17, 29-78 zona 11, Las Charcas, Ciudad de Guatemala.

8.2.3. Cálculo de las emisiones de CO₂

Se procedió a realizar las pirolisis del material de cascarilla de cardamomo del tipo agotado y sin agotar de la fracción de aceite esencial, y posteriormente el proceso de combustión del mismo en Laboratorio de Extractos Vegetales, en la sección de Química Industrial de la Universidad de San Carlos de Guatemala ciudad universitaria zona 12, para el posterior cálculo estequiométricos de la cantidad de emisiones de CO₂ en gramos.

8.3. Recursos humanos disponibles

- Investigador: Br Osber Isabel Carías Palencia
- Asesor: Ing. José Ismael Veliz Padilla

8.4. Recursos materiales disponibles

- Cascarilla de cardamomo agotada de aceite esencial
- Cascarilla de cardamomo sin agotar de aceite esencial

8.5. Técnica cuantitativa

En el estudio de investigación se realizó la determinación cuantitativa del poder calorífico de la biomasa de cardamomo, así también se realizaron los cálculos estequiométricos para la determinación de la producción de dióxido de carbono que dicha biomasa producía al momento de combustionarla.

8.5.1. Técnica de muestreo y ordenamiento de las muestras

Se tomaron trescientos gramos de materia prima de cardamomo tanto agotado como sin agotar de su fracción de aceite esencial, dividiendo estos mismos en tres fracciones, teniendo con ello dos lotes de tres muestras de cien gramos de materia prima para realizar los análisis de determinación de poder calorífico, teniendo un total de tres repeticiones para cada materia prima en análisis, de la misma manera para la obtención de la cantidad de carbón vegetal contenida por unidad de masa combustionada se tomaron las respectivas muestras de materia prima siendo éstas, un lote de tres muestras de diez gramos de materia prima agotada, y un lote de tres muestras de cinco gramos materia prima sin agotar.

8.5.2. Preparación de las muestras

El proceso de extracción de la fracción de aceite esencial en la cascarilla de cardamomo se realizó mediante un proceso de secado de la materia prima, volatilizándolo con ello dicho contenido de aceite esencial.

Las muestras que se utilizaron para el cálculo del poder calorífico previamente tuvieron que pasar por un proceso de tamizaje previo a su uso en la bomba calorimétrica tal y como lo estipula la metodología de la norma ASTM D-240 el número de tamiz utilizado fue el número 100, este posee una abertura de malla de 0,149 mm.

Para la realización de la determinación experimental de la cantidad de carbono vegetal contenido en los diferentes tipos de materia prima de cascarilla se tomaron muestras de tamaño de partícula con un tamaño de tamiz número 60, el cual posee una abertura de malla de 0,250 mm.

8.5.3. Métodos y modelos de los datos según tipo de variable

A continuación, se describen los métodos y modelos de los datos según el tipo de variable.

8.5.3.1. Determinación del poder calorífico de la cascarilla de cardamomo

- Moler materia prima de cascarilla de cardamomo
- Llevar la materia a un tamaño de partícula 0,0149 mm mediante un proceso de tamizaje.
- Tomar muestras de 100 g cada una para realizar los lotes, tanto agotada como sin agotar de su fracción natural de aceite esencial.
- Utilizar la bomba calorimétrica para la determinación húmeda del poder calorífico de cada una de las muestras.

8.5.3.2. Determinación de la cantidad emisiones de CO₂ en gramos por unidad de gramos de materia prima vegetal combustionada

- Reducción del tamaño de partícula a 0,250 mm mediante el proceso de molienda y tamizaje.
- Tomar una muestra equivalente a 10 g de cada una de las especies (con y sin su fracción natural de aceite esencial).

- Introducir las muestras a un tubo de ensayo de 50 mL y sellar con un tapón horadado.
- Montar el tubo de ensayo sobre un soporte universal e introducir en el tapón horadado la conexión de tubería que estará descargando los gases en un recipiente con agua.
- Pirolizar la muestra hasta que no se observe en el recipiente con agua que no se está generando burbujas a causa de los gases producto de la pirolisis.
- Depositar el pirolizado en crisoles previamente tarados.
- Introducir la muestra en una mufla, y regular la temperatura a 900 °C.
- Dejar enfriar la muestra dentro de la mufla.
- Medir la masa final.
- Con la diferencia de masas, realizar el siguiente calculo estequiométrico.

$$\frac{gCO_2}{gM.P} = (GCM * \left(\frac{1MolC}{12,0107gC}\right) * \left(44,01g \frac{CO_2}{1MolC}\right)) / CMP$$

Donde:

$\frac{gCO_2}{gM.P}$: cantidad de gramos de CO₂ por cada gramo de materia prima.

GCM : gramos de carbón en la muestra.

CMP : gramos de masa de materia prima usados.

8.6. Recolección y ordenamiento de la información

Se realizaron 6 mediciones del poder calorífico tres repeticiones para la materia prima de cascarilla agotada de su fracción natural de aceite esencial, y tres para la materia prima de cascarilla sin agotar de su fracción natural de aceite esencial, así como 6 determinaciones de la cantidad de en gramos de CO₂ por gramo de materia prima vegetal, 3 para de cascarilla agotada de su fracción natural de aceite esencial, y tres para la materia prima de cascarilla sin agotar de su fracción natural de aceite esencial.

Tabla VI. **Cantidad de emisiones en gramos de CO₂ por gramo de materia prima de cascarilla de cardamomo agotada**

Corrida	Cascarilla de cardamomo(g)	Masa carbón vegetal(g)	CO ₂ (g)	gCO ₂ /gM.P	Media de gCO ₂ /gM.P	Desviación gCO ₂ /gM.P
1	10,07	1,990	7,294	0,7241	0,7467	0,0303
2	10,01	2,134	7,821	0,7812		
3	10,04	2,014	7,380	0,7349		

Fuente: elaboración propia.

Tabla VII. **Cantidad de emisiones en gramos de CO₂ por gramo de materia prima de cascarilla de cardamomo sin agotar de su fracción natural de aceite esencial**

Corrida	Masa cascarilla cardamomo (g)	Masa carbón vegetal	CO ₂ (g)	gCO ₂ /gM.P	Media de gCO ₂ /gM.P	Desviación
1	5,019	1,0521	3,855	0,768	0,833	0,1145
2	5,034	1,0519	3,854	0,766		
3	5,030	1,3250	4,855	0,965		

Fuente: elaboración propia.

Tabla VIII. **Poder calorífico en diferentes unidades de medición de cascarilla de cardamomo sin agotar de su fracción natural de aceite esencial**

Corrida	MJ/Kg	Kcal/kg	Btu/Lb
1	16,14	3 856	6 940
2	16,62	3 968	7 143
3	15,90	3 795	6 833
Media	16,22	3 873	6 972
Desviación	0,3666		

Fuente: elaboración propia.

Tabla IX. **Poder calorífico en diferentes unidades de medición de cascarilla de cardamomo agotadas de su fracción natural de aceite esencial**

Corrida	MJ/Kg	Kcal/kg	Btu/Lb
1	13,68	3 268	5 884
2	14,36	3 422	6 160
3	13,99	3 341	6 013
Media	14,01	3 344	6 019
Desviación	0,3404		

Fuente: elaboración propia.

Tabla X. **Factores de emisión de gases CO₂ en gramos por cada gramo de materia prima combustionada de varios combustibles utilizados para la generación de energía**

Combustible	Factor De Emisión(gCO ₂ /L)	Densidad (g/L)	gCO ₂ /gM.P
Gasolina	2311,89	780	2,964
Diesel	2689,63	959	2,805
Bunker-C	3155,24	1,010	3,124
Madera			0,840

Fuente: Climate Registry. *Default emission factors 2018*. <https://www.theclimateregistry.org/wp-content/uploads/2018/06/The-Climate-Registry-2018-Default-Emission-Factor-Document.pdf>.

Consulta: 4 de abril de 2020.

8.7. Análisis estadístico

El análisis estadístico es una herramienta para evaluar la relación entre dos variables o factores que son objetos de estudio.

8.7.1. Media muestral

Expresa el conjunto finito de valores que es igual a la suma de la distribución de todos los datos del estudio dividido entre el número de sus sumandos.

$$\bar{x} = \frac{\sum_{i=1}^N x_i}{N} \quad (\text{Ecuación 1})$$

Donde:

\bar{x} : media

$\sum x$: sumatoria de valores

N: número de datos

8.7.2. Varianza

Consiste en determinar el efecto que imprime una variable independiente de distintos niveles sobre una variable dependiente; mide la menor o mayor dispersión de los datos obtenidos respecto a la media aritmética.

$$\sigma^2 = \frac{\sum (x_i - \bar{x})^2}{N} \quad (\text{Ecuación 2})$$

σ^2 = varianza

\bar{x} = valor promedio

x_i =valor de la muestra

N=número de datos

8.7.3. Desviación estándar

Expresa la dispersión de los datos para una misma medición respecto al promedio de distribución de los valores.

$$\sigma^2 = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^2}{N}} \quad (\text{Ecuación 3})$$

Donde:

σ = desviación estándar

\bar{x} = valor promedio

x_i = valor de la muestra

N = número de datos

8.7.4. Análisis de varianza

La comprobación de la hipótesis nula y alternativa se realiza mediante el análisis de varianza, el procedimiento de este método es el siguiente:

$$S_2^2 = \sum_i \sum_j \frac{(x_{ij} - \bar{x}_i)^2}{h(n-1)} \quad (\text{Ecuación 4})$$

Donde:

S_2^2 = media cuadrática dentro de la muestra

x_{ij} = repetición j de la muestra i

\bar{x}_i = media de la muestra i

n = número de repeticiones

h = número de muestras

$h(n - 1)$ = grados de libertad

La variación entre muestras se define mediante la siguiente ecuación:

$$S_1^2 = \frac{n \sum_i (\bar{x}_i - \bar{x})^2}{h-1} \quad (\text{Ecuación 5})$$

Donde:

S_1^2 = media cuadrática entre muestras

n = número de repeticiones

\bar{x}_i = media de la muestra i

\bar{x} = media global

h = número de muestras

$(h - 1)$ = grados de libertad

Si la hipótesis nula es correcta la variación entre S_1^2 y S_2^2 no debe ser significativa. Esto se comprueba mediante una Prueba F de una cola.

$$F = \frac{S_1^2}{S_2^2} \quad (\text{Ecuación 6})$$

S_2^2 = media cuadrática dentro de la muestra

S_1^2 = media cuadrática entre muestras

Si la hipótesis nula es correcta la variación entre S_1^2 y S_2^2 debe ser significativa. Si F supera a la F crítica indica que si hay diferencia significativa. A continuación, se presenta el análisis de varianza de un factor para los datos obtenidos en la fase experimental de este estudio de investigación.

Tabla XI. **Análisis de varianza de un factor para el poder calorífico de cascarilla de cardamomo en función natural de aceite esencial contenido y agotado del mismo**

Origen de las variaciones	Suma de Cuadrados	Grados de libertad	Promedio de los cuadrados	F	Probabilidad	Valor crítico para F
Entre grupos	7,32615	1	7,32615	58,53895	0,001568	7,708647
Dentro de los grupos	0,5006	4	0,12515			
Total	7,82675	5				

Fuente: elaboración propia.

Tabla XII. **Análisis de varianza de un factor, para la cantidad de emisiones de CO₂ en gramos, por cada gramo de materia prima combustionada en función de su fracción natural de aceite esencial contenido y agotado del mismo luego del proceso de pirólisis**

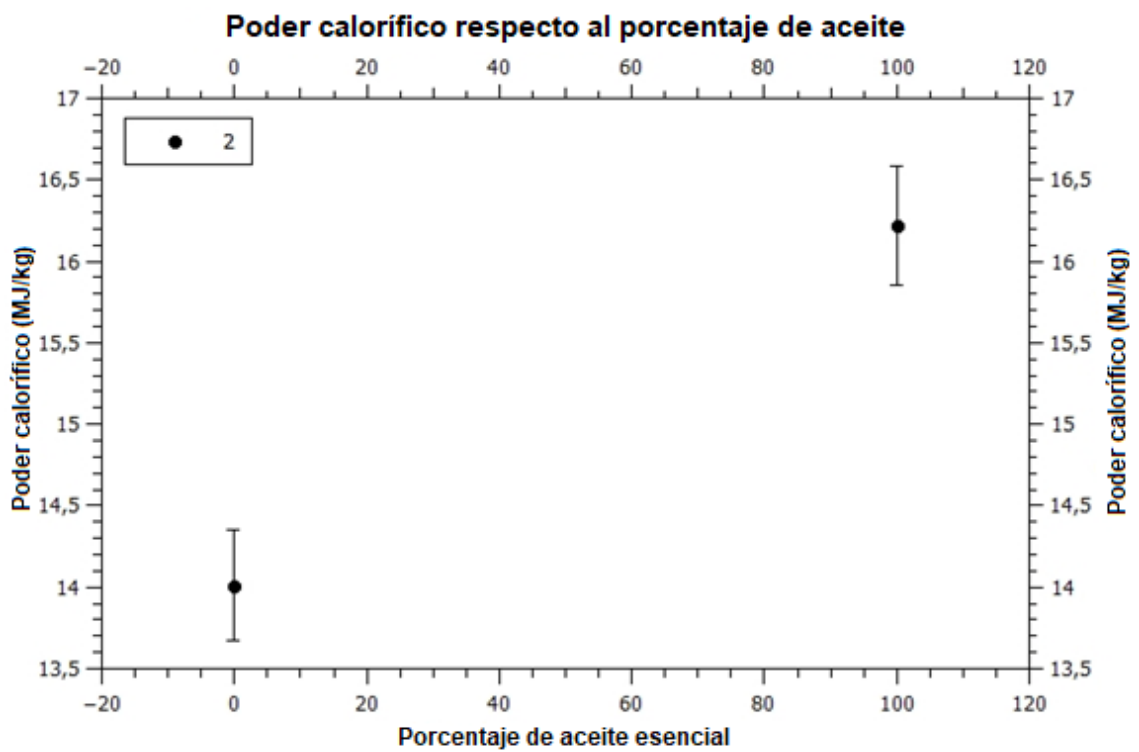
Origen de las variaciones	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Promedio de los cuadrados	F	Probabilidad	Valor crítico para F
Entre grupos	3,034029512	1	3,034029512	86,3396	0,000746311	7,70864
Dentro de los grupos	0,14056255	4	0,035140638			
Total	3,174592062	5				

Fuente: elaboración propia.

9. RESULTADOS

Se presentan los respectivos poderes caloríficos medios en unidades MJ/Kg de las muestras de cascarilla de cardamomo agotadas y sin agotar de su fracción natural de aceite esencial.

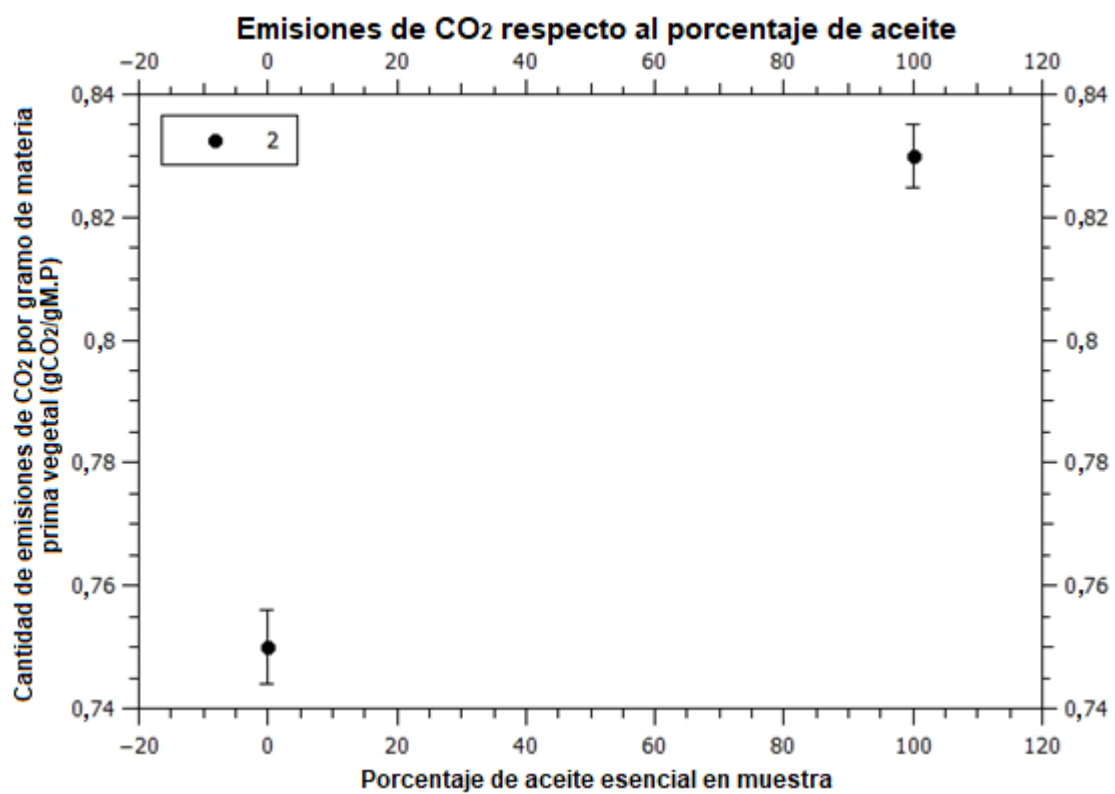
Figura 2. Poder calorífico respecto al porcentaje de aceite esencial



Fuente: elaboración propia.

Se presentan los factores medios de emisiones de gramos de CO₂ emitidos por cada gramo de materia prima vegetal, de cada una de las muestras comparando cada una de ellas con la cantidad de su fracción natural de aceite esencial

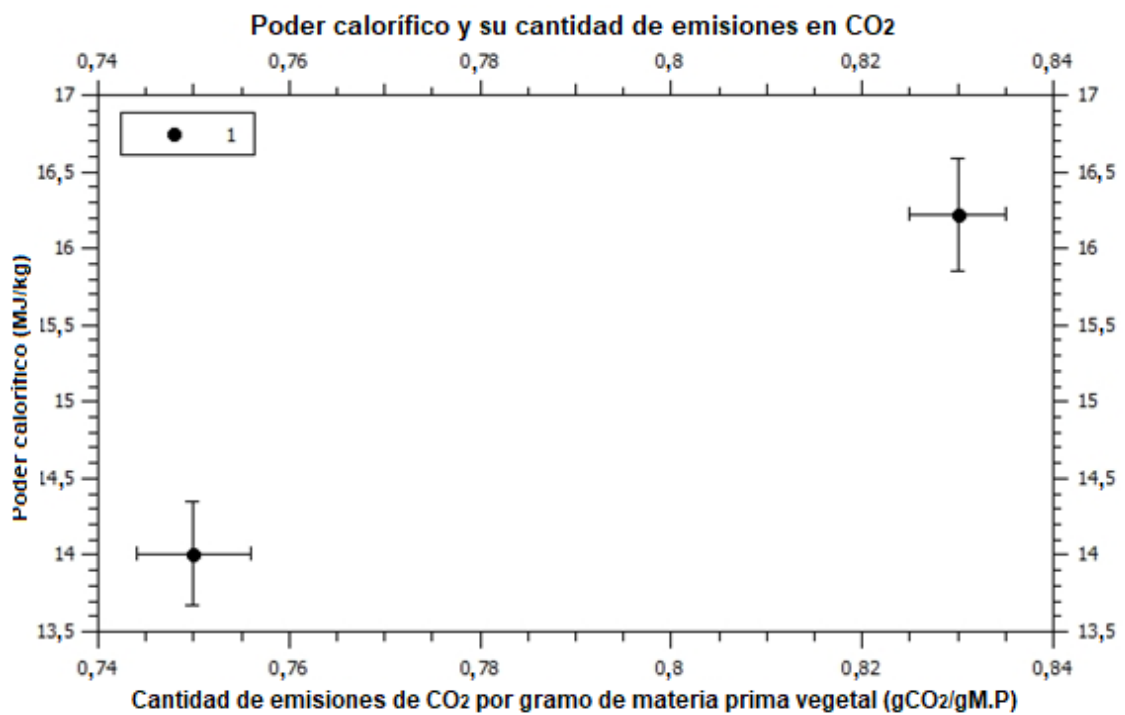
Figura 3. **Emisiones de CO₂ respecto al porcentaje de aceite esencial**



Fuente: elaboración propia.

Se muestran los respectivos poderes caloríficos (MJ/kg), medios de la materia prima agotada y sin agotar de su fracción natural de aceite esencial, y se compara con la cantidad de emisiones por gramo de materia prima de la misma.

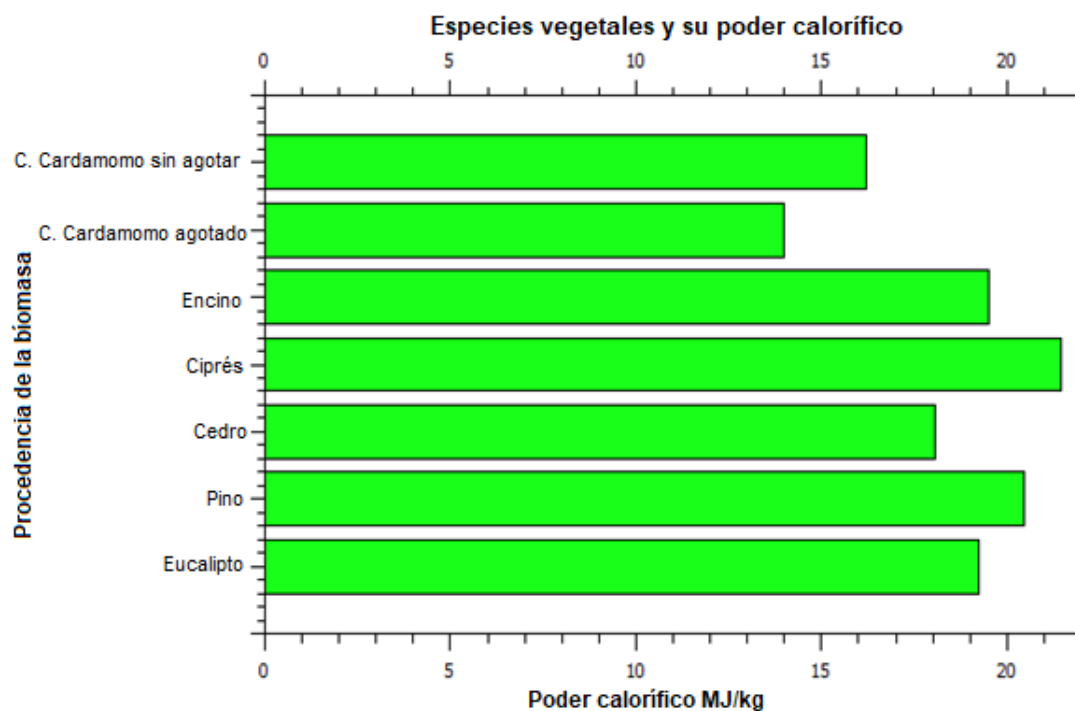
Figura 4. Poder calorífico y su cantidad de emisiones en CO₂



Fuente: elaboración propia.

Se muestran los poderes caloríficos en MJ/kg medios de diferentes especies vegetales utilizadas para generación de energía, incluyendo la cascarilla de cardamomo (agotada y sin agotar de su fracción natural de aceite esencial).

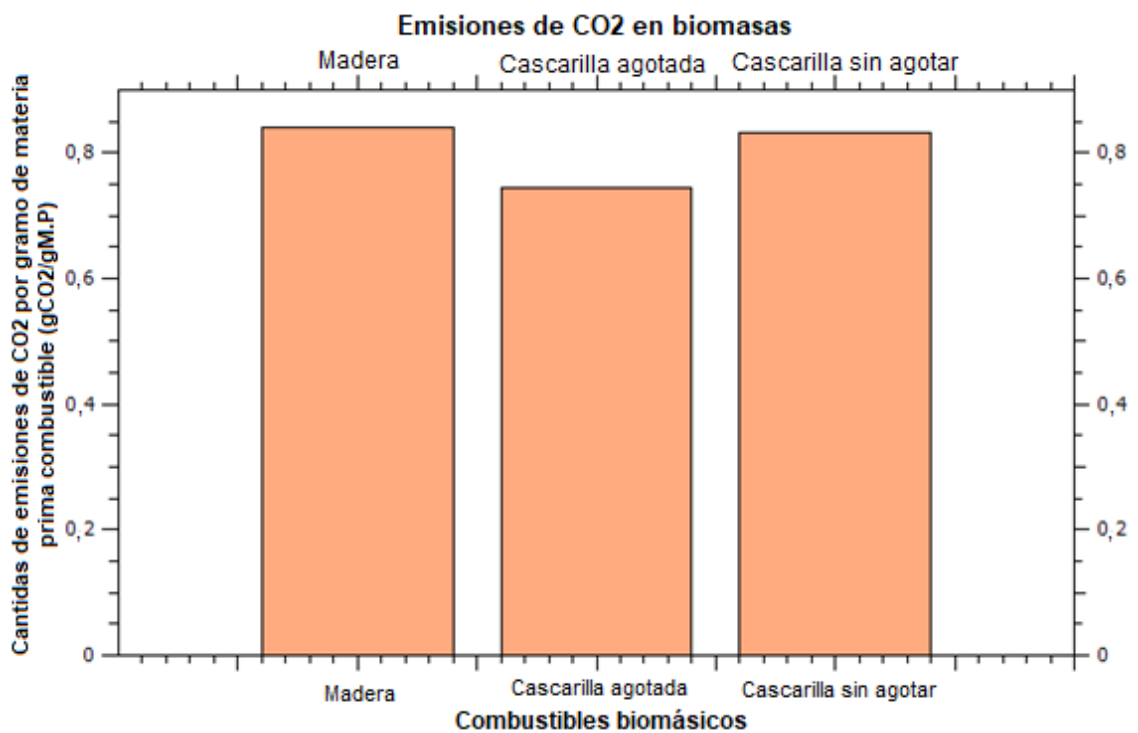
Figura 5. **Especies vegetales y su poder calorífico**



Fuente: elaboración propia.

Se muestran los factores de emisiones en gramos de CO₂ medios emitidos por gramo de materia prima utilizada de madera utilizada para la generación de energía incluyendo la cascarilla de cardamomo (agotada y sin agotar de su fracción natural de aceite esencial).

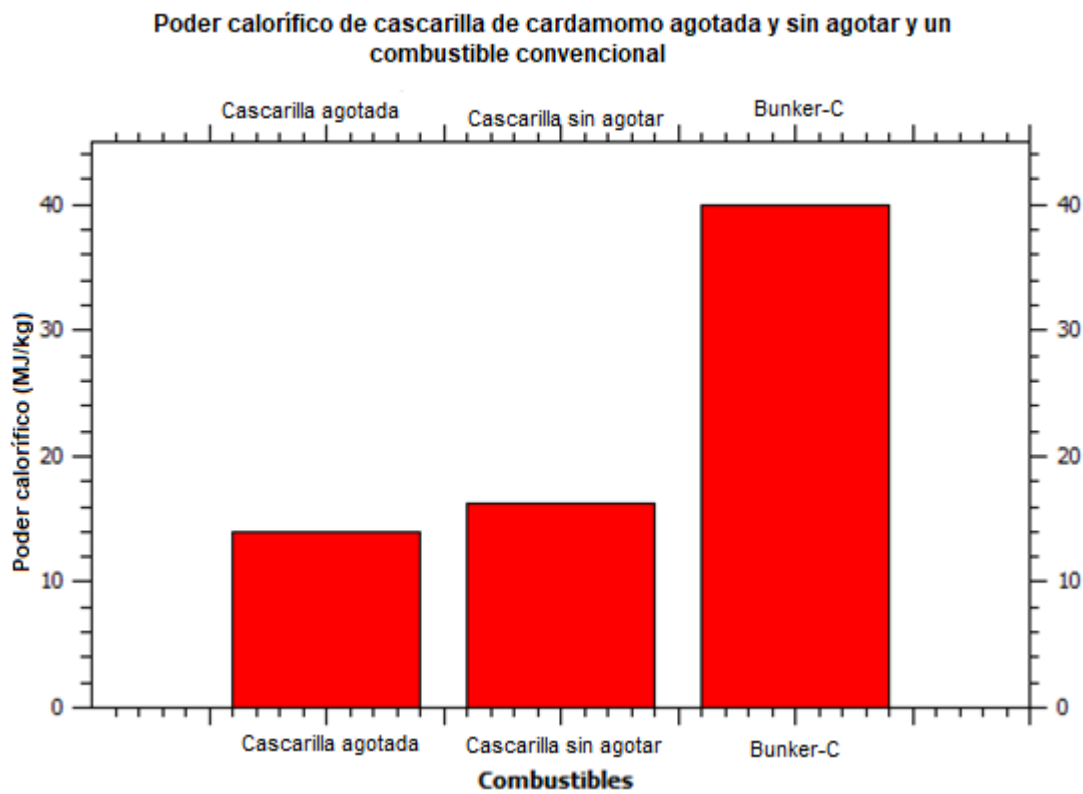
Figura 6. **Emisiones de CO₂ en biomásas**



Fuente: elaboración propia.

Se visualiza la comparación del poder calorífico medio en MJ/Kg entre un combustible fósil convencional con un valor de 40 MJ/Kg utilizado para la generación de energía, y la cascarilla de cardamomo (agotada y sin agotar de su fracción natural de aceite esencial).

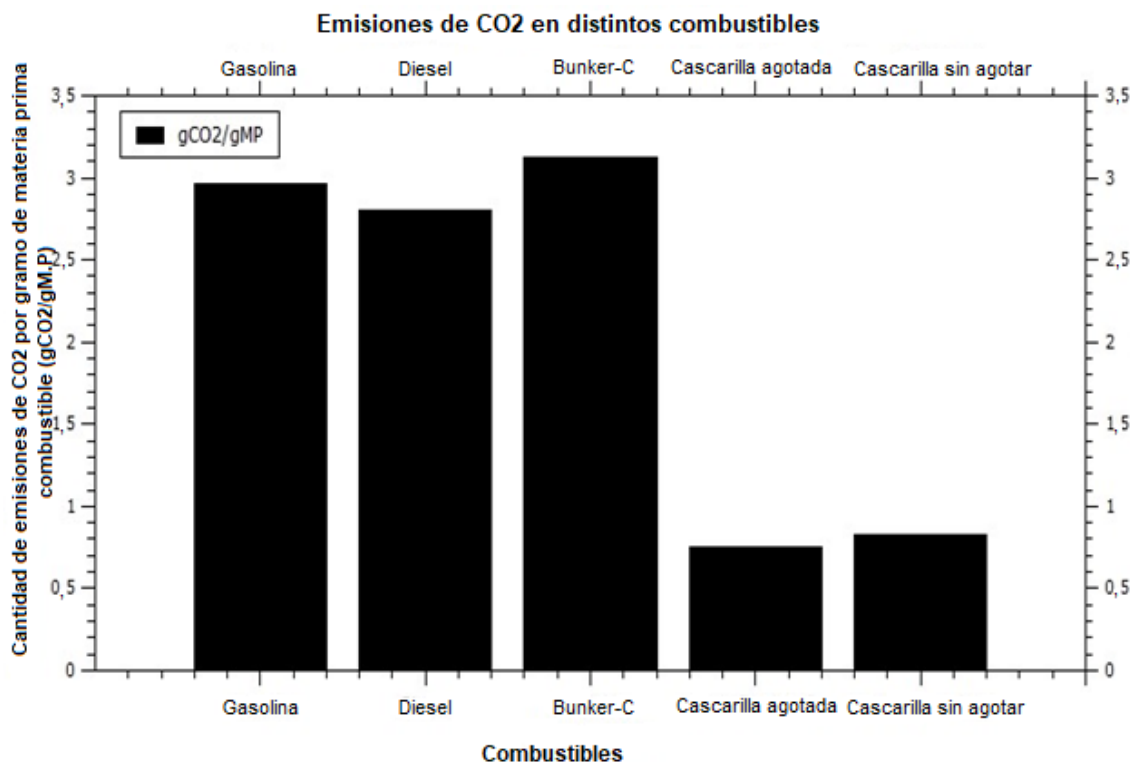
Figura 7. **Poder calorífico de cascarilla de cardamomo agotada y sin agotar de su fracción de aceite esencial y un combustible convencional (Bunker-C)**



Fuente: elaboración propia.

Se muestran los factores de emisiones en gramos de CO₂ medios de distintos combustibles fósiles por gramo de materia prima combustionada, así como también los factores de la cascarilla de cardamomo (agotada y sin agotar de su fracción natural de aceite esencial).

Figura 8. **Emisiones de CO₂ en distintos combustibles**



Fuente: elaboración propia.

10. INTERPRETACION DE RESULTADOS

En la tabla VIII y tabla IX se encuentran los resultados obtenidos del poder calorífico, en la primera se muestran los datos de la cascarilla de cardamomo sin agotar su fracción natural de aceite esencial y en la segunda tabla IX, los valores correspondientes a la cascarilla de cardamomo agotada de su fracción natural de aceite esencial. En la figura 2 se puede apreciar la diferencia significativa del poder calorífico en función de la cascarilla de cardamomo agotada y sin agotar, donde la segunda obtuvo los valores más altos del poder calorífico, esto a raíz del módulo energético adicional que aporta el metabolito secundario en el material vegetal. Se trata de complejo celulósico en el que existen cavidades, canales o áreas superficiales donde el aceite esencial es biológicamente depositado, esta sustancia está constituida en su mayoría por una mezcla de compuestos hidrocarbonados y en una parte relativamente pequeña de compuestos derivados de grupos funcionales orgánicos como, aldehídos, ésteres, alcoholes, cetonas, entre otros. Es por eso que el aceite esencial adquiere su capacidad carburante y, por ende, añade un paquete energético extra cuando el material celulósico es incinerado. Esta energía extra se encuentra almacenada en los enlaces químicos que conforma las cadenas complejas de compuestos, derivados de la unidad de isopreno (monómero), una especie química de 5 carbonos que bajo la condensación de múltiples unidades monoméricas conduce a la formación de polímeros naturales, y es liberada en la combustión. Este comportamiento es análogo a lo que sucede con un combustible fosilizado. Así mismo los resultados de la tabla XI evidencian que existe una diferencia significativa en la existencia de aceite esencial en las muestras respecto a los valores obtenidos de poder calorífico obtenidos.

Cuando se compara el poder calorífico de la cascarilla de cardamomo (los dos casos en análisis), con el de algunas especies forestales madereras para la generación energética como se puede observar en la figura 5 y tabla II se tiene un buen desempeño de poder calorífico. Tomado en consideración que la cascarilla de cardamomo es en muchos casos desechada y las demás especies que aparecen representadas directamente se utilizan para el propósito de generación energética exclusivamente.

En la industria de generación energética es usual que se utilicen combustibles fósiles, en la figura 7 se hace la comparación de un combustible convencional (Bunker-C), con los combustibles biomásicos en estudio, indudablemente la diferencia de poder calorífico se eleva considerablemente, siendo la naturaleza química de ambos combustibles el que interviene en el comportamiento: un hidrocarburo líquido altamente inflamable (Bunker-C) y biomasa (cascarilla de cardamomo), donde esta última depende de la descomposición estructural, compuesta en su totalidad de celulosa, hemicelulosa y lignina que al momento de someterlas a una fuente de ignición son fragmentadas a unidades más pequeñas en donde el carbón implícito es aprovechado para desencadenar reacciones químicas de combustión lo cual aludirá a su poder calorífico.

En el caso de la cascarilla, con su fracción de aceite esencial sin agotar, adquiere un valor agregado en esta comparación, pero es insignificante.

Los factores de emisiones de gases de efecto invernadero son importantes en el diseño de plantas generadoras de energía ya que existen entes reguladores estatales que se encargan de la supervisión de éstos, en las tablas VI y VII se muestran los factores de emisión calculados en gramos de CO₂ liberados por cada gramo de materia prima vegetal combustionado,

nuevamente se observa que la materia prima que conserva su fracción natural de aceite esencial es la que presenta un factor de emisión mayor, este comportamiento está relacionado con el poder calorífico ya analizado debido a que las emisiones, producto de la reacción de combustión, engloban la cantidad de carbono que está consumiéndose formando dióxido de carbono (CO₂), por lo tanto, al tener una mayor cantidad de carbono disponible, no solo habrá un incremento directo del poder calorífico sino que paralelamente a éste, se suma la cantidad de CO₂ emitido, dicho comportamiento se puede observar en la figura 3.

La comparación de los factores de emisiones de varios combustibles que se utilizan comúnmente en generación encontrados en la tabla X y representados en las figuras 6 y 8, dejan en evidencia el contraste que se entre el incremento de emisiones de CO₂ en los combustibles líquidos provenientes de los hidrocarburos como el Bunker-C, y lo ambientalmente favorables que puede ser inclusive comparando la cascarilla de cardamomo (con y sin agotar su fracción de aceite esencial) con las emisiones producidas por la leña.

El análisis de varianza presentado en la tabla XII demuestra que existe una diferencia significativa en la cantidad de emisiones de CO₂ respecto del contenido natural de aceite esencial contenido en la cascarilla de cardamomo.

CONCLUSIONES

1. No existen documentos ni experiencias que respalden usos productivos en el área de generación de energía por parte de la utilización de la cascarilla de cardamomo.
2. Se calculó el poder calorífico para la cascarilla de cardamomo agotada de su fracción natural de aceite esencial y tuvo un valor medio de 14,01 MJ/Kg.
3. Se calculó el poder calorífico para la cascarilla de cardamomo sin agotar de su fracción natural de aceite esencial el cual tuvo un valor medio de 16,22 MJ/Kg.
4. Existe una diferencia significativa en el valor del poder calorífico respecto a la cantidad de aceite esencial contenido en la cascarilla de cardamomo.
5. Existe una diferencia significativa en el valor de emisiones de CO₂ respecto a la cantidad de aceite esencial contenido en la cascarilla de cardamomo.
6. La comparación de emisiones entre un combustible convencional (Bunker-C) y las emisiones obtenidas mediante la combustión de la cascarilla de cardamomo se determinó que la cantidad de emisiones del Bunker-C es cuatro veces mayor.

RECOMENDACIONES

1. Ejecutar un estudio sobre la factibilidad económica del uso de cascarilla de cardamomo para el uso de la generación de energía.
2. Realizar un estudio sobre el diseño de un generador de vapor utilizando la cascarilla de cardamomo como biomasa combustible.
3. Efectuar un estudio sobre la creación de briquetas de cascarilla de cardamomo y adicionar a las mismas un aglutinante que aumente su poder calorífico.
4. Tomar el presente estudio como referencia de los usos productivos energéticos que se le puede dar a la cascarilla de cardamomo.
5. Realizar estudios más extensos comparando especies vegetales que comúnmente se utilizan para la generación energética especialmente en el entorno de la industria de ingenios azucareros.
6. Ejecutar estudios correspondientes a filtros que se pudieran utilizar para aminorar las emisiones ambientales de CO₂, producto de la combustión de cascarilla de cardamomo.

BIBLIOGRAFÍA

1. ARPEL-LICA. *Manual de biocombustibles. Asociación Regional de Empresas de Petróleo y Gas Natural en Latinoamérica y el Caribe.* Argentina: Arpel, 2009. 190 p.
2. ÇENGEL, Yunus A; BOLES, Michael A. *Termodinámica.* 5a ed. México: McGraw-Hill, 2003. 988 p.
3. Comisión Centroamericana de Ambiente y Desarrollo, CAD y Consejo Agropecuario Centroamericano, CAC 2008. *Programa estratégico regional para el manejo de los ecosistemas forestales.* El Salvador: Comité Técnico de Bosques, 2014. 48 p.
4. Comisión Económica para Latinoamérica y Ministerio de Energía y Minas. *Informe final, encuesta nacional de leña (consumo de la leña en hogares y pequeña industria en la República de Guatemala).* Guatemala: CEPAL, 2011. 41 p.
5. Fortalecimiento de la capacidad en energía renovable para América Central. BUN-CA. *Biomasa manual sobre energía renovable.* Costa Rica: FOCER, 2002. 56 p.
6. FRANCESCATO, Valter., ANTONINI, Eliseo; ZUCCOLI BERGOMI, Luca. *Manual de combustibles de madera, producción, requisitos de calidad, comercialización.* Valladolid, España: Asociación Española de Valorización Energética de la Biomasa, 2008. 82 p.

7. INCROPERA, Frank P; DE WITT, David P. *Fundamentos de transferencia de calor*. 4a ed. México: Prentice Hall, 1996. 881 p.
8. KERN, Donald. *Procesos de transferencia de calor*. 2a ed. México: C.E.C.S.A, 1986. 981 p.
9. The Climate Registry. *The climate registry's 2018 default emission factors*. USA: TCR, 2018. 41 p.
10. ZANOTTI, JR. *Los bosques energéticos en Guatemala y el uso de leña*. Instituto Nacional de Bosques. Guatemala: INAB, 2008. 66 p.

APÉNDICES

Apéndice 1. **Preparación de la materia prima agotada mediante un proceso de secado natural para volatilizar su fracción natural de aceite esencial**



Fuente: elaboración propia.

Apéndice 2.

Proceso de tamizaje de la materia prima previo a la medición del poder calorífico



Fuente: elaboración propia.

Apéndice 3. **Muestras que se enviaron de cascarilla de cardamomo (con y sin agotar de su fracción natural de aceite esencial) a analizar al Laboratorio de Hidrocarburos del Ministerio de Energía y Minas**



Fuente: elaboración propia.

Apéndice 4. **Calorímetro usado para el cálculo del poder calorífico de las muestras**



Fuente: elaboración propia.

Apéndice 5. **Resultado del poder calorífico de la muestra 1 de cardamomo sin agotar de su fracción natural de aceite esencial**

LABORATORIOS TÉCNICOS			MINISTERIO DE ENERGÍA Y MINAS	PÁGINA 1 DE (1)
				LAB-REP-0278-2020
				ORDEN No. L-0130-2020
				GUATEMALA, 26-02-2020
RESULTADOS DE ANÁLISIS				
MUESTRA: Cascarilla Cardamomo PRESENTADA POR: Osber Carías RESPONSABLE DEL MUESTREO: Osber Carías PROCEDENCIA: Osber Carías. Referencia de la muestra: Sin agotar 1 LOCALIZACIÓN: Guatemala, Guatemala FECHA DE MUESTREO: 10-02-2020 FECHA DE RECEPCIÓN DE MUESTRA Y PAPELERÍA: 20-02-2020 FECHA DE ANÁLISIS: Del 24 al 26-02-2020 PRECIO DE ANÁLISIS: \$ 20.00 ANALISTA: Hever Pérez				
DESCRIPCIÓN	MÉTODO DE ANÁLISIS	ESPECIFICACIÓN (a)	RESULTADO (b)	
PODER CALORÍFICO SUPERIOR, MJ/Kg	ASTM D-240		(c) 16.14	
OBSERVACIONES: <ul style="list-style-type: none"> a) En el Acuerdo Ministerial No. 364-2019 no existen especificaciones para este producto. b) El resultado es válido solo para la cantidad de muestra presentada en este laboratorio. c) El valor de 16.14 MJ/Kg es equivalente a 3856 Kcal/Kg y a 6940 Btu/Lb. 				
  <p>Sr. Julio Villacinda ÁREA DE HIDROCARBUROS</p>  <p>Vo. Bo. Inge. Mayra Villatoro COORDINADORA LABORATORIOS TÉCNICOS</p> 				
Jvg El presente informe no puede ser modificado ni reproducido sin autorización del Laboratorio Técnico.				


Fuente: elaboración propia, con base en datos experimentales de laboratorios técnicos área de hidrocarburos, Ministerio de Energía y Minas MEM.

Apéndice 6. **Resultado del poder calorífico de la muestra 2 de cardamomo sin agotar de su fracción natural de aceite esencial**

LABORATORIOS TÉCNICOS	 GOBIERNO de GUATEMALA <small>REPUBLICA DE GUATEMALA</small>	MINISTERIO DE ENERGÍA Y MINAS	PÁGINA 1 DE (1)
			LAB-REP-0281-2020 ORDEN No. L-0130-2020 GUATEMALA, 26-02-2020
RESULTADOS DE ANÁLISIS			
MUESTRA: Cascarilla Cardamomo PRESENTADA POR: Osber Carías RESPONSABLE DEL MUESTREO: Osber Carías PROCEDENCIA: Osber Carías. Referencia de la muestra: Sin agotar 2 LOCALIZACIÓN: Guatemala, Guatemala FECHA DE MUESTREO: 10-02-2020 FECHA DE RECEPCIÓN DE MUESTRA Y PAPELERÍA: 20-02-2020 FECHA DE ANÁLISIS: Del 24 al 26-02-2020 PRECIO DE ANÁLISIS: \$ 20.00 ANALISTA: Hever Pérez			
DESCRIPCIÓN	MÉTODO DE ANÁLISIS	ESPECIFICACIÓN (a)	RESULTADO (b)
PODER CALORÍFICO SUPERIOR, MJ/Kg	ASTM D-240	-----	(c) 16.62
OBSERVACIONES: <ul style="list-style-type: none"> a) En el Acuerdo Ministerial No. 364-2019 no existen especificaciones para este producto. b) El resultado es válido solo para la cantidad de muestra presentada en este laboratorio. c) El valor de 16.62 MJ/Kg es equivalente a 3968 Kcal/Kg y a 7143 Btu/Lb. 			
  <p>Ing. Julio Villacinda ÁREA DE HIDROCARBUROS</p>  <p>Vo. Bo. Inga. Mayra Villatoro COORDINADORA LABORATORIOS TÉCNICOS</p> 			
jvg El presente informe no puede ser modificado ni reproducido sin autorización del Laboratorio Técnico.			

Fuente: elaboración propia, con base en datos experimentales de laboratorios técnicos área de hidrocarburos, Ministerio de Energía y Minas MEM.

Apéndice 7. **Resultado del poder calorífico de la muestra 3 de cardamomo sin agotar de su fracción natural de aceite esencial**

LABORATORIOS TÉCNICOS	 MINISTERIO DE ENERGÍA Y MINAS		PÁGINA 1 DE (1) LAB-REP-0286-2020 ORDEN No. L-0130-2020 GUATEMALA, 27-02-2020
	RESULTADOS DE ANÁLISIS		
MUESTRA: Cascarilla Cardamomo PRESENTADA POR: Osber Carías RESPONSABLE DEL MUESTREO: Osber Carías PROCEDENCIA: Osber Carías. Referencia de la muestra: Sin agotar 3 LOCALIZACIÓN: Guatemala, Guatemala FECHA DE MUESTREO: 10-02-2020 FECHA DE RECEPCIÓN DE MUESTRA Y PAPELERÍA: 20-02-2020 FECHA DE ANÁLISIS: Del 24 al 26-02-2020 PRECIO DE ANÁLISIS: \$ 20.00 ANALISTA: Roderico Zapeta			
DESCRIPCIÓN	MÉTODO DE ANÁLISIS	ESPECIFICACIÓN (a)	RESULTADO (b)
PODER CALORÍFICO SUPERIOR, MJ/Kg	ASTM D-240		(c) 15.90
OBSERVACIONES: <p style="font-size: small;"> a) En el Acuerdo Ministerial No. 364-2019 no existen especificaciones para este producto. b) El resultado es válido solo para la cantidad de muestra presentada en este laboratorio. c) El valor de 15.90 MJ/Kg es equivalente a 3795 Kcal/Kg y a 6833 Btu/Lb. </p> <div style="display: flex; justify-content: space-around; align-items: center;"> <div style="text-align: center;">  <p>Ing. Julia Vilajacinda ÁREA DE HIDROCARBUROS</p> </div> <div style="text-align: center;">  <p>Vo. Bo. Inga. Mayra Villatoro COORDINADORA LABORATORIOS TÉCNICOS</p> </div> <div style="text-align: center;">  </div> </div> <p style="font-size: x-small; margin-top: 10px;">Jvg El presente informe no puede ser modificado ni reproducido sin autorización del Laboratorio Técnico.</p>			




Fuente: elaboración propia, con base en datos experimentales de laboratorios técnicos área de hidrocarburos, Ministerio de Energía y Minas MEM.

Apéndice 8. **Resultado del poder calorífico de la muestra 1 de cardamomo agotado de su fracción natural de aceite esencial**

LABORATORIOS TÉCNICOS	 GOBIERNO de GUATEMALA <small>REPUBLICA DE GUATEMALA</small>		MINISTERIO DE ENERGÍA Y MINAS	PÁGINA 1 DE (1)
				LAB-REP-0279-2020 ORDEN No. L-0130-2020 GUATEMALA, 26-02-2020
RESULTADOS DE ANÁLISIS				
MUESTRA: Cascarilla Cardamomo PRESENTADA POR: Osber Carías RESPONSABLE DEL MUESTREO: Osber Carías PROCEDENCIA: Osber Carías. Referencia de la muestra: Agotado 1 LOCALIZACIÓN: Guatemala, Guatemala FECHA DE MUESTREO: 10-02-2020 FECHA DE RECEPCIÓN DE MUESTRA Y PAPELERÍA: 20-02-2020 FECHA DE ANÁLISIS: Del 24 al 26-02-2020 PRECIO DE ANÁLISIS: \$ 20.00 ANALISTA: Hever Pérez				
DESCRIPCIÓN	MÉTODO DE ANÁLISIS	ESPECIFICACIÓN (a)	RESULTADO (b)	
PODER CALORIFICO SUPERIOR, MJ/Kg	ASTM D-240		(c) 14.36	
OBSERVACIONES: <p>a) En el Acuerdo Ministerial No. 354-2019 no existen especificaciones para este producto. b) El resultado es válido solo para la cantidad de muestra presentada en este laboratorio. c) El valor de 14.36 MJ/Kg es equivalente a 3422 Kcal/Kg y a 6160 Btu/Lb.</p> <div style="display: flex; justify-content: space-around; align-items: center;"> <div style="text-align: center;">  <p>Ing. Julio Vilacinda ÁREA DE HIDROCARBUROS</p> </div> <div style="text-align: center;">  </div> <div style="text-align: center;">  </div> </div> <p style="text-align: center;">Vo. Bo. Inga. Mayra Vilatoro COORDINADORA LABORATORIOS TÉCNICOS</p> <p style="text-align: center;"></p>				
Jvg El presente informe no puede ser modificado ni reproducido sin autorización del Laboratorio Técnico.				






Fuente: elaboración propia, con base en datos experimentales de laboratorios técnicos área de hidrocarburos, Ministerio de Energía y Minas MEM.

Apéndice 9. **Resultado del poder calorífico de la muestra 2 de cardamomo agotado de su fracción natural de aceite esencial**

LABORATORIOS TÉCNICOS	 MINISTERIO DE ENERGÍA Y MINAS		PÁGINA 1 DE (1) LAB-REP-0280-2020 ORDEN No. L-0130-2020 GUATEMALA, 26-02-2020
	RESULTADOS DE ANÁLISIS		
MUESTRA: Cascarilla Cardamomo PRESENTADA POR: Osber Carías RESPONSABLE DEL MUESTREO: Osber Carías PROCEDENCIA: Osber Carías. Referencia de la muestra: Agotado 2 LOCALIZACIÓN: Guatemala, Guatemala FECHA DE MUESTREO: 10-02-2020 FECHA DE RECEPCIÓN DE MUESTRA Y PAPELERÍA: 20-02-2020 FECHA DE ANÁLISIS: Del 24 al 26-02-2020 PRECIO DE ANÁLISIS: \$ 20.00 ANALISTA: Jhonatan Ríos			
DESCRIPCIÓN	MÉTODO DE ANÁLISIS	ESPECIFICACIÓN (a)	RESULTADO (b)
PODER CALORÍFICO SUPERIOR, MJ/Kg	ASTM D-240	-----	(c) 13.68
OBSERVACIONES: <p style="margin-left: 40px;"> a) En el Acuerdo Ministerial No. 364-2019 no existen especificaciones para este producto. b) El resultado es válido solo para la cantidad de muestra presentada en este laboratorio. c) El valor de 13.68 MJ/Kg es equivalente a 3288 Kcal/Kg y a 5884 Btu/Lb. </p> <div style="display: flex; justify-content: space-around; align-items: center;"> <div style="text-align: center;">  <p>Ing. <i>[Signature]</i> Villacinda ÁREA DE HIDROCARBUROS</p> </div> <div style="text-align: center;">  <p>Vo. Bo. Inga. <i>[Signature]</i> Mayra Villatoro COORDINADORA LABORATORIOS TÉCNICOS</p> </div> </div> <p style="font-size: small; margin-top: 10px;">Jvg</p> <p style="font-size: x-small; text-align: center;">El presente informe no puede ser modificado ni reproducido sin autorización del Laboratorio Técnico.</p>			

Fuente: elaboración propia, con base en datos experimentales de laboratorios técnicos área de hidrocarburos, Ministerio de Energía y Minas MEM.

Apéndice 10. **Resultado del poder calorífico de la muestra 3 de cardamomo agotado de su fracción natural de aceite esencial**

LABORATORIOS TÉCNICOS	 GOBIERNO de GUATEMALA <small>DR. ALEJANDRO GUANAYTE</small>	MINISTERIO DE ENERGÍA Y MINAS	PÁGINA 1 DE (1)	
			LAB-REP-0287-2020 ORDEN No. L-0130-2020 GUATEMALA, 27-02-2020	
RESULTADOS DE ANÁLISIS				
<p>MUESTRA: Cascarilla Cardamomo PRESENTADA POR: Osber Carías RESPONSABLE DEL MUESTREO: Osber Carías PROCEDENCIA: Osber Carías. Referencia de la muestra: Agotado 3 LOCALIZACIÓN: Guatemala, Guatemala FECHA DE MUESTREO: 10-02-2020 FECHA DE RECEPCIÓN DE MUESTRA Y PAPELERÍA: 20-02-2020 FECHA DE ANÁLISIS: Del 24 al 26-02-2020 PRECIO DE ANÁLISIS: \$ 20.00 ANALISTA: Roderico Zapeta</p>				
DESCRIPCIÓN	MÉTODO DE ANÁLISIS	ESPECIFICACIÓN (a)	RESULTADO (b)	
PODER CALORÍFICO SUPERIOR, MJ/Kg	ASTM D-240	-----	(c) 13.99	
<p>OBSERVACIONES:</p> <p>a) En el Acuerdo Ministerial No. 364-2019 no existen especificaciones para este producto. b) El resultado es válido solo para la cantidad de muestra presentada en este laboratorio. c) El valor de 13.99 MJ/Kg es equivalente a 3341 Kcal/Kg y a 6013 Btu/Lb.</p>				
 Ing. Julio Villacinda ÁREA DE HIDROCARBUROS				
 Vo. Bo. Inga. Mayra Villatoro COORDINADORA LABORATORIOS TÉCNICOS				
 				
<p style="font-size: small;">Jvg</p> <p style="font-size: x-small; text-align: center;">El presente informe no puede ser modificado ni reproducido sin autorización del Laboratorio Técnico.</p>				

Fuente: elaboración propia, con base en datos experimentales de laboratorios técnicos área de hidrocarburos, Ministerio de Energía y Minas MEM.

Apéndice 11. **Sistema para la realización de la pirolisis de la materia prima vegetal de cascarilla de cardamomo con y sin agotar de su fracción natural de aceite esencial**



Fuente: elaboración propia.

Apéndice 12. **Proceso de pirolisis**



Fuente: elaboración propia.

Apéndice 13. **Materia prima vegetal pirolizada**



Fuente: elaboración propia.

Apéndice 14. **Proceso de combustión en mufla a 900 °C**



Fuente: elaboración propia.

Apéndice 15. **Proceso de determinación de cenizas utilizando indicador fenolftaleína**



Fuente: elaboración propia.

