



UNIVERSIDAD INTERNACIONAL SEK

FACULTAD DE CIENCIAS AMBIENTALES

Trabajo de Fin de Carrera Titulado:

**“CARACTERIZACIÓN FÍSICOQUÍMICA DEL CUESCO Y FIBRA
OBTENIDOS DEL PROCESAMIENTO DE PALMA AFRICANA PARA UN
APROVECHAMIENTO EFICIENTE DE LA ENERGÍA TÉRMICA EN
CALDERAS”.**

Realizado por:

WILLIAM ALEXIS PAUCAR CAIZA

Director del proyecto:

Ing. Jefferson Rubio

Como requisito para la obtención del título de:

MAGISTER EN GESTIÓN AMBIENTAL

Quito, 13 de noviembre de 2019

DECLARACION JURAMENTADA

Yo, WILLIAM ALEXIS PAUCAR CAIZA, con cédula de identidad # 1719589929, declaro bajo juramento que el trabajo aquí desarrollado es de mi autoría, que no ha sido previamente presentado para ningún grado a calificación profesional; y, que he consultado las referencias bibliográficas que se incluyen en este documento.

A través de la presente declaración, cedo mis derechos de propiedad intelectual correspondientes a este trabajo, a la UNIVERSIDAD INTERNACIONAL SEK, según lo establecido por la Ley de Propiedad Intelectual, por su reglamento y por la normativa institucional vigente.


1719589929
FIRMA Y CÉDULA

DECLARATORIA

El presente trabajo de investigación titulado:

**“CARACTERIZACIÓN FÍSICOQUÍMICA DEL CUESCO Y FIBRA
OBTENIDOS DEL PROCESAMIENTO DE PALMA AFRICANA PARA UN
APROVECHAMIENTO EFICIENTE DE LA ENERGÍA TÉRMICA EN
CALDERAS”.**

Realizado por:

WILLIAM ALEXIS PAUCAR CAIZA

como Requisito para la Obtención del Título de:

MAGISTER EN GESTIÓN AMBIENTAL

ha sido dirigido por el profesor

JEFFERSON RUBIO

quien considera que constituye un trabajo original de su autor



FIRMA

LOS PROFESORES INFORMANTES

Los Profesores Informantes:

MÓNICA DELGADO

JOHANNA MEDRANO

Después de revisar el trabajo presentado,

lo han calificado como apto para su defensa oral ante

el tribunal examinador


FIRMA


FIRMA

DEDICATORIA

Dedicado a Dios, y a mi familia

AGRADECIMIENTO

A mi Dios, mi familia, amigos, profesores por todo su apoyo en el transcurso de mis estudios.

CARACTERIZACIÓN FÍSICOQUÍMICA DEL CUESCO Y FIBRA OBTENIDOS DEL PROCESAMIENTO DE PALMA AFRICANA PARA UN APROVECHAMIENTO EFICIENTE DE LA ENERGÍA TÉRMICA EN CALDERAS.

Physicochemical characterization of shell and fiber obtained from oil palm processing for an efficient thermal energetic benefit in boilers.

William Paucar

Facultad de Ciencias Ambientales, Universidad Internacional SEK, Campus Miguel de Cervantes, Calle Alberto Einstein s/n y 5ta. Transversal, Quito, Ecuador.
e-mail: williamalexs1990@gmail.com

RESUMEN

En este estudio se realizó la caracterización fisicoquímica del cuesco y fibra obtenidos del procesamiento de palma africana con el fin de determinar las condiciones óptimas para un aprovechamiento eficiente de la energía en el proceso de combustión en calderas. Los residuos de cuesco y fibra se obtuvieron de una empresa palmicultora ubicada en Santo Domingo de los Colorados. Los ensayos se realizaron en los laboratorios de la Facultad de Ciencias Ambientales de la UISEK y en los laboratorios del INER. Se realizaron los siguientes ensayos: contenido de cenizas, humedad, análisis granulométrico, densidad y poder calórico. Al realizar los análisis en el laboratorio, se obtuvieron resultados de humedad, poder calórico, y porcentaje de cenizas dentro del rango necesario para una combustión eficiente. En el análisis granulométrico se determinó la distribución de tamaños del cuesco y se realizaron pruebas de fluidizado en un secador de lecho fluido con el fin de observar el comportamiento de las partículas de cuesco y fibra en la columna de fluidización. Se realizaron pruebas de fluidizado utilizando un porcentaje determinado de cuesco y fibra. En las pruebas de fluidización se observó que no es posible obtener una mezcla homogénea del cuesco y la fibra, como consecuencia la combustión en calderos será menos eficiente.

Palabras Clave:

Palma africana, poder calórico, análisis granulométrico.

ABSTRACT

The scope of this study is the characterization physical and chemical of shell and fiber obtained from oil palm processing to determine optimal conditions for an efficient use of energy in the process of boilers combustion. The biomass of shell and fiber were obtained from a palm grower located at Santo Domingo de los Colorados. Laboratory tests were performed at UISEK and INER. Laboratory tests were: ash content, moisture, granulometric analysis, density, and calorific value. The laboratory studies results determined that moisture, calorific value and ash content accomplished the necessary parameters for an efficient combustion. In the granulometric analysis the sizes distribution were performed, then fluidization tests were carried out in the dry fluidized bed in order to observe the particles behavior of shell and fiber in the expansion chamber. Some fluidized test with a mix of shell and fiber were performed and it was observed that it is not possible to get a homogenous shell and fiber mix, therefore the boilers combustion will be less efficient.

Key words:

Oil palm, calorific value, granulometric analysis.

INTRODUCCIÓN

La biomasa es materia orgánica que se considera como un tipo de energía renovable, ya que su contenido energético proviene de la energía solar absorbida por los vegetales en el proceso de fotosíntesis. La energía que proviene de la biomasa se obtiene mediante el proceso de combustión directa, proceso en el cual se rompen los enlaces de compuestos orgánicos liberándose energía, además se obtienen otros productos como el agua y el dióxido de carbono. Los productos que se obtienen de la combustión de biomasa y se usan para la obtención de energía se conocen como biocombustibles (Romero, 2010).

La palma africana (*Elaeis guineensis*) es uno de los cultivos agroindustriales más grandes en Ecuador, ya que ocupa una gran cantidad de mano de obra en las diferentes fases de campo, productiva y de industrialización. La importancia económica que ha alcanzado este cultivo es gracias a la demanda del mismo a nivel mundial, esto se evidencia en un aumento de las plantaciones en el Ecuador de un 187% entre los años de 1995 y 2005. (ANCUPA, 2011)

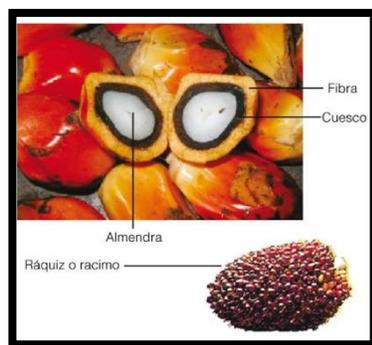


Figura 1. Fruto de palma africana

Fuente: (Cujia et al., 2010)

El aceite de palma africana se obtiene de la parte pulposa de la fruta, para la obtención del aceite de palma se utilizan algunas operaciones de tipo convencional y de su procesamiento se obtienen subproductos como raquis (racimos vacíos), torta de palmiste, cuesco, fibra y

efluentes. Es un gran desafío para esta industria la disposición y aprovechamiento de los subproductos antes mencionados ya que estos pueden ser reaprovechados o desechados, pero antes deben someterse a algún tratamiento previo (Ocampo, 1994).

El cuesco y la fibra de la palma africana son residuos de desecho comunes que se generan como producto de la extracción de aceite, estos residuos son los responsables de la contaminación ambiental, debido al uso de alternativas no eficientes de aprovechamiento en procesamientos industriales (Ortiz, 2008).

Los residuos que se generan en el proceso de extracción de aceite se desechaban en las fuentes hídricas próximas, generando focos de contaminación. Posteriormente, se utilizaron estos residuos como combustible en las calderas con el fin de aprovechar su poder calorífico en la producción de vapor de agua (Ortiz, 2008).

El uso principal de la palma africana es la extracción de aceite, por tal motivo se considera uno de los cultivos más rentables en las regiones tropicales como Ecuador, país que ocupa el segundo lugar a nivel de América en la producción de aceite, ya que aporta el 0,9% en la producción mundial. Su alto rendimiento no depende solamente de la cantidad de aceite que su fruto produce por hectárea sino también de la variedad de productos que se obtienen del mismo y de otras partes de la planta así como de su utilización en las industrias (Mingorance, *et al.*, 2004).

La producción de la palma africana representa el 4% del PIB agrícola del Ecuador. En el periodo de 2010-2016, la producción de palma africana ha crecido en promedio anual el 8%, por tanto se considera el séptimo producto agrícola de exportación del país y además se caracteriza por ser una de las industrias más dinámicas en la producción no petrolera y no tradicional del país. (Ministerio comercio Exterior, 2017)

El proceso de extracción de la palma africana se realiza en forma mecánica. Además

algunos subproductos que se obtienen del procesamiento de la misma como el cuesco y la fibra pueden ser utilizados para producir vapor de agua, mismo que se utiliza para la autogeneración de energía eléctrica y para cocinar la fruta en los esterilizadores de la planta de procesamiento de palma africana (Ministerio comercio Exterior, 2017).

La biomasa permite cubrir necesidades energéticas en forma sostenible, además se caracteriza por su bajo contenido en carbón y su elevado contenido en oxígeno y compuestos volátiles. Cabe recalcar que los compuestos volátiles, con presencia de monóxido de carbono, dióxido de carbono, e hidrógeno, concentran una gran parte del poder calórico que contiene la biomasa. Su poder calórico depende en gran manera del tipo de biomasa utilizada y de su contenido de humedad. Las características antes mencionadas, así como el bajo contenido en azufre, convierten a la biomasa en un producto muy atractivo en términos energéticos (Gómez, 2013).

Es muy importante el aspecto ambiental en el aprovechamiento energético de la biomasa. Se puede afirmar que la biomasa no aumenta el efecto invernadero debido a que el balance de emisiones de dióxido de carbono a la atmósfera es neutro. La cantidad de CO₂ presente en la atmosfera no aumenta debido a que el dióxido de carbono que se genera en la combustión de biomasa se reabsorbe mediante el proceso de fotosíntesis (Gómez, 2013).

El cuesco de palma africana puede ser usado como combustible alternativo tanto para uso industrial como para uso comercial, además es un buen sustituto del diésel y GLP. El uso de cuesco de palma africana como alternativa para producir energía térmica puede generar importantes ahorros, además la inversión en la implementación de la infraestructura asociada al proceso de producción de la misma puede recuperarse entre 4,3 y 3,8 años. Por otro lado, la legislación del Ecuador brinda incentivos tributarios al uso de energías renovables (Heredia, 2017).

Por otro lado, los análisis experimentales del proceso de combustión de biomasa, específicamente del cuesco de palma africana muestran que las temperaturas alcanzadas son muy similares a los valores que se reportan en la literatura de combustión de biomasa. Sin embargo, se debe tomar en cuenta que la operación en condiciones de altura (2634 msnm) necesita un exceso de aire que se encuentre por encima de los valores comunes utilizados a condiciones normales. Durante el proceso de combustión se generan cantidades de ceniza, las cuales requieren de tratamientos y estudios a profundidad (Heredia, 2017).

Las fibras obtenidas del aceite de palma africana son utilizadas en calderas para obtener energía y para su uso posterior en las plantas de operación. La fibra del mesocarpio que se obtiene del fruto es una especie de biomasa lignocelulósica y fibrosa, la misma que queda en la torta de prensado de los frutos de la palma africana, además las fibras que han sido separadas de las nueces todavía contienen aceite residual, por tanto deben ser tratadas en lo posterior (Van Dam, 2016).

Actualmente la fibra se quema en calderas de vapor sin un tratamiento previo, por lo tanto se debe considerar que sin un tratamiento previo la combustión de la fibra no es una buena alternativa para obtener energía, como consecuencia hay un gran interés por métodos rentables de refinamiento y compactación de la misma con el fin de aprovechar al máximo su energía (Van Dam, 2016).

Combustión de Biomasa

La combustión de biomasa es un proceso complejo de reacciones homogéneas y heterogéneas consecutivas que depende de varios factores, entre ellos: la naturaleza, la forma y el tamaño de partícula, tiempo utilizado para cada reacción, y las condiciones de quemado. Por todo lo descrito anteriormente es necesario mejorar la eficiencia de combustión de biomasa para

generar calor; por lo tanto, es importante que se optimice el sistema, se de mantenimiento a los equipos y se ajuste correctamente la relación combustible/aire, la relación de H/C y la relación O/C (Cutimbo, 2017).

La combustión de biomasa, como ya se mencionó anteriormente, comprende de una serie de reacciones químicas en las que el carbón se oxida a dióxido de carbono y el hidrógeno es oxidado a agua (Demirbas, 2005). La quema de la biomasa necesita de un agente oxidante, el agente más utilizado por su abundancia y costo nulo es el oxígeno del aire. Uno de los parámetros principales que se busca controlar en la combustión es el exceso de aire, el cual describe la tasa de aire en exceso requerido por la cantidad estequiométrica, esta se expresa en términos de aire estequiométrico como el exceso de aire porcentual o aire teórico porcentual (Cengel & Boles, 2011).

Poder Calórico

La energía disponible en la biomasa se cuantifica por el contenido calórico por unidad de masa. Todo residuo que posea un poder calórico mayor a 3200 kcal/kg puede ser considerado y estudiado como fuente energética, por esta razón se estudia el poder calórico superior (PCS) de cualquier residuo como valor básico referencial (Martínez, 2015).

- *Poder calorífico superior PCS*, también es conocido como calor de combustión superior y es el calor que se desprende por cada kilogramo de biomasa. Para cuantificarlo, se utiliza una bomba calorimétrica tomando en cuenta que la combustión se realiza a volumen constante. Su valor depende del porcentaje de humedad que contenga la muestra (Martínez, 2015).
- *Poder calorífico inferior PCI*, es el calor que se desprende por un kilogramo de biomasa cuando se genera combustión en la que el agua del combustible es liberada en forma de

vapor. Para el cálculo del poder calórico inferior se debe utilizar la ecuación planteada por el Dr. Kunitoshi Sakurai en el año 2010 en su texto Método sencillo del análisis de residuos sólidos. Es muy importante mencionar que para obtener el PCS se debe condensar el agua obtenida en la combustión recuperando así el calor que se genera en todo el proceso (Martínez, 2015).

Contenido de cenizas

La ceniza está compuesta principalmente por CaO y SiO₂ y una cantidad mínima de K, P, Mg y Al. Como resultado de procesos de evaporación, segregación, precipitación, coalescencia y nucleación durante la combustión, se producen cambios físicos y químicos resultando cantidades de cenizas de varias formas, tamaños y diferente composición, además todos los cambios antes mencionados dependen de algunos factores entre ellos: la composición química y la morfología del combustible. El contenido de cenizas es un parámetro importante que se debe tomar en cuenta en el diseño de la cámara de combustión ya que las cenizas son las causantes de los efectos corrosivos en calderas (Barrera *et al.*, 2018).

Problemas asociados a cenizas

Los problemas producidos por la ceniza en sistemas de combustión de biomasa se relacionan principalmente con el manejo y uso de las cenizas en los equipos de biomasa, con la corrosión y erosión acelerada del metal del lado de los gases. El impacto que tiene el contenido de cenizas en el rendimiento de la planta depende de las características del combustible (principalmente el contenido de ceniza y su composición química) y del diseño y operación de los equipos de combustión (Melissari, 2012).

Fenómeno de fluidización

La fluidización es el fenómeno por el cual un lecho de partículas sólidas se suspenden dentro de un gas o un líquido, adquiriendo un comportamiento semejante al de un fluido (Barreira, 2007).

Los lechos fluidizados, en los cuales existe un contacto gas-sólido, son muy importantes a nivel industrial ya que se usan en operaciones de secado y granulado o en la producción de energía. Estas operaciones son de mucha importancia no solo a nivel internacional sino también a nivel nacional. Un ejemplo de lo antes mencionado es la generación de energía en las plantas de procesamiento de palma africana en el Ecuador (García, 2014).

Los factores que afectan la fluidización son:

-La densidad de las partículas, es decir a medida que aumenta la densidad, mayor será el peso de las partículas, como consecuencia resultará más complejo mantenerlas suspendidas dentro del fluido.

-El diámetro de las partículas es un factor importante en la capacidad de fluidización ya que afecta directamente a los regímenes de fluidización que adoptará el lecho.

- La conductividad del gas y la capacidad térmica, influirán en los procesos en los que el gas sea incompresible o incluya transferencia de calor (García, 2014).

Calderas de biomasa

La combustión de lecho fijo se utiliza en hornos con parrillas y alimentadores (stokers). La biomasa ingresa sobre una parrilla y esta se mueve lentamente a través de la caldera, el aire necesario se envía desde la parte inferior a través de los orificios de la parrilla. En el proceso de combustión existe emisión de gases combustibles, los mismos que se queman después de la adición del aire secundario, esto se genera en una zona de combustión que se encuentra separada de la cama de combustible (Barrera *et al*, 2018).

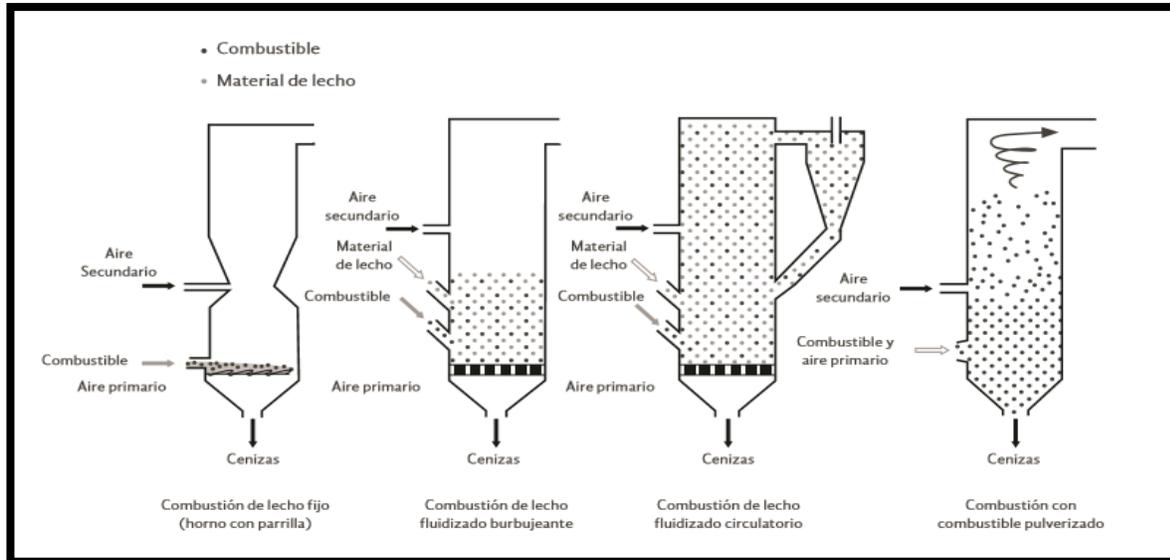


Figura 2. Tecnologías principales de combustión

Fuente: (Barrera *et al.*, 2018)

Como ya se ha mencionado, la combustión de biomasa libera energía en forma de calor liberándose productos como dióxido de carbono y agua, además se liberan sales minerales y se generan emisiones muy pequeñas de óxidos de azufre y nitrógeno, monóxido de carbono, partículas de carbono y otros productos orgánicos (hidrocarburos) resultantes de la combustión incompleta de la biomasa, denominados en forma genérica como "inquemados". Las sales minerales y los productos inquemados en bajas cantidades se constituyen en las cenizas del proceso, las cuales bajo ciertas condiciones, pueden ser utilizadas en los suelos como fertilizantes. El resto de los productos secundarios que han sido mencionados anteriormente, son las emisiones gaseosas del proceso, las mismas deben ser minimizadas necesariamente con el objetivo de disminuir el impacto ambiental producido en todo este proceso (Toscano, 2009).

Una combustión eficiente de biomasa depende en general de varios parámetros como: las características de la biomasa, el tipo de tecnología, la mezcla del combustible con el oxígeno, entre otras (Toscano, 2009). Existe una combustión ineficiente de biomasa en calderos, debido a que los parámetros antes mencionados no son controlados de forma adecuada (Cutimbo, 2017).

Esto conlleva a que se produzcan óxidos de nitrógeno y de azufre, monóxido de carbono, partículas de carbono y otros productos orgánicos (hidrocarburos) (Carrasco, 2008). Este estudio se enfocó en las características físicas (distribución granulométrica, densidad, humedad) y químicas (poder calórico, contenido de cenizas) del cuesco y la fibra y en el análisis de las propiedades de la mezcla de los dos combustibles antes mencionados con el fin de obtener un aprovechamiento eficiente de la energía.

MATERIALES Y MÉTODOS

La caracterización de la biomasa es muy importante ya que se puede prever el comportamiento de la misma en las diferentes fases involucradas en su uso como fuente de energía (obtención, transporte y conversión energética). Las propiedades de la biomasa que fueron estudiadas son: físicas y químicas (Gaona, 2014).

La caracterización física y química del cuesco y fibra se realizó en los laboratorios de la UISEK y en el laboratorio de biomasa del INER. Las pruebas de fluidización se realizaron a condiciones ideales, es decir a presión y temperatura constantes, esto debido a las limitaciones del secador de lecho fluido.

Caracterización Física del cuesco y la fibra

Humedad

Es la cantidad de agua total que contiene la masa de una muestra de biomasa, es decir, es el contenido de agua por kilogramo de materia seca (Gaona, 2014). Para determinar la humedad de los residuos de biomasa (cuesco y fibra) se utilizó la Norma TAPPI-T-412m. Se utilizó la siguiente ecuación para calcular la humedad:

$$\%H = \frac{M_o - M_f}{M_o} * 100$$

Donde:

Mo: Masa inicial (g)

Mf: Masa final (g)

Para determinar la dispersión de datos respecto a la media se utilizó la siguiente fórmula para calcular la desviación estándar

Desviación estándar

$$DE = \sqrt{\frac{\sum |x - u|^2}{N}}$$

Donde:

x: muestras de análisis

u: media

N: número de muestras

Distribución de tamaños

Granulometría: Sirve para determinar la distribución por tamaños de las partículas de un árido.

Se utilizan cedazos o tamices con el fin de conocer la distribución de tamaños de las partículas de una muestra de árido (García, 2009). Para la caracterización física se realizó el análisis granulométrico utilizando una muestra considerable equivalente a 1300g y un sistema de tamices manual Soiltest INC., y se procedió a realizar el tamizado manual para obtener diferentes tamaños de cuesco en cada tamiz. Las dimensiones aproximadas de las partículas de cuesco (longitud) se midieron utilizando el calibrador Vernier.

Cálculo de la densidad real y aparente del cuesco

Densidad real

Es la medida del cambio de volumen provocado por el desplazamiento de un fluido por un peso conocido de granos (Levenspiel, 1993).

$$\rho_r = \frac{m_r}{V_r}$$

Para el cálculo de la densidad real del cuesco se utilizó el principio de Arquímedes (Hewitt,2009)

Densidad aparente

Es la medida del volumen que ocupa un peso conocido de partículas.

$$\rho_a = \frac{m_a}{V_a}$$

Para el cálculo de la densidad aparente se utilizó el método de la probeta.

Caracterización Química del cuesco y la fibra

Contenido de cenizas

El contenido de cenizas nos brinda información acerca de la cantidad de materia sólida no combustible por kilogramo de material. Las cenizas son un tipo de residuo inorgánico que queda después de la combustión del carbón fijo (Gaona, 2014).

La determinación del contenido de cenizas se realizó con base en el método de ensayo BS EN 14775:2009, que corresponde a la Norma para la determinación del contenido de cenizas de biocombustibles sólidos.

Ecuación para el cálculo del contenido de cenizas

$$CZ = \left[\frac{(m_3 - m_1)}{(m_2 - m_1)} * 100 \right] * \left(\frac{100}{100 - H} \right)$$

Donde:

m1: masa del crisol vacío y limpio

m2: masa en gramos del crisol y la muestra antes del ensayo

m3: masa en gramos del crisol y la muestra después del ensayo

H: contenido de cenizas

Poder Calórico

El poder calórico de un combustible es el calor que se desprende por unidad de masa de combustible en un proceso de combustión completa. El poder calorífico de un combustible es una indicación de la energía químicamente combinada en el combustible referente a un ambiente estandarizado. La estandarización implica la temperatura, el estado del agua (vapor o líquido), y los productos de la combustión (CO₂, H₂O, etc.) (Toscano,2009).

Los ensayos para obtener el poder calórico del cuesco y la fibra se realizaron en el laboratorio de Biomasa del INER (ver anexo A).

Pruebas de fluidizado en el secador de lecho fluido.

Posteriormente se procedió a realizar las pruebas de fluidización en el secador de lecho fluido que se encuentra en el laboratorio de Química de la UISEK. El secador fue diseñado y construido por estudiantes de pregrado de la Facultad de Ciencias Ambientales de la UISEK. Se utilizó un secador con características básicas (ver anexo B-1).

El secador de lecho fluido se constituye de las siguientes partes:

- Estructura de soporte
- Sistema de calentamiento de aire
- Ventilador centrífugo (Blower)
- Cámara de calentamiento
- Distribuidor de aire y cámara de secado

Cálculo de la velocidad de flujo

Ecuación de continuidad

$$Q_1 = Q_2$$
$$A_1V_1 = A_2V_2$$

Donde:

A₁=Área transversal en el punto 1

A₂=Área transversal en el punto2

V₁=Velocidad en el punto 1

V₂=velocidad en el punto 2

Cálculo de caída de presión en la columna de aire

$$\Delta P = \delta g \Delta h$$

ΔP = caída de presión

g= gravedad

Δh =altura

RESULTADOS

Se realizaron ensayos por triplicado del cuesco y de la fibra. Los resultados se presentan a continuación:

Tabla 1. Cálculos de humedad del cuesco

Muestra	Cápsula vacía (g)	Muestra húmeda (g)	Cápsula+muestra seca(g)	%Humedad	Desviación	Valor absoluto	Valor absoluto^2	
M1	83,50	100,080	163,890	19,674	0,0528	0,05	0,0028	
M2	97,8700	100,040	178,310	19,592	-0,0293	0,03	0,0009	
M3	80,0200	100,010	160,430	19,598	-0,0234	0,02	0,0005	
			PROMEDIO	19,621		SUMA	0,00419	
							DESVIACIÓN ESTANDAR	0,0374

Tabla 2. Humedad del cuesco con su valor referencial

Residuo	Humedad (%)
Cuesco	19,621
Cuesco valor de referencia	12,00

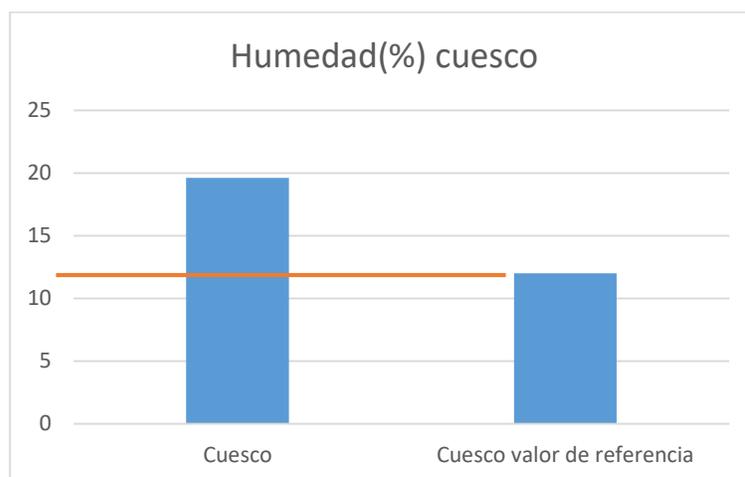


Figura 4. Representación gráfica de humedad del cuesco.

Tabla 3. Cálculos de humedad de la fibra

Muestra	Cápsula vacía (g)	Muestra húmeda (g)	Cápsula+muestra seca(g)	%Humedad	Desviación	Valor absoluto	Valor absoluto^2	
M1	102,7800	30,0400	121,5600	37,48335553	-0,43	0,43	0,18	
M2	104,0500	30,0600	122,5600	38,42315369	0,51	0,51	0,26	
M3	98,2900	30,0800	116,9900	37,83244681	-0,08	0,08	0,01	
PROMEDIO				37,913		SUMA	0,45	
							DESVIACIÓN ESTANDAR	0,389

Tabla 4. Humedad de la fibra con su valor referencial.

Residuo	Humedad (%)
Fibra	37,913
Fibra valor de referencia	37,09

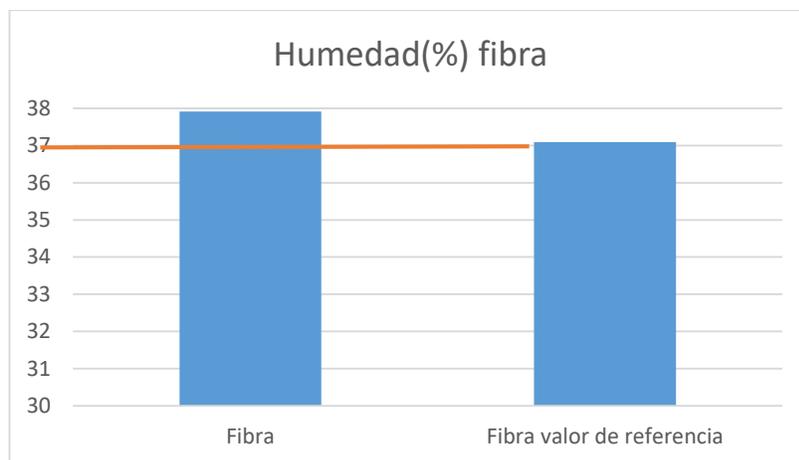


Figura 5. Humedad de la fibra

Análisis granulométrico

Se realizó el proceso de tamizado y se procedió a medir la masa de la muestra que quedó retenida en cada tamiz (ver anexo C), los resultados obtenidos se presentan en el siguiente cuadro:

Tabla 5. Resultados del proceso de tamizado

PESO ORIGINAL(g)	1300,00				
Malla #(in)	Abertura tamiz (mm)	Peso retenido(g)	% parcial retenido	%retenido acumulado	% que pasa
¾	19,00	158,31	12,18	12,18	87,82
½	12,50	156,76	12,06	24,24	75,76
3/8	9,50	780,21	60,02	84,25	15,75
¼	6,35	40,06	3,08	87,33	12,67
4	4,75	36,70	2,82	90,16	9,84
10	2,00	38,27	2,94	93,10	6,90
80	0,14	50,31	3,87	96,97	3,03
100	0,074	38,07	2,93	99,90	0,10
SUMATORIA		1298,70	99,89		

Al realizar la sumatoria del peso retenido en cada tamiz, al final tuvimos un error de 0,1 % que se considera como un valor bajo, el error que existe es debido a pérdidas de los residuos en el proceso del tamizado.

El largo y diámetro equivalentes de las diferentes muestras de cuesco retenidas en el sistema de tamices.

Tabla 6. Resultados de la medición del tamaño del cuesco

MUESTRAS	LARGO eq(mm)	DIAMETRO eq (mm)
M1	20,80	13,2
M2	17,88	8,88
M3	10,42	4,3
M4	8,80	4,85
M5	5,11	3,3
M6	3,54	3,12
M7	0,22	0,312
M8	-	-

La muestra M3 retenida en la malla de 3/8” es la que predomina en la muestra seleccionada inicialmente para el análisis.

A continuación, se presentan las muestras de cuesco y sus diferentes tamaños

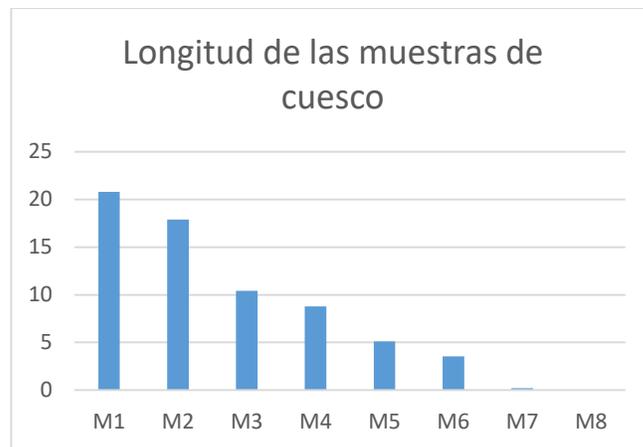


Figura 6. Longitud de cada muestra de cuesco

Densidad real y aparente

Para obtener los valores de las densidades del cuesco y la fibra se realizaron ensayos por triplicado en el laboratorio de Química de la UISEK.

Tabla 7. Cálculos de la densidad real y aparente del cuesco.

Muestra	Mprobeta (g)	Mmuestra (g)	Vagua (ml)	Vprob+muestra	Vprob+agua+muestra(ml)	Densidad real	Densidad aparente
m1	128,894	29,716	60	158,61	81	1,4150476	0,4952666
m2	134,46	23,558	50	158,085	67	1,3857647	0,4725000
m3	134,697	36,557	70	171,255	97	1,3539629	0,5222571
Promedio						1,385	0,497

A continuación, se presentan los valores de la densidad real y aparente del cuesco, dando como resultado la densidad real del cuesco el valor promedio de 1,385g/cc y el valor promedio de la densidad aparente 0,497g/cc



Figura 7. Densidad real del cuesco

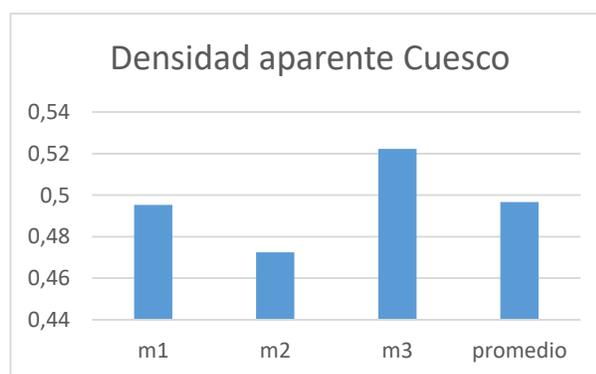


Figura 8. Densidad aparente del cuesco

Tabla 8. Cálculos de la densidad aparente de la fibra.

Muestra	masa	Volumen	Densidad aparente	Desviación	Valor absoluto	Valor absoluto^2	
m1	8,14	100	0,0814	0,0101	0,0101	0,00010	
m2	10,36	150	0,0690	-0,0022	0,0022	0,00001	
m3	12,69	200	0,0634	-0,0079	0,0079	0,00006	
Promedio			0,0713		SUMA	0,00017	
						DESVIACIÓN ESTANDAR	0,0075

El valor promedio de la densidad de la fibra dio como resultado 0,0713 g/cc.

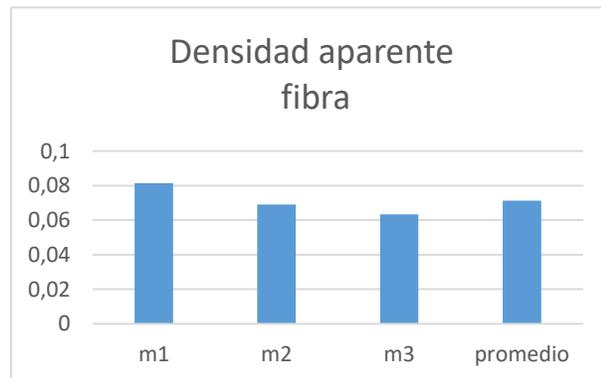


Figura 9. Densidad aparente de la fibra

Contenido de cenizas

Al medir el contenido de cenizas se obtuvieron los siguientes resultados:

Tabla 9. Cálculos del contenido de cenizas del cuesco

Muestra	m1	m2	m3	H:humedad	Contenido cenizas	Desviación	Valor absoluto	Valor absoluto^2	
1	52,618	53,62	52,663	19,674	5,591	-0,191	0,19071493	0,036372185	
2	57,552	58,597	57,601	19,592	5,832	0,050	0,04979925	0,002479965	
3	55,386	56,394	55,434	19,598	5,923	0,141	0,14091568	0,01985723	
				PROMEDIO	5,782		SUMA	0,05870938	
								DESVIACION ESTÁNDAR	0,140

Tabla 10. Contenido de cenizas del cuesco con su valor de referencia.

Residuo	Cenizas(%)
Cuesco	5,782
Cuesco valor de referencia	3

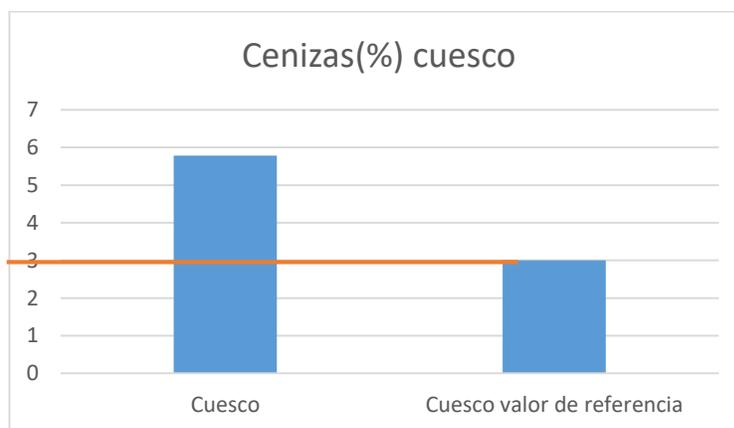


Figura 10. Contenido de cenizas del cuesco

Tabla 11. Cálculos del contenido de cenizas de la fibra.

Muestra	m1	m2	m3	H:humedad	Contenido de cenizas	Desviación	Valor absoluto	Valor absoluto^2	
1	52,607	53,666	52,667	37,483	9,063	-0,823	0,677	0,458	
2	57,522	58,537	57,589	38,423	10,720	0,834	0,696	0,485	
3	55,38	56,389	55,432	47,806	9,874	-0,012	0,000	0,000	
				PROMEDIO	9,886		SUMA	0,943	
								DESVIACION ESTÁNDAR	0,561

Tabla 12. Contenido de cenizas de la fibra con su valor de referencia

Residuo	Cenizas(%)
Fibra	9,886
Fibra valor de referencia	6,1

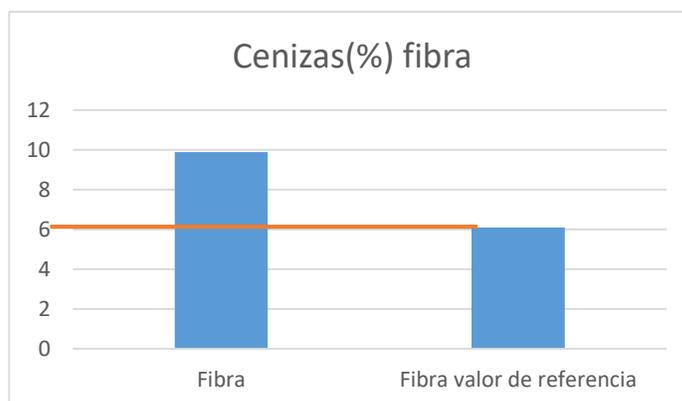


Figura 11. Contenido de cenizas de la fibra

Poder calórico

Después de realizar los ensayos por triplicado del poder calórico superior del cuesco y la fibra en los laboratorios de INER se obtuvieron los siguientes resultados:

Tabla 13. Capacidad calórica del cuesco y la fibra.

Muestra	Cuesco PCS(MJ/kg)	Fibra PCS(MJ/kg)
M1	20,22	19,84
M2	20,24	19,65
M3	20,23	19,71
Promedio	20,23	19,73

Fuente: INER

Tabla 14. Capacidad calórica del cuesco y su valor de referencia.

Residuo	PCS(MJ/kg)
Cuesco	20,23
valor de referencia cuesco	20,09

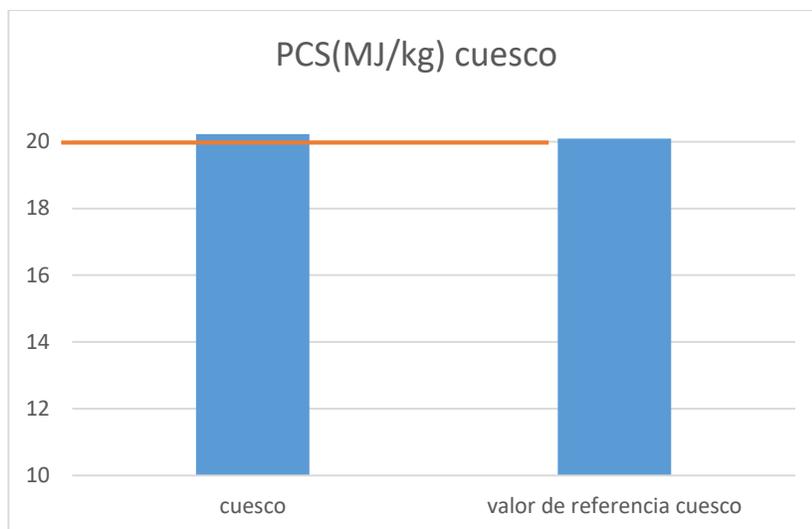


Figura 12. Poder calórico superior del cuesco

Tabla 15. Capacidad calórica de la fibra y su valor de referencia.

Residuo	PCS(MJ/kg)
Fibra	19,06
valor de referencia fibra	19,73

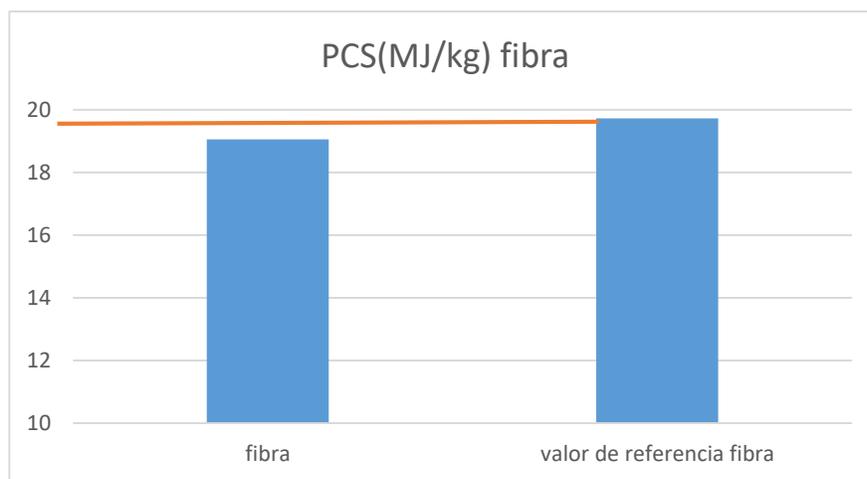


Figura 13. Poder calórico superior de la fibra

Pruebas de fluidización en el secador de lecho fluido

Las pruebas de fluidización se realizaron a condiciones de laboratorio, es decir a presión

constante y temperatura constante. Debido a las limitaciones del equipo los cálculos serán ideales y el análisis del comportamiento del cuesco y fibra será en forma visual.

Cálculo de la velocidad de flujo

Datos:

Densidad del aire (δ)=1,225kg/m³

$\Delta h = 1m$

$g = 10 m/s^2$

$D_1 = 0,0762m$

$V_1 = 54 m/s$

Cálculos:

1-2 (Blower-distribuidor de aire)

Para determinar la velocidad de flujo se utilizó la ecuación de continuidad

$$V_2 = 7,839 \frac{m}{s}$$

Para la caída de presión en la columna de fluidización se utilizará la expresión de la presión en función de la densidad y de la altura.

Para el cálculo de la caída de presión se utilizó la ecuación de la presión en función de su densidad y altura.

$$\Delta P = 12,25 \text{ Pa}$$

Para el cálculo del caudal de flujo de aire se utilizó la ecuación del caudal en función del área y la velocidad.

$$Q = \frac{\pi(0.0762m)^2}{4} * \left(\frac{54m}{s}\right) = 0,25 \frac{m^3}{s}$$

El caudal de flujo de aire fue de $0,25 \frac{m^3}{s}$ la velocidad de flujo de 7,839 m/s y la caída de

presión de 12,25 Pa a una temperatura máxima de 350°C

En las pruebas de fluidizado se pudo observar que a medida que iba disminuyendo el diámetro de cada muestra, esta alcanzaba una altura mayor y una distribución de partículas más uniforme, además se determinó la altura que llega cada muestra y se obtuvieron los siguientes resultados (ver anexo D).

Tabla 16. Altura alcanzada con cada muestra de cuesco en la columna de fluidizado.

Muestras de cuesco	Altura (cm)
M1	19
M2	26,5
M3	33
M4	36
M5	54
M6	61
M7	77
M8	100

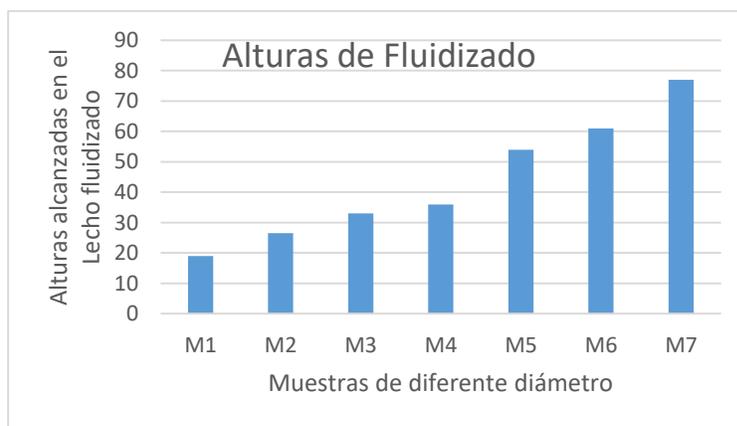


Figura 14. Alturas alcanzadas por cada muestra de cuesco

Tabla 17. Altura alcanzada de la muestra de fibra en la columna de fluidizado.

Muestra	Altura (cm)
Mfibra	102

Tabla 18. Valores de altura promedio alcanzados por el cuesco y la fibra

Residuos	Altura Promedio(cm)
CUESCO	43,786
FIBRA	102

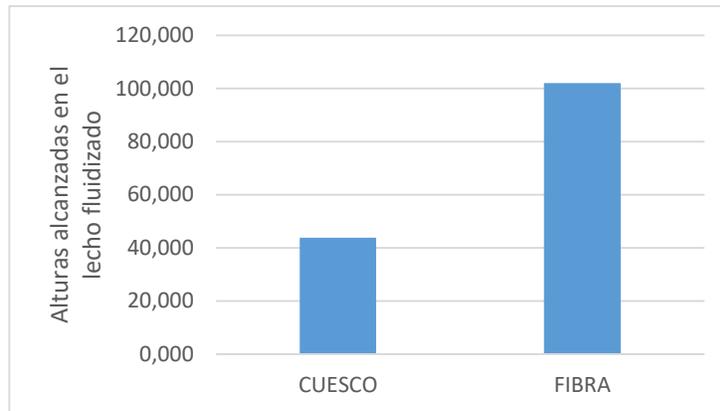


Figura 15. Alturas promedio alcanzadas por el cuesco y fibra respectivamente.

Análisis de mezcla cuesco-fibra/oxígeno

Es importante que el aire de combustión sea suficiente y se encuentre bien distribuido. Si la cantidad de aire en la cámara de combustión es muy superior a la cantidad de aire que el combustible necesita, se produce un enfriamiento de la cámara de combustión, mismo que se compensa con un aumento adicional de combustible. El aire de combustión que ingrese a la cámara de combustión debe estar distribuido, de tal manera que se garantice que todas las partículas de combustible se encuentren “rodeadas”, en todo momento, de oxígeno comburente con el fin de completar el proceso de combustión. Esto se logra mediante una elevada turbulencia en la cámara de combustión y optimizando la distribución de aire de combustión a través de toberas de inyección dirigidas a las zonas con presencia de combustible y llama (Cigalat, 2012). Se realizó la mezcla de cuesco y fibra con la cantidad de 70% cuesco y 30% fibra que es el óptimo que se utiliza en la palmicultora.

Masa total(cuesco y fibra)=280g

Masa de la fibra (30%)=84g

Masa del cuesco (70%)196g

Se realizaron pruebas con el fin de observar el comportamiento del cuesco y la fibra en la columna de fluidización del secador de lecho fluido (ver anexo E). La mezcla de cuesco y fibra alcanzo una altura aproximada de 56 cm.

Discusión de Resultados

Para la comparación de resultados del análisis fisicoquímico del cuesco y la fibra, se tomará como referencia los estudios realizados por Loh (2016). “*The potential of the Malaysian oil palm biomass as a renewable energy source. Energy Conversion and Management*”. Los resultados obtenidos por Loh (2016) se presentan a continuación:

Tabla 19. Propiedades de combustión para biomasa de palma de aceite

Biomasa	Contenido de humedad(%b.s.)	Contenido de cenizas(%b.s.)	Contenido de materia volátil(%b.s.)	Poder calorífico superior (MJkg ⁻¹)
Tusa	67.00±1.41	4.60±0.50	87.04±0.42	18.88±0.74
Fibra	37.09±2.06	6.10±0.94	84.91±0.62	19.06±0.32
Cuesco	12.00± 1.08	3.00±1.27	83.45±0.68	20.09±0.43

(b.s.)En base seca. Fuente: adaptado de Loh(2016)

En este estudio se realizaron ensayos de laboratorio para corroborar o contrastar los resultados obtenidos por Loh (2016), el objetivo fue determinar si los valores obtenidos experimentalmente están dentro del rango necesario para una combustión eficiente.

Los valores obtenidos experimentalmente del porcentaje de cenizas 5,782% para el cuesco y 9,886% para la fibra son muy similares a los valores obtenidos por Loh (2016) los cuales son: contenido de cenizas del cuesco 3% y 6,10% para la fibra. Los valores obtenidos en este estudio son bajos tal como lo afirma Gaona (2014) en sus estudios referentes a la mezcla del cuesco y

raquis como combustible alternativo para generación de energía eléctrica, en los cuales se encontró que el contenido de cenizas de la biomasa en calderas debe ser bajo debido a que un alto contenido de cenizas disminuye el contenido calórico del combustible, como consecuencia disminuye el rendimiento térmico de la caldera ya que se reduce la temperatura de combustión cuando la ceniza absorbe calor e interfiere entre el contacto del combustible y comburente. Los valores obtenidos experimentalmente del poder calórico superior 20,23MJ/kg para el cuesco y 19,73 MJ/kg para la fibra, son valores altos y muy similares a los que se muestran en los estudios de Loh (2016), los cuales son: 20,09MJ/kg para el cuesco y 19,06MJ/kg para la fibra. Por otro lado, el valor del contenido de humedad del cuesco cuyo valor es 19,621% , contrasta con el valor obtenido por Loh (2016) cuyo valor para el cuesco es 12%, dando una diferencia relativamente amplia entre el valor calculado y el valor referencial, sin embargo los valores de humedad obtenidos en este estudio están dentro de los parámetros de humedad óptimos para la combustión de biomasa en calderos, tal como se afirma en otro estudio de Loh (2016) referente a los biocombustibles de segunda generación de la biomasa de palma de aceite, el cual menciona que la humedad es un factor muy importante en la combustión de la biomasa cuyo valor debe ser menor al 40%. Además, Martínez (2015) en su estudio, diferencia entre poder calorífico inferior y superior de la biomasa, afirma que un elevado porcentaje de humedad minimiza la eficiencia en la combustión, esto debido a que el calor liberado es usado para la evaporación del agua y no es aprovechado para reducir químicamente el material en cuestión.

La densidad aparente del cuesco es 0,497g/cc y de la fibra es 0,0713 g/cc, estos valores son bajos, por lo tanto según el FOCER(Fortalecimiento de la Capacidad en Energía Renovable para Centroamérica), en sus estudios mostrados en el manual de energía renovable (Biomasa) afirma que los materiales que presentan una densidad aparente baja necesitan mayor volumen de almacenamiento y transporte, además algunas veces presentan problemas para fluir por

gravedad, lo cual complica el proceso de combustión y eleva los costos del proceso.

En lo que se refiere al análisis granulométrico, se determinó que existe mayor peso de cuesco retenido en el tamiz de 3/8" (Muestra M3), esto quiere decir que el tamaño de esta muestra incidirá mayormente en las pruebas de fluidización realizadas en los laboratorios de la UISEK, así como también en el proceso de combustión, esto se respalda en los estudios realizados por Gaona (2014), en los cuales se menciona que el tamaño de la partícula afecta la combustión de la biomasa, por tanto es muy importante reducir el tamaño de partícula para aumentar la superficie útil sobre la que se puedan dar las reacciones de oxidación.

No se pudo determinar un tamaño óptimo de partícula ya que esto depende de varios factores, entre ellos el tipo de tecnología de combustión que se vaya a utilizar. El diámetro del cuesco no afecta de manera considerable a su fluidización ya que existe una cantidad muy pequeña de cuesco con diámetro considerable, por lo tanto lo que se menciona por García (2014) "el diámetro es un factor determinante en la capacidad de fluidización e influye directamente en los regímenes que adoptará el lecho fluidizado", no aplica a nuestro estudio.

Al realizar las pruebas de fluidizado en el secador de lecho fluido, no se logró que el contacto entre el aire caliente y el combustible sea adecuado, es decir que todas las partículas estén rodeadas por aire caliente, ya que se detectaron masas de fibra que aparecían en la columna de aire originando que no todas las partículas estén en contacto con el aire caliente, esto genera un bajo aprovechamiento energético, tal como se menciona en los estudios de (Cigala, 2012) en su estudio, Factores que afectan al rendimiento de una caldera de combustión de Biomasa.

Conclusiones

-Los valores obtenidos en la caracterización química del cuesco y la fibra para determinar su

potencial energético, se encuentran dentro de los rangos reportados como óptimos para una combustión más eficiente en calderas de biomasa.

- Los valores obtenidos de la caracterización física del cuesco y la fibra permitieron determinar las condiciones necesarias para una combustión más eficiente en calderas de biomasa.

-Al realizar las pruebas de fluidizado no se logró obtener una mezcla uniforme del cuesco y la fibra, esto hace que el contacto entre el aire caliente y el combustible no sea adecuado y por tanto no se genere una combustión eficiente.

BIBLIOGRAFÍA

1. ANCUPA (2011). Asociación Nacional de Cultivadores de Palma Africana.
Estadísticas de la producción de palma africana en el Ecuador, <http://www.ancupa.com>.
2. Ocampo, A. (1994). La palma aceitera africana, un recurso de alto potencial para la producción animal en el trópico.
3. Ortiz, J. (2008). Aprovechamiento de los residuos de Palma Africana.
4. Informe sobre el sector palmicultor ecuatoriano. (mayo 2017)
<https://www.comercioexterior.gob.ec/wpcontent/uploads/2017/09/informe-palma-esp%C3%B1ol.pdf>
5. Cutimbo, M. (2017). Estudio exploratorio del proceso de co-combustión de carbón y biomasa mediante análisis termogravimétrico para su aprovechamiento en la generación de calor.
6. Martínez, L. Termodinámica básica y aplicada. Recuperado de
<http://websserver.dmt.upm.es/~isidoro/bk3/c15/Combustion.%20Caracteristicas.pdf>
7. Van Dam, J. (2016). Subproductos de la palma de aceite como materias primas de biomasa.

8. García, V. (2014). Caracterización de la transferencia de calor pared de lecho y análisis del efecto de la compresibilidad del gas en un lecho fluidizado mediante simulación CFD.
9. Heredia, M. (2017). Cuesco de palma africana, un nuevo combustible para uso comercial en Ecuador: análisis económico y evidencia experimental.
10. Romero, A. (2010). Aprovechamiento de la biomasa como fuente de energía alternativa a los combustibles fósiles.
11. Melissari, B. (2012). Comportamiento de Cenizas y su Impacto en Sistemas de Combustión de Biomasa.
12. Gaona, D. (2014). Mezcla de cascarilla de nuez de palmiste y raquis como combustible alternativo para generación eléctrica.
13. García, Saval, J., Baeza, F., Tenza, A. (2009). Determinación de la granulometría de un árido.
14. Levenspiel, O. (1993). Flujo de Fluidos e intercambio de Calor.
15. Toscano, L. (2009). Análisis de los parámetros y Selección de hornos para la combustión de biomasa.
16. Barreira, V. (2007). Estudio Hidrodinámico de un Lecho Fluidizado.
17. Cengel, Y., Boles, M. (2011). Termodinámica. Ciudad de México.
18. Demirbas, A. (2005). Potential applications of renewable energy sources, biomass combustion problems in boiler power systems and combustion related environmental issues. *Progress in Energy and Combustion Science*, 31(2), 171-192.
doi:10.1016/j.peccs.2005.02.002.
19. Barrera, J., Ramírez, M., García, J. (2018). Combustión de biomasa: conceptos, tecnologías y aplicaciones en la agroindustria de la palma de aceite.
20. Loh, S. K. (2016). The potential of the Malaysian oil palm biomass as a renewable

energy source. *Energ. Conversion and Management*, 141, 285-298.

doi:10.1016/j.enconman.2016.08.08.

21. Cigalat, E.(2012).Factores que afectan al rendimiento de una calera de combustión de biomasa.
22. Loh, S. K. (2016). Biocombustibles de segunda generación de la biomasa de palma de aceite.
23. Cujia,G., Bula,A(2010). Potencial obtención de gas de síntesis para la producción de etanol a partir de la gasificación de residuos de palma africana. Recuperado de https://www.researchgate.net/publication/286888240_Syngas_for_methanol_production_from_gasification_of_palm_residual
24. Estructplan (2011). Partes Principales Que Componen Una Caldera. Recuperado de <https://estructplan.com.ar/producciones/contenido-tecnico/p-seguridad-industrial/partes-principales-que-componen-una-caldera/>
25. Hewitt, Paul G.(2009).Conceptos de Física, Editorial Limusa S.A. de C.V.
26. Sakurai,K. (2010). Método sencillo del análisis de residuos solidos.
27. Mingorance,F.,Minelli,F.,Le du, H.(2004).El cultivo de la palma africana en el Choco.
28. Martínez,A.(2015).Diferencia entre poder calorífico inferior y superior de la biomasa.
29. FOCER. Manual sobre energía Renovable (Biomasa).Recuperado de [http://www2.congreso.gob.pe/sicr/cendocbib/con4_uibd.nsf/5EA2E564AF6F41D405257CC1005B2354/\\$FILE/Manuales_sobre_energ%C3%ADa_renovableBIOMASA.pdf](http://www2.congreso.gob.pe/sicr/cendocbib/con4_uibd.nsf/5EA2E564AF6F41D405257CC1005B2354/$FILE/Manuales_sobre_energ%C3%ADa_renovableBIOMASA.pdf)

ANEXOS

ANEXO A



INSTITUTO DE INVESTIGACIÓN
GEOLÓGICO Y ENERGÉTICO

INSTITUTO DE INVESTIGACIÓN GEOLÓGICO Y ENERGÉTICO
LABORATORIO DE BIOMASA

Av. Giovanni Calles s/n y Av. Padre Luis Vaccari

INFORME DE ENSAYOS N° LB-16-2019

SOLICITANTE	Jefferson Rubio/William Paucar - Universidad Internacional SEK	FECHA DE RECEPCIÓN	2019-07-22
MUESTRA	Fibras y Cuesco de palma	FECHA DE INFORME	2019-07-31
NÚMERO	LB-562-2019 y LB-563-2019	ENVASE	Envase aprox. 1000 g
ENSAYO REQUERIDO	Poder calórico	MUESTREO	Solicitante
DOCUMENTO			
TÉCNICO ASIGNADO	M. Romero		

RESULTADOS

MATRIZ DE ENSAYO	ENSAYO	MÉTODO	MÍNIMO	MÁXIMO	RESULTADO
Fibras de palma (LB-562-2019)	Poder calórico superior, MJ/kg	ASTM D 1989-96	a	a	19,84
	Poder calórico superior, MJ/kg	ASTM D 1989-96	a	a	19,65
	Poder calórico superior, MJ/kg	ASTM D 1989-96	a	a	19,71
Cuesco de palma (LB-563-2019)	Poder calórico superior, MJ/kg	ASTM D 1989-96	a	a	20,22
	Poder calórico superior, MJ/kg	ASTM D 1989-96	a	a	20,24
	Poder calórico superior, MJ/kg	ASTM D 1989-96	a	a	20,23

Los ensayos fueron realizados en base a la muestras receptadas en el laboratorio y bajo los métodos mencionados.

a: El método utilizado no presente valores de mínimo y máximo para estos ensayos

Danny Sinche
Responsable Laboratorio



Michelle Romero
Técnico 2

ANEXO B

Residuos de fibra y cueco utilizados en este estudio



Fibra



Cuesco

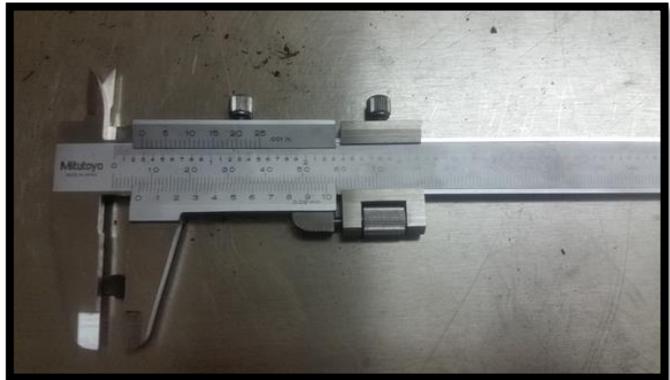
ANEXO B-1

Secador de lecho fluido



ANEXO C

Proceso de tamizado mecánico y clasificación de muestras del cuesco



ANEXO D

Pruebas de fluidización con las diferentes muestras obtenidas del proceso de tamizado

Muestra M1



Muestra M2



Muestra M3



Muestra M4



Muestra M5



Muestra M6



Muestra M7



Muestra M8



ANEXO E

Pruebas de fluidización con la mezcla (cuesco/fibra-oxigeno)

