



Universidad Autónoma de Querétaro
Facultad de Ingeniería

Evaluación físico-química del cascabillo del café para la generación de biocombustible sólido

Opción de titulación
Tesis

Que como parte de los requisitos para obtener el Grado de Licenciado en Ingeniería Agroindustrial

Presenta:

Jimena Asereth López Rivas

Dirigido por:

Dr. Juan Fernando García Trejo

Dr. Juan Fernando García Trejo
Presidente

Firma

Dra. Claudia Gutiérrez Antonio
Secretario

Firma

Dr. Ramón Gerardo Guevara González
Vocal

Firma

Dra. Elsa Gutiérrez Cortéz
Suplente

Firma

Nombre y Firma
Director de la Facultad

Dr. Irineo Torres Pacheco
Director de Investigación y Posgrado

Centro Universitario
Querétaro, Qro.

Fecha (será el mes y año de aprobación del Consejo Universitario)

AGRADECIMIENTOS

A Dios, por prestarme vida

A mi alma mater, la Universidad Autónoma de Querétaro por darme mi carrera profesional.

A mis maestros, que contribuyeron no solo a mi formación profesional sino también humana.

Dirección General de Bibliotecas UAQ

DEDICATORIA

A mis padres, quienes creyeron en mí y me han guiado por este camino

Dirección General de Bibliotecas UAQ

RESUMEN

El uso de residuos agroindustriales como biocombustibles ha marcado una nueva tendencia entre las energías renovables, puesto que son materia biomásica que no tiene un uso posterior al ser desechado y que puede causar diferentes problemas al medio ambiente. Uno de los mayores generadores de biomasa residual es la industria cafetalera, pues solo se aprovecha el 50% del total del fruto. Por lo cual, en este trabajo se caracterizaron las propiedades físico-químicas del cascabillo de café que representa alrededor del 40% del residuo, y se compararon con la norma ISO 17225-6 para calidad de biocombustibles sólidos, encontrando que con un 7.43% de humedad, 2.64% de cenizas y 17.92 MJ/KG de poder calorífico, el cascabillo de café cumple con las normas estandarizadas para ser clasificado y utilizado como biocombustible sólido de clase A.

Palabras clave: biocombustible sólido, cascarilla de café, residuo, agroindustria, pellets.

ABSTRACT

Agroindustrial waste using as biofuels has marked a new trend among renewable energies, since they are biological material that does not have a subsequent use when discarded and that may cause different problems to the environment. One of the largest generators of residual biomass is the coffee industry, since only 50% of the total fruit is used. Therefore, in this work the physical-chemical properties of the coffee husk that represents around 40% of the residue were characterized, and they were compared with the ISO 17225-6 standard for the quality of solid biofuels, finding that with a 7.43% humidity, 2.64% ash and 17.92 MJ / KG of calorific value, the coffee husk meets the standards to be classified and used as a class A solid biofuel.

Key words: solid biofuel, coffee husks, waste, agro-industry, pellet fuel.

Dirección General de Bibliotecas

ÍNDICE

| | |
|---|-----------|
| 1. INTRODUCCIÓN..... | 11 |
| 2.FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA Y ANTECEDENTES..... | 13 |
| 2.1. Generalidades del café..... | 13 |
| 2.1.2. Origen y distribución..... | 13 |
| 2.1.3. Taxonomía del café | 13 |
| 2.1.4. Morfología..... | 14 |
| 2.2. Composición del grano..... | 15 |
| 2.2.2. El cascabillo de café..... | 15 |
| 2.3. Importancia económica del café..... | 16 |
| 2.3.2. Producción mundial..... | 16 |
| 2.3.3. Producción nacional..... | 17 |
| 2.4. El beneficio del café..... | 17 |
| 2.4.2. Método húmedo..... | 17 |
| 2.4.3. Método seco..... | 18 |
| 2.5. Subproductos del café..... | 18 |
| 2.6. Biomasa..... | 19 |
| 2.6.2. Biomasa residual..... | 21 |
| 2.7. Residuos Agroindustriales..... | 22 |
| 2.7.2. El impacto ambiental de los residuos agroindustriales..... | 22 |
| 2.7.3. Alternativas para el uso de residuos agroindustriales..... | 23 |
| 2.8. Los bioenergéticos o biocombustibles..... | 24 |
| 2.8.2. Biocombustibles de primera generación..... | 25 |

| | |
|--|-----------|
| 2.8.3. Biocombustibles de segunda generación..... | 26 |
| 2.8.4. Biocombustibles sólidos..... | 26 |
| 2.9. La densificación..... | 26 |
| 2.9.2. Pellets y briquetas..... | 27 |
| 2.10. Biocombustibles sólidos obtenidos a partir de diferentes biomásas..... | 28 |
| 2.10.2. Biocombustibles obtenidos a partir de residuos de café..... | 29 |
| 2.11. Estándares de los biocombustibles sólidos..... | 30 |
| 2.12. Las características de los biocombustibles sólidos..... | 31 |
| 2.12.2. Humedad..... | 31 |
| 2.12.3. Contenido de cenizas..... | 31 |
| 2.12.4. Poder calorífico..... | 32 |
| 2.12.5. La durabilidad..... | 32 |
| 2.12.6. Sólidos volátiles..... | 32 |
| 2.12.7. Carbono..... | 32 |
| 2.12.8. Densidad..... | 33 |
| III.HIPÓTESIS Y OBJETIVOS..... | 34 |
| 3.1. Hipótesis..... | 34 |
| 3.2.1. Objetivos..... | 34 |
| 3.2.1. Objetivo general..... | 34 |
| 3.2.2. Objetivos específicos..... | 34 |
| IV.METODOLOGÍA..... | 35 |
| 4.1. Localización del experimento..... | 35 |
| 4.2. Recolección de la muestra..... | 35 |

| | |
|---|-----------|
| 4.3. Obtención de la harina..... | 35 |
| 4.4. Caracterización química del cascabillo de café..... | 37 |
| 4.4.2. Determinación del contenido de humedad..... | 37 |
| 4.4.3. Determinación del contenido de cenizas..... | 37 |
| 4.4.4. Determinación del poder calorífico..... | 39 |
| 4.4.5. Determinación de sólidos volátiles..... | 40 |
| 4.4.6. Determinación de carbono total..... | 41 |
| 4.5. Realización de los pellets..... | 42 |
| 4.6. Caracterización física de los pellets..... | 43 |
| 4.6.2. Medición de la longitud y diámetro de los pellets..... | 43 |
| 4.6.3. Durabilidad mecánica..... | 44 |
| 4.6.4. Densidad individual..... | 45 |
| 4.6.5. Densidad a granel de los pellets y materia prima..... | 45 |
| V.RESULTADOS Y DISCUSIÓN..... | 47 |
| 5.1. Características del cascabillo del café..... | 47 |
| 5.2. Análisis del contenido de humedad..... | 47 |
| 5.3. Análisis del contenido de cenizas..... | 47 |
| 5.4. Análisis del poder calorífico..... | 48 |
| 5.5. Análisis de la materia volátil..... | 48 |
| 5.6. Análisis del carbono total..... | 48 |
| 5.7. Durabilidad mecánica..... | 48 |
| VI.CONCLUSIONES..... | 49 |
| VII.REFERENCIAS..... | 50 |

INDICE DE CUADROS Y FIGURAS

| | |
|---|----|
| Cuadro 1. Taxonomía del café (<i>Coffea arabica</i>)..... | 13 |
| Cuadro 2. Morfología del café (<i>coffea arabica</i>)..... | 14 |
| Cuadro 3. Clasificación de la biomasa y sus características..... | 20 |
| Cuadro 4. Comparación de los resultados de la harina y pellets obtenidos con la norma ISO 17225-6..... | 47 |
| Figura 1. Nombres asignados al grano durante su proceso..... | 15 |
| Figura 2. Estructura del grano de café..... | 16 |
| Figura 3. Pasos para la obtención de café oro en método húmedo y método seco..... | 18 |
| Figura 4. Relación energía solar – biomasa..... | 20 |
| Figura 5. Comparación entre los tamaños de partícula..... | 35 |
| Figura 6. Muestra antes de la molienda..... | 36 |
| Figura 7. Muestra después de la molienda..... | 36 |
| Figura 8. Muestra después del tamizado..... | 36 |
| Figura 9. Cenizas de harina de cascabillo de café..... | 38 |
| Figura 10. Cenizas de pellets de cascabillo de café..... | 38 |
| Figura 11. Pellet de harina de cascabillo de café armado manualmente..... | 39 |
| Figura 12. Pellet armado con pelletizadora..... | 40 |
| Figura 13. muestras obtenidas para la determinación de sólidos volátiles de harina de cascabillo de café..... | 41 |
| Figura 14. Muestras obtenidas para la determinación de sólidos volátiles de pellets de cascabillo de café..... | 41 |
| Figura 15. Muestra del para determinación de carbono total harina..... | 42 |

| | |
|--|----|
| Figura 16. Muestra del para determinación de carbono total pellets..... | 42 |
| Figura 17. Pelletizadora..... | 43 |
| Figura 18. Pellets de cascabillo de café..... | 43 |
| Figura 19. Dimensiones de un pellet, imagen basada en ISO 17225-6:2014..... | 44 |
| Figura 20. Pellets seleccionados para obtener las dimensiones..... | 44 |

Dirección General de Bibliotecas UAQ

I. INTRODUCCIÓN

Con el crecimiento poblacional, la demanda de alimentos ha provocado un aumento en los residuos generados por la industria alimentaria. Estos residuos ascienden a los 176 millones de toneladas al año los cuales generan diferentes problemas a la salud y al medio ambiente ya que no son dispuestos o procesados adecuadamente.

Entre los diferentes problemas generados se encuentran la contaminación de las aguas, proliferación de plagas, contaminación en el suelo, y del aire. Esto se debe a los diferentes procesos que se llevan a cabo en la industria agroalimentaria, como el proceso de lavado, extracción, clarificación, desfrutado, entre otros, pues son dispuestos al medio ambiente sin ningún tratamiento, o vertidos en rellenos sanitarios dejando lodos residuales y liberación de dióxido de carbono.

Estos problemas además de ser ambientales, suelen ser también económicos ya que la disposición de los residuos tiene un alto costo y deben ser asumidos por las mismas empresas.

Debido a esto se buscan alternativas para el aprovechamiento de los residuos, entre los cuales están el compostaje, alimento para animales, bioenergéticos y elaboración de otros productos de interés derivados de los residuos, de los cuales es importante conocer sus propiedades y características, para poder aprovecharlos de la mejor manera.

El uso de los residuos a conversión de energía, consiste en utilizar la biomasa residual de los desechos agroindustriales en sus diferentes formas para bioenergéticos, como bioetanol, biodiesel y biocombustible sólido entre otros.

En particular, el biocombustible sólido, se obtiene de residuos sólidos secos, como lo son tallos, hojas, cáscaras etcétera. Este tipo de biocombustibles suelen procesarse como briquetas y pellets los cuales conllevan un proceso de densificación.

Uno de los residuos sólidos abundantes, es el cascabillo o cascarilla de café, la cual corresponde al 30% del residuo del grano del café, y el cual no tiene un tratamiento

o proceso posterior una vez desechado. Por lo cual se busca aprovechar este residuo, por lo que se debe caracterizar para conocer si tiene las propiedades adecuadas para generar biocombustible sólido.

Dirección General de Bibliotecas UAQ

II. FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA Y ANTECEDENTES

2.1. Generalidades del café (*Coffea arabica*).

2.1.2. Origen y Distribución.

Kahwah (cauá) es el vocablo por el cual se deriva la palabra café, del árabe y llegó a nosotros del vocablo turco “kahweh” (cavé).

La especie *Coffea arabica* es la especie de café más cultivada y es originaria de Etiopía. De ahí, en el siglo VI pasó a Yemen y se trasladó a la India. En los años 1700 los holandeses trasladaron el grano de café a Surinam y después a Sudamérica, finalmente los franceses lo llevaron a Martinica y América Central. El café se unas como bebida desde el siglo XII y actualmente se usa para elaborar una gran variedad de productos. (Velásquez, 2014)

2.1.3. Taxonomía del café.

Procedente del árbol de cafeto, el café es una semilla que pertenece a la familia *Rubiaceae* y al género *Coffea*. A nivel mundial el cafeto más cultivado es la especie *Coffea Arabica*, y su taxonomía se muestra en el cuadro 1.

Cuadro 1. Taxonomía del café (*Coffea arabica*).

| TAXONOMÍA | NOMBRE |
|--------------|-------------------------------|
| Reino | <i>Plantae</i> |
| División | <i>Magnoliophyta</i> |
| Sub-división | <i>Angiospermae</i> |
| Clase | <i>Magnoliata</i> |
| Sub-clase | <i>Asteridae</i> |
| Orden | <i>Rubiales</i> |
| Familia | <i>Rubiaceae</i> |
| Género | <i>Coffea</i> |
| Especie (s) | <i>arábica, robusta, etc.</i> |

2.1.4. Morfología.

El café es un arbusto siempre verde que se da en la región tropical de la tierra perteneciente a la familia de las rubiáceas. EL género *Coffea*, lo constituyen árboles, arbustos, y bejucos.

Cuadro 2. Morfología del café (*coffea arabica*)

| | |
|-------------------|--|
| Sistema radicular | Raíz pivontante que puede medir más de un metro de profundidad. Sistema radicular superficial. |
| Tallo principal | Yemas cabeza de serie, ramas plagiotropicas. Tienen conexión vascular con el tallo desde el principio. |
| Yemas seriadas | Originan brotes ortropicos |
| Ramas | Plagiotropocas secundarias, yemas seriadas, riginan de 2 a 4 inflorescencias y cada una tiene 4-5 yemas florales |
| Hojas | Opuestas y alternas en el tallo oortotropico. Color verde oscuro y brillante. |
| Flores | Se localizan en las axilas de las hojas. La corola es blanca y formada por 5 pétalos. El ovario, normalmente con dos lóculos, contiene un ovulo por lóculo tiene cinco estambres con antenas, de color blanco y bifurcado en el estigma. |
| Fruto | Drupa de superficie lisa y brillante, pulpa delgada fácilmente desprendible del pergamino. Los frutos son rojos o amarillos al madurar y contienen dos semillas. |
| Semilla | Constituidas por el endocarpio o pergamino, película plateda o perisperma y endosperma |

2.2. Composición del grano

La composición del grano de café se divide en tres partes: el 33% corresponde al café cereza, al cascabillo le corresponde un 12% y el café oro 56% (INCAP 1978)

El grano de café recibe diferentes nombres dependiendo del proceso en el que se encuentre (figura 1); los granos recién cosechados (fruto) se les nombra café cereza, ya que el fruto es parecido a esta, una vez que se le retira la pulpa y el mucílago, se le nombra café pergamino, cuando este se descascarilla recibe el nombre de café verde, antes de tostar, y una vez tostado recibe el nombre de café oro. (CEDRSSA, 2014)



Imagen tomada de imgrum.org

Figura 1. Nombres asignados al grano durante su proceso.

2.2.2. El cascabillo de café.

El cascabillo de café es una envoltura cartilaginosa de color blanco amarillento de aproximadamente 100 micrómetros de espesor y que corresponde al endocarpio (pergamino) del fruto, la semilla se encuentra en una forma suelta dentro de esta. (Palacio, 2005). La figura 2. Muestra la estructura del grano de café.

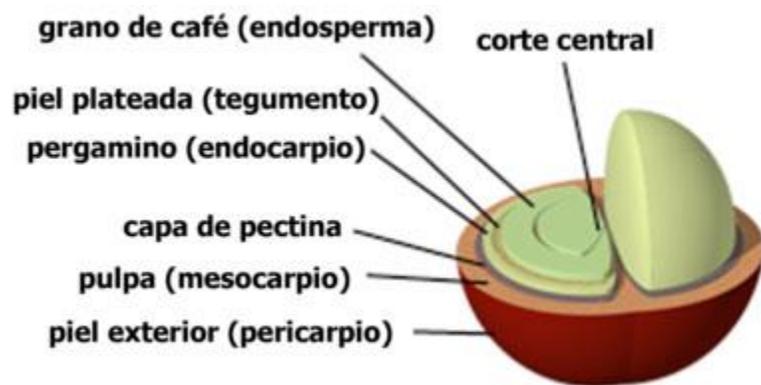


Imagen tomada de nuestrocafé.com

Figura 2. Estructura del grano de café.

2.3. Importancia económica del café

El café, es uno de los productos agrícolas más comercializados en el mundo, en especial en el mercado internacional, pues con más de 2.25 mil millones de tazas de café consumidas, es el segundo producto más comercializado, siguiendo únicamente detrás del petróleo (Hwang, 2017).

2.3.2. Producción mundial

El Departamento de Agricultura de Estados Unidos (2017) estima que la producción global de café 2017-18 fue de 159,9 millones de sacos de 60 kilogramos, y que el consumo tocará un récord de 158,5 millones de sacos. Esto equivale a los 9.6 millones de toneladas (OIC, 2017) siendo solo cuatro los países con el 67% de la producción: Brasil contribuye con el 33%, Vietnam con el 20%, Colombia con el 8% e Indonesia con el 6 por ciento. En México la producción de café contribuye en 2.6 % de la producción mundial (CEDRSSA ,2014).

El café tipo arábica constituye 70% de la producción mundial y es la principal especie cultivada en México. Por su parte, el café tipo robusta es más productivo, pero presenta mayor acidez y menor riqueza aromática, por lo que su precio en el mercado es menor al del café arábica y se destina a la industria del café soluble. (CONABIO, 2015).

2.3.3. Producción nacional

México es el 11° productor de café a nivel mundial (SIAP, 2017). El 61% de la producción de este cultivo durante el periodo 1980-2013 se concentró en dos estados: Chiapas contribuyó con el 37% y Veracruz con el 24%. (SIAP 2014)

La producción de café cereza en México para el ciclo 2015/16 se ubicó en 835.0 miles de toneladas, lo cual crea un desecho del cascabillo de café de aproximadamente 100 mil toneladas al año. (FIRA 2016).

En México la producción del café contribuye con 835,380 toneladas que es una de cada 50 toneladas que se producen en el orbe. Durante los últimos años, se han producido en promedio cerca de 1.5 millones de toneladas anuales de café cereza, en una extensión aproximada de 746 mil hectáreas, lo que representa casi el 4% de la superficie sembrada a nivel nacional. Chiapas, Veracruz y Puebla son los estados que generan los más altos volúmenes de café con 339,361 toneladas, 194,433 toneladas y 128,995 toneladas respectivamente. (SIAP 2017).

En el año 2013, el café cereza ocupó el 3% de la superficie sembrada total y generó el 2% del valor de la producción agrícola nacional.

2.4. El beneficio del café

Existen dos métodos básicos de procesado del cascabillo de café que varían en su complejidad y calidad del producto final, estos dos métodos son nombrados método húmedo y método seco (Murthy & Madhava, 2012).

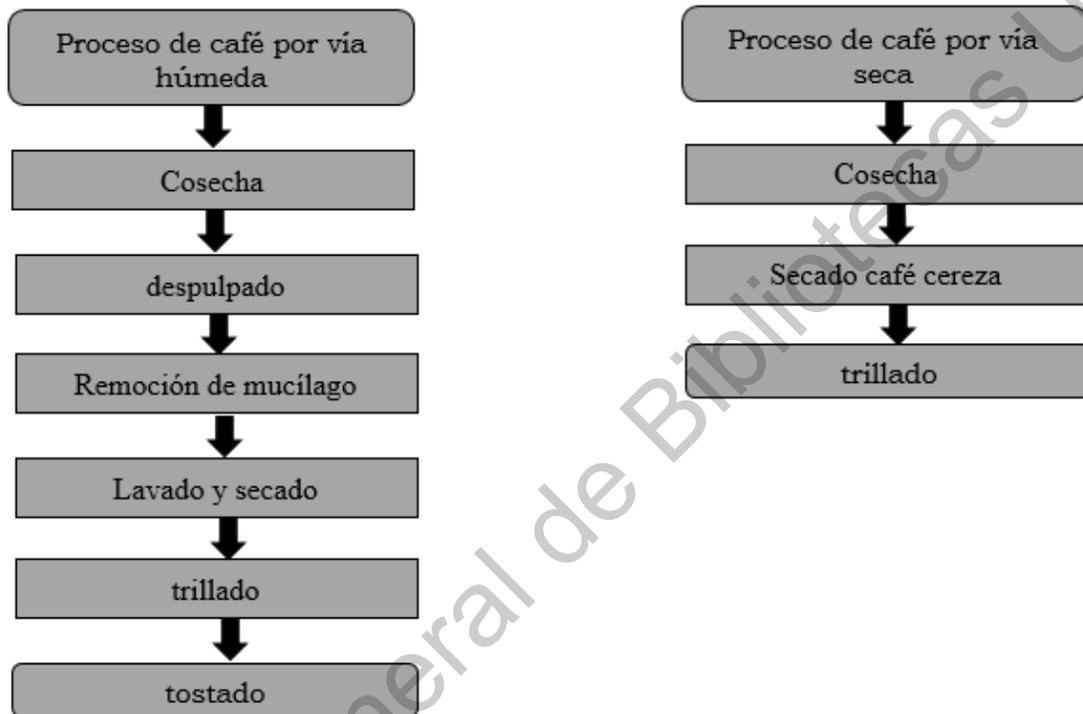
El método húmedo es más complejo y comúnmente es usado para granos de café arábica, mientras que el método seco es usado por lo general para café robusta (Mussatto et al., 2011). El método seco, es tecnológicamente más simple comparando con el método húmedo.

2.4.2. Método húmedo

El proceso por vía húmeda comprende las siguientes etapas: recolección del café en cereza, despulpado, remoción del mucílago, lavado y secado hasta obtener café pergamino seco, que luego se trilla para producir café verde. (Pineda C. et al. ,2008)

2.4.3. Método seco

El proceso por vía seca consiste en el secado del grano de café cereza. La cáscara compuesta por la pulpa, el mucílago y el pergamino se retira por medio de una máquina. (Pineda et al. ,2008). La Figura 3 muestra los pasos de cada uno de los procesos para la obtención de café oro.



Elaboración propia con datos de Pineda Carlos et al., Beneficiado del café 2008

Figura 3. Pasos para la obtención de café oro en método húmedo y método seco

2.5. Subproductos del café.

En el caso del café y sólo se aprovecha económicamente el grano, que corresponde alrededor de un 10 % del peso del fruto fresco (Abarca et al., 2010). Por lo que deja alrededor de un 90.5 % restante como residuo.

Porras y colaboradores (1987), explican que el desecho principal en el beneficio húmedo es la pulpa, las aguas mieles del despulpado y arrastre de la pulpa, y las de lavado de café fermentado. La pulpa es el más voluminoso y fuerte contaminante del proceso, representa el 40% en peso de la fruta, sin embargo, es fácilmente

recuperada por diferentes diseños de “parrillas” o “trampas” que las separan en agua de arrastre y dejan la pulpa en seco.

La cáscara del café también residuo del proceso de beneficiado es prácticamente pura lignocelulosa y no tiene ningún valor como fertilizante. Se quema habitualmente en hornos toscos para secar el café en pergamino. Si la mayor parte del pergamino se seca parcialmente al sol por motivos de calidad, es aún posible tener un excedente de combustible después de una operación de acabado del secado incluso con los toscos secadores de aire caliente de un paso de hoy en día (ICO, 2005).

Estos subproductos del café, que no son desechos o basura, deben seguir un tratamiento para su descomposición, pues se depositan en fuentes de agua directamente, llevan alta carga orgánica contaminante, lo que ocasiona un efecto negativo a la fauna acuática de los ríos, lagos, lagunas y mantos freáticos, incluso hasta arroyos de agua para consumo humano. Por lo tanto, es de mucha importancia establecer sistemas de tratamiento económicos (Guzmán, 2009)

2.6. Biomasa

Biomasa es el término utilizado para referirse a cualquier tipo de materia orgánica que haya tenido su origen inmediato en el proceso biológico de organismos recientemente vivos, en estos se incluyen las plantas y los desechos metabólicos de los seres vivos, así es que este término puede referirse a productos de origen vegetal y animal, productos biológicos y residuos de actividades agrícolas y de las actividades silvícolas, incluyendo la pesca y la acuicultura (Salinas y Gasca, 2009)

En términos de bioenergía, el término biomasa se refiere ampliamente a la materia orgánica, originada a través de un proceso biológico espontáneo o inducido, que se puede utilizar como fuente de energía. En esencia Es la energía solar retenida químicamente en plantas y animales. (Zhang et al., 2010) La figura muestra la relación entre la energía solar y los residuos considerados como biomasa.

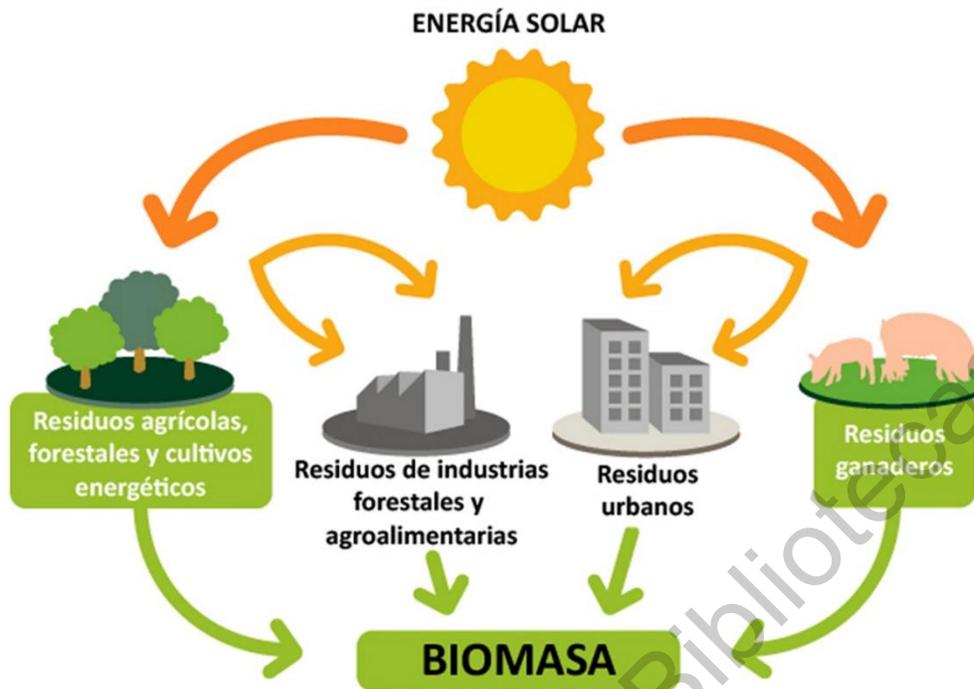


Figura 4. Relación energía solar - biomasa

La biomasa puede clasificarse de acuerdo a su procedencia. Según Salinas y Gasca (2009), la biomasa se puede clasificar en, primaria, secundaria, terciaria, natural, residual y cultivos energéticos.

Cuadro 3. Clasificación de la biomasa y sus características

| Tipo de Biomasa | Características |
|-----------------|---|
| Primaria | Materia orgánica formada directamente de seres fotosintéticos, Se incluye la biomasa vegetal con los residuos agrícolas y forestales. |
| Secundaria | Materia orgánica producida por los seres heterótrofos, que se alimentan de la biomasa primaria. Se incluye la carne de los animales y su materia fecal. |

| | |
|----------------------|---|
| Terciaria | Materia orgánica producida por los seres que se alimentan de biomasa secundaria, como lo son los animales carnívoros. |
| Natural | Materia orgánica producida por los ecosistemas silvestres |
| Residual | Materia orgánica que se puede extraer de los residuos agrícolas y forestales, así como de las actividades humanas |
| Cultivos energéticos | Son los cultivos agrícolas que tienen como finalidad suministrar la biomasa para producir bioenergéticos |

El carbono es el principal componente de la biomasa, así pues, esta puede ser usada como combustible cuando es quemada.

La biomasa puede ser considerada como una fuente de energía limpia, si se toma en cuenta que CO₂ lanzado a la atmósfera generado durante la quema de la misma, es la misma cantidad de dióxido de carbono que fue generada durante la etapa vegetativa o etapa de crecimiento. Debido a esto, se ha intensificado el empleo de la biomasa en la generación de biocombustibles (Saidur et al. 2011)

2.6.2. Biomasa residual

En particular, la biomasa residual, es aquella que se genera de cualquier tipo de proceso en el que se consume biomasa. Esta se puede encontrar en las actividades agropecuarias, y en las forestales y silvícolas, además de los residuos de origen orgánico generados en las industrias y en las localidades

El utilizar la biomasa residual parece ser la solución al uso de residuos sólidos agroindustriales, pues es más importante la descontaminación que se produce al generar un subproducto que la energía que pueden llegar a generar. Sin embargo, pueden ser autosuficientes energéticamente cuando las instalaciones o procesos que los generan los aprovechan (Fernández, 2008).

2.7. Residuos agroindustriales

Los residuos agroindustriales son aquellos subproductos que no tienen una utilidad posterior al proceso productivo para el que fueron utilizados, pues ya no son útiles en la cadena de producción. Estos son obtenidos a partir de los procesos primarios, de su transformación y de su industrialización. Estos residuos se pueden encontrar en diferentes estados de la materia como en estado líquido sólido, y también como lodos y mucílagos. (Rosas et al., 2016).

Aunque los residuos agroindustriales dejen de ser útiles para el proceso del que fueron generados, estos si pueden ser aprovechados, transformándolos en productos de valor agregado, obteniendo un beneficio económico, social o ambiental.

Cada uno de los procesos agroindustriales genera sus propios desechos con características específicas las cuales son las adecuadas u óptimas para ser utilizadas en otras cadenas de producción, o en otros procesos de la misma cadena de producción, y aunque estas suelen ser muy variadas existe una característica en común que es el contenido de materia orgánica, compuesta por celulosa, lignina, hemicelulosa y pectina (Saval, 2012). Es por esto que es importante conocer sus características para encontrar la cadena de producción adecuada en la que pueden ser útiles o en el subproducto adecuado para sus propiedades.

2.7.2. El impacto ambiental de los residuos agroindustriales

El problema con la generación de los residuos agroindustriales es que estos no son procesados o dispuestos adecuadamente, puesto que se busca deshacerse de ellos, muchos suelen ser quemados o enterrados, y también vertidos en rellenos sanitarios. Barragán et al. (2008)

Usualmente la contaminación que provocan los residuos pueden ocurrir durante el procesamiento de la materia prima, y su obtención, al no ser dispuestos adecuadamente. La contaminación que generan al medio ambiente es producida por la liberación de dióxido de carbono a la atmósfera, además de la contaminación

de las aguas y del suelo, la proliferación de plagas e insectos, y por supuesto los malos olores. Guerrero y Valenzuela (2011),

Otro de los problemas relacionado a los residuos agroindustriales es que es poca la conciencia ambiental que se tienen para el manejo y disposición de los mismos, además de que se necesitan diferentes recursos económicos, para el manejo, pues las empresas mismas son las que se encargan de deshacerse de los residuos, y por supuesto una capacidad tecnológica para conocer el mejor destino de los desechos sin que provoquen una contaminación ambiental (Saval, 2012)

Algunos de los efectos ambientales ya enunciados según Zuñiga (2011) por diferentes organizaciones sobre los problemas de los residuos agroindustriales son:

- Rápido incremento de la polución y la contaminación, provocando diferentes problemas a la salud
- Emisión de gases de efecto invernadero
- Erosión y desertificación, provocado por la quema de restos de cultivos
- Sobreexplotación y agotamiento de recursos
- Los rellenos sanitarios que se encuentran cerca de localidades, provocando la proliferación de plagas y vectores epidémicos, además de enfermedades

2.7.3. Alternativas para el uso de residuos agroindustriales

Los residuos agroindustriales, debido a la cantidad de materia orgánica que poseen, pueden ser aprovechados de diferentes maneras, generando diferentes beneficios al medio ambiente previniendo la contaminación al ser utilizados y beneficios sociales y económicos convirtiéndolos en subproductos.

Existen algunos criterios para la selección de los residuos agroindustriales, de tal manera que se pueda decidir si estos pueden ser aprovechados, esto son:

- Que sea estable, que bajo las condiciones ambientales donde se genere o donde se almacene, no se descomponga fácilmente
- Que el residuo se encuentre en las cantidades necesarias, y esté disponible localmente

- Que no tenga otros usos o aplicaciones diferentes al proceso para el que se pretende realizar, es decir, que no tenga competencia con otros productos
- No requerir algún tipo de pretratamiento, y si lo requiere que este sea económico y sencillo
- Que el principal componente del residuo pueda utilizarse como un sustrato para la producción fermentativa de insumos de procesos industriales, o que este pueda ser sometido a extracciones en el que se pueda recuperar alguno de los componentes que lo integran que tenga un mercado demandante
- Que la disponibilidad del residuo permita poder planificar el proceso para el cual será utilizado.

Debido a estos criterios, existen cuatro principales clasificaciones para la utilización de los residuos agroindustriales, estos son: según Hernández et al. (2016) la producción de compost, la producción de alimentos para animales Saval (2012), la fabricación de ladrillos, bloques y otros productos de interés de valor agregado Matthey et al. (2015) y por supuesto, la generación de bioenergéticos (Muñoz et al., 2013).

2.8. Los bioenergéticos o Biocombustibles.

Los biocombustibles, también llamados bioenergéticos, son combustibles renovables producidos a partir de biomasa ya sea directa o indirectamente, es decir, aquellos que proceden de la materia orgánica de organismos vivos o recientemente vivos, por lo tanto, son diferentes de aquellos generados por los fósiles como el petróleo. Estos son de origen biológico como pueden ser de materiales como la leña, el abono animal, el carbón vegetal, el biogás, el biohidrógeno, el bioalcohol, la biomasa microbiana, los desechos agrícolas y forestales y sus subproductos, los cultivos energéticos y otros (FAO, 2013).

Según la ley de Promoción y desarrollo de los Bioenergéticos (2008) en México, los biocombustibles se definen como combustibles provenientes de la biomasa pero que son provenientes de materia orgánica de las actividades agropecuarias, sin excluir la materia orgánica proveniente de actividades domésticas, comerciales e industriales, así como de microorganismos y enzimas. Esto se puede resumir como los combustibles provenientes de la biomasa.

La ventaja del uso de los biocombustibles es que los biocombustibles se consideran como una estrategia energética, puesto que genera menores emisiones de gases de efecto invernadero y minimiza el cambio climático pues al ser utilizados liberan gases como dióxido de carbono, vapor de agua, con nulas o reducidas emisiones de compuestos tóxicos; no obstante, el CO₂ liberado en la combustión es captado por las plantas durante su crecimiento, y se regula en el ciclo natural del carbono sin aumentar su concentración en la atmósfera, como pasa con los combustibles fósiles. (Valdés y Palacios, 2016).

Los bioenergéticos pueden obtenerse de diferentes tipos de biomasa proveniente de la agroindustria, algunos de los principales biocombustibles, son bioalcoholes como el bioetanol, biodiésel y biogás que son de los más desarrollados y con tecnologías establecidas y otros como el biohidrógeno y los pellets o briquetas

Los biocombustibles tienen distintas clasificaciones, se pueden clasificar de acuerdo a su estado, como líquido, sólido o gaseoso, o a su procedencia, como biocombustibles de primera generación, segunda generación y tercera generación.

2.8.2. Biocombustibles de primera generación.

Los biocombustibles de primera generación son aquellos que utilizan cultivos como maíz, o caña de azúcar como materia prima que a partir de ellos se obtienen los azúcares para la producción de etanol.

Sin embargo, el problema con estos biocombustibles, a pesar de ser efectivos, es la llamada “crisis alimentaria” en la cual se dice que los cultivos pueden ser mejor utilizados para fines alimenticios en lugar de utilizarlos como fuente de energía. (Rodríguez, 2007)

Además, sería imposible cubrir la demanda de combustible utilizando los biocombustibles de primera generación. Para cubrir la demanda de combustible en el mundo se necesitarían cuatro veces el área sembrada para alimentos hoy en día (Mendizabal & Marthadina, 2008)

2.8.3. Biocombustibles de segunda generación

Los biocombustibles de segunda generación, a diferencia de los primeros, son generados a partir de residuos o subproductos orgánicos de algún proceso o de algún vegetal que no tenga fines alimentarios.

Estos pueden generarse a partir de la celulosa o lignina la cual se encuentra en su mayor parte en los desechos de cultivos o los residuos de algún proceso agroindustrial.

La biomasa de celulosa permite generar el bioetanol celulósico, de manera que se pueden usar los desperdicios de los aserraderos y se puede reorientar y ampliar la silvicultura para diversificar el uso de los bosques y protegerlos de su desmonte para usos agrícolas y ganaderos (Salinas & Gasca, 2009).

Entre estos se destacan los biocombustibles sólidos que generalmente son formados en pellets o briquetas.

2.8.4. Biocombustibles sólidos

los biocombustibles sólidos necesitan pasar por un proceso diferente al biodiesel o bioetanol que, en lugar de llevar un proceso químico, conllevan un proceso físico.

Los biocombustibles sólidos son generalmente pellets o briquetas, ambas se fabrican por medio de prensas o extrusores en la cual los materiales son sometidos a grandes presiones y temperaturas, de esta forma producen en su interior procesos termoquímicos produciendo adherentes favoreciendo la cohesión del material (Fernández, 2011) aunque también suelen añadirse diferentes materiales adherentes para facilitar este procedimiento.

2.9. La densificación

La densificación, también llamada pelletización, es una operación unitaria de aumento de densidad de la masa, esta se obtiene aplicando una fuerza, para generar una compactación del material. Las formas que se obtienen debido a la compactación del material son diversas, como pueden ser gránulos, briquetas o pellets. Desde el punto de vista energético, estos son combustibles de forma cilíndrica, muy utilizados actualmente.

La biomasa se densifica con el objetivo de aumentar la densidad volumétrica del material con el que se trabaja. La densificación tiene varias ventajas como facilitar e almacenamiento, evitar desperdicios del material, reducir en contenido de humedad y facilitar la manipulación y el transporte de la materia (Chen et al., 2015). Desde el punto de vista energético, al final se obtiene un biocombustible con mayor aporte energético que la biomasa sin densificar.

2.9.2. Pellets y briquetas

Los pellets y briquetas son material densificado y tienen todo tipo de aplicaciones y finalidades. La gran diferencia entre pellets y briquetas es, en esencia, sus dimensiones.

Las briquetas son cilindros de 50 a 130 mm de diámetro y de 5 a 30 mm de longitud. Tienen una densidad elevada de entre 1.000 y 1.300 kg/m³. Estas se fabrican por medio de prensas en las que el material produce su interior procesos termoquímicos al ser sometido a altas presiones, esto puede generar productos adherentes que ayudan a la cohesión del material. Un ejemplo de esto es el aserrín (Fernández, 2008)

Los pellets (o pellets) son cilindros más pequeños. Y estos se obtienen mediante prensas de granulación, o pelletizadoras. La compactación del material se consigue de forma natural o mediante la adición de elementos químicos. Al igual que las briquetas, también se pueden añadir adherentes artificiales para facilitar la compactación y reducir la presión del prensado. Si se considera para bioenergía, los adherentes pueden aumentar o reducir el poder calorífico del pellet, por lo que se debe seleccionar adecuadamente y si es necesario añadirlo, puesto que puede aumentar el precio del material.

La calidad de los pellets y briquetas depende de las propiedades de la materia prima, como el tipo de biomasa, contenido de humedad y una baja granulometría. así como las condiciones de operación, el tipo de densificado, y los agentes aglutinantes (Gilbert et al., 2009).

2.10. Biocombustibles sólidos obtenidos a partir de diferentes biomásas.

Ivanova y colaboradores (2017) Produjeron briquetas a partir de biomasa de sorgo dulce puro después de la extracción del jugo, se hicieron diferentes mezclas: mezcla de sorgo con aserrín de madera (proporción 1: 1) y mezcla de sorgo con virutas de madera (proporción 1: 1). Los resultados de la investigación mostraron que las briquetas de sorgo mixtas con virutas de madera tienen la mayor durabilidad mecánica y el menor contenido de ceniza; Por otro lado, las briquetas de sorgo dulce y aserrín de madera tiene los mejores valores de todos los demás parámetros, incluidos valores caloríficos más altos, densidad, etc. Se puede concluir que el sorgo dulce tiene muy buenas perspectivas y, por lo tanto, es una materia prima de biomasa prometedora para la producción de biocombustibles sólidos.

Ahmed y colaboradores (2018), investigaron las propiedades termoquímicas de las partes del árbol de *A. auriculiformis*, incluidos los filodios (hojas), el tronco, la corteza y las ramas para utilizarlos como combustible sólido para producir bioenergía. Realizaron análisis termogravimétricos y derivados termogravimétricos (TGA y DTG) para estudiar el comportamiento de degradación de la biomasa, que mostró la descomposición de la biomasa en tres etapas El análisis proximal mostró los porcentajes en peso de los contenidos de humedad, materia volátil, contenido de carbono y cenizas fijas en 7.25–9.27%, 61.79–73.28%, 16.50–27.92% y 2.13–3.72%, respectivamente, confirmando que el potencial de biocombustible de las partes del árbol de *A. auriculiformis* es comparable con el de otros combustibles sólidos.

A. Brunerova y colaboradores (2017) realizaron diversos experimentos en Arroz (*Oryza sativa*), Frutos dátiles (*Phoenix dactylifera L.*) y Fruto de *Jatropha curcas*) para producción de biocombustibles sólidos encontrando que, con un contenido alto de oxígeno, cambiará el consumo de aire y la cantidad de gas de combustión por lo tanto afectará directamente al poder calorífico del biocombustible

Muntean y colaboradores (2017) realizaron experimentos de materias primas con diferente densidad para investigar el impacto de la densidad de biomasa en la

formación de una estructura monolítica y la resistencia de la briqueta. Se seleccionaron diferentes materiales de biomasa como dos variedades de *Miscanthus*, cáñamo industrial y madera de manzana. La investigación mostró que la durabilidad de las briquetas producidas a partir de *Miscanthus x giganteus*, *Miscanthus sinensis* y madera de manzano con un tamaño de fracción de 12 mm es mejor que las briquetas hechas de materiales con un tamaño de fracción menor de 8 mm y 4 mm. La utilización de materia prima con un tamaño de fracción más pequeño afectó solo la durabilidad mecánica de las briquetas hechas de cáñamo.

Streikus D. y colaboradores (2017), realizaron pellets a partir de tres tipos de *Cannabis sativa L.* (Felina 32, USO 31 y Finola) y *Urtica dioica L.* a los cuales les realizaron pruebas de compresión y concluyeron que los granos son muy resistentes a la fuerza estática y son cómodos de transportar.

Zihare y colaboradores (2018), llevaron a cabo una evaluación mediante la determinación experimental de los parámetros de biocombustible de dos especies de plantas invasoras. que están ampliamente distribuidas en Letonia, *Heracleum sosnowskyi* Manden y *Solidago canadensis L.* Se usó de cáscara de papa y café molido gastado como aglutinante mostrando que *H. sosnowskyi* es más adecuado para biocombustible sólido que para *S. canadensis*, ya que tiene un mayor poder calorífico y un contenido de ceniza dos veces inferior al 3% en peso además de demostrar que los granos de café son un aglutinante adecuado porque aumentan el valor calorífico.

2.10.2. Biocombustibles obtenidos a partir de residuos de café.

Shenoy y colaboradores (2011) estudiaron la pulpa de café seca y estimaron por titrimetría y método cromatográfico de gas el contenido de etanol en el caldo fermentado, el contenido de etanol en el caldo fermentado fue de 0.5, 0.46 del rendimiento de etanol teórico de pulpa de café seca, y de la pulpa de café húmeda fue de 46, 9.35 and 40% 9,35 y 40%, respectivamente. Concluyendo así que la pulpa de café es una fuente potencial de producción de etanol.

Los procesos de pirolisis para el estudio de la descomposición térmica de la biomasa vegetal muestran tres zonas o regiones fundamentales de pérdida de

masa. La primera zona, por debajo de los 200 °C, en la cual tiene lugar la pérdida de humedad y la emisión de CO, CO₂ y extractables. La pérdida de masa fundamental ocurre entre 200 y 400 °C, donde se descompone térmicamente la celulosa y hemicelulosa; a temperaturas por encima de 580 °C se produce una menor pérdida de masa y básicamente debe ocurrir la descomposición de la lignina. (Manals & Pinedo, 2011). En la descomposición de cascarilla de café ocurrió una pérdida de 44 % de masa, entre 200 y 400 °C; y entre 580 y 650 °C se descompuso un 34,86 % de la biomasa

Castillo (2014) hizo análisis fisicoquímico de la broza y cascarilla del café y determinó el poder calórico del material y su conductividad térmica, para el caso de la broza fueron 15 kJ/g y 0.216 W/(mK) respectivamente y para el caso del café se obtuvieron valores de 17.2 kJ/g y 0.276 W/(mK).

Dados estos estudios se entiende que la pulpa y el mucílago de café han tenido buenos resultados para la formación de biocombustible como el etanol, sin embargo, hacen falta estudios sobre el uso del residuo de cascarilla de café en biocombustibles.

2.11. Estándares de los biocombustibles sólidos

La estandarización, la acreditación y la certificación son parte de un sistema moderno que controla y demuestra el cumplimiento de productos y servicios con los requisitos especificados establecidos en estándares, normas y otras especificaciones. El propósito de este sistema es proporcionar la confianza de que solo los productos y servicios están certificados y cumplen los requisitos especificados (Kalligeros at al., 2009).

ISO (International Organization for Standardization) es una organización intergubernamental independiente y el mayor desarrollador mundial de Normas Internacionales voluntarias. Las normas ISO son desarrolladas por un panel de expertos. Por lo que, en tema de biocombustibles, las normas ISO también se encuentran presentes y dan un panorama general de calidad de biocombustibles sólidos, específicos para los obtenidos de materia herbácea. (Tbilisi, 2015)

La Norma ISO 17225-6, muestra las especificaciones de biocombustible sólido, y entre las características más significativas se incluyen el contenido de humedad, contenido de cenizas, el tamaño de las partículas y el poder calorífico.

2.12. Las características de los biocombustibles sólidos

Las características de los biocombustibles sólidos tienen importancia desde el punto de vista energético, puesto que en conjunto ayudaran a maximizar el poder calorífico del mismo.

Las características más importantes, se mencionan a continuación.

2.12.2. Humedad

El contenido de humedad, es la relación entre el agua contenida por kilogramo de materia seca, es decir, la cantidad de humedad inicial de la materia prima. En términos de bioenergía, es necesario que para la conversión energética la biomasa tenga un contenido de humedad menor al 30%. (López, 2013).

Es importante obtener una humedad adecuada, ya que, en principio una materia prima con alto porcentaje de humedad debe tratarse previamente, provocando un aumento en los costos. Una humedad baja, afecta la durabilidad del pellet, pues se puede desintegrar fácilmente. Humedades altas perjudican el poder calorífico final, puesto que una parte de la energía será utilizada para evaporar el agua en lugar de usarse en la combustión (Guo et al., 2015).

2.12.3. Contenido de cenizas

Las cenizas, son los minerales no combustibles en la materia combustible, es decir, son los residuos inorgánicos que quedan después de la combustión. Estas se producen por la ruptura de los enlaces de la biomasa, por los procesos bioquímicos y termoquímicos. La cantidad de cenizas puede afectar el proceso de conversión a energía y sus costos. Esto debido a que, de manera sencilla, el contenido de cenizas influye en la cantidad de energía disponible en la materia. (López, 2013).

El contenido de cenizas de la biomasa puede variar considerablemente, dependiendo de su procedencia. Del punto de vista energético y económico, algunas estufas están diseñadas para quemar combustibles con una alta cantidad

de cenizas, sin embargo, las más comunes no están diseñadas para aprovechar y quemar combustibles que generan una alta cantidad de cenizas.

2.12.4. Poder calorífico

El poder calorífico, se define como el contenido de energía por unidad de peso, es decir, es el contenido de energía total del combustible. Este está directamente relacionado con el contenido de humedad, puesto que el contenido de humedad reduce la eficiencia en la combustión (Cerquera & Galindo, 2006)

2.12.5. La durabilidad

La durabilidad del pellet es una variable muy importante, ya que permite determinar si el pellet resiste el manejo y transporte. La durabilidad se determina por la masa perdida de las muestras, tras someterse a un proceso de impacto y/o fricción. Este también determina una buena densificación del material, puesto que entre más compactado se encuentre el material, la durabilidad del pellet será mucho mayor (Liu et al., 2013).

2.12.6. Sólidos volátiles

La materia volátil, es aquella compuesta por hidrocarburos ligeros, CO₂, humedad y alquitranes. La biomasa generalmente tiene un alto contenido de sólidos volátiles (más del 50%) (Vasilliev et al., 2010)

Un alto contenido de materia volátil, significa que la biomasa puede encender a temperaturas relativamente bajas. Sin embargo, la fracción en la que enciende la materia fácilmente es perdida rápidamente, y las altas temperaturas deben mantenerse durante mucho tiempo para completar la combustión de todo el material (Khan et al., 2009). Los pellets con un alto contenido de materia volátil se combustionan más fácilmente.

2.12.7. Carbono

El carbono es el componente más abundante en la biomasa y este está relacionado directamente con el poder calorífico del material, es decir, a mayor contenido de carbono en el biocombustible mayor poder calorífico se puede tener. (Karla y Maynard, 1991).

Proporción de carbón fijo y compuestos volátiles

En el contenido de compuestos volátiles se determina la porción de gas liberada mediante calentamiento y en el carbón fijo se determina la masa que queda después de la liberación de los compuestos volátiles, Esta pérdida de peso se traduce en el porcentaje de materia orgánica entre menor sea el contenido de carbono fijo respecto al contenido de compuestos volátiles se necesita menor tiempo de residencia para la combustión completa del recurso biomásico (Nogués et al., 2010).

2.12.8. Densidad

La densidad afecta directamente al poder calorífico de la biomasa pues es un factor importante a considerar, ya que entre mayor sea la densidad del pellet, el aporte calorífico será mucho mayor (BUN-CA, 2002).

La alta densidad también tiene varias ventajas debido al manejo de los pellets, puesto que se pueden reducir los costos, por transporte y menos pérdida de la materia.

Pueden determinarse dos tipos de densidad:

- Densidad Unitaria o Individual: es la densidad promedio por pellet ρ_p en g/cm³; para ello se determina de forma individual, calculando el volumen del pellet V_p (cm³) mediante las mediciones de diámetro D (cm) y la longitud L (cm), y pesando el pellet en una balanza para determinar su masa
- Densidad a granel: Es la densidad que tienen los pellets en relación a un volumen donde son contenidos ρ_g . Los pellets son pesados y son colocados en un recipiente de volumen conocido, sus unidades pueden ser g/cm³.

III. HIPÓTESIS Y OBJETIVOS

3.1. Hipótesis.

El cascabillo de café tiene las características físico-químicas adecuadas para generación de biocombustible sólido

3.2. Objetivos.

3.2.1. Objetivo general.

- Evaluar las propiedades físico-químicas del residuo de cáscara de café Y compararlas con los estándares de calidad

3.2.2. Objetivos específicos.

- Determinar características químicas de la cáscara de café
- Elaborar pellets a partir del cascabillo del café.
- Determinar las características físico-químicas de los pellets
- Comparar las características de la harina con la norma ISO 12225-6.
- Comparar las características del pellet con la norma ISO 12225-6.

IV. METODOLOGÍA.

4.1. Localización del experimento.

La evaluación se realizó en el laboratorio de bioingeniería de la facultad de ingeniería en el campus Amazcala de la Universidad Autónoma de Querétaro, ubicado en la comunidad de Amazcala, municipio de El Marqués, Querétaro.

4.2. Recolección de la muestra.

El cascabillo de café, de la especie *Coffea Arabiga*, fue recolectado en la Finca Katyn en la comunidad de Taleo de Castro, Oaxaca. Estos residuos corresponden a la cosecha de agosto del 2018.

4.3. Obtención de la harina

Para la evaluación y densificado de la muestra se le dio un tratamiento físico de reducción de partícula en la que se utilizó un molino Krups modelo GX410010 y un Tamiz de pruebas físicas mort inox abertura de 420 micrones con el fin de homogenizar la muestra y obtener un tamaño partícula menor a 0.0165 pulgadas.

La figura 5. muestra la comparación entre los tamaños de partícula después de la molienda y el paso por el tamiz.



Figura 5. Comparación entre los tamaños de partícula

Las siguientes figuras muestran la diferencia en longitud de las partículas después de la molienda y después de haber pasado por el tamiz.



Figura 6. Muestra antes de la molienda



Figura 7. Muestra después de la molienda.



Figura 8. Muestra después del tamizado

4.4. Caracterización química del cascabillo de café.

La caracterización química consistió en la determinación del contenido de humedad, contenido total de cenizas, poder calorífico, contenido de carbono total y contenido de materia volátil. Los equipos y los métodos utilizados se describen en los siguientes apartados.

En este apartado se muestran los métodos utilizados tanto para la harina como para los pellets de cascabillo de café, por lo cual se muestran ambas muestras de los resultados obtenidos.

4.4.2. Determinación del contenido de humedad

El método utilizado fue el establecido en el laboratorio de bioingeniería por gravimetría, el cual consistió en poner 1g de la muestra en un crisol que fue llevado previamente a peso constante. La muestra se pesó en una balanza de la marca precisa modelo LS220A.

Esta fue llevada a un horno a 100° C y fue pesada cada hora hasta obtener un peso constante.

El contenido total de humedad se obtuvo por la siguiente fórmula.

$$\%W = (Ph+c - Ps+c)/(Pm) \times 100$$

Dónde:

%W = Porcentaje de humedad

Ph = Peso húmedo (g)

Ps = Peso seco (g)

Pm = Peso de la muestra (g)

C = Peso del crisol (g)

Cabe mencionar que cada prueba se realizó por triplicado.

4.4.3. Determinación del contenido de cenizas

Esta prueba se llevó a cabo conforme a la norma NMX-F-066-S-1978 (Secretaría de Comercio y Fomento Industrial, 1978), con algunas modificaciones. El método consistió en poner a peso constante un gramo de la muestra, el peso tanto del crisol

como de la muestra fueron registrados, este fue llevado a una mufla de la marca Felisa, modelo FE-360 con un alcance de 1100°C.

La mufla se programó a 500°C y se dejó la muestra por 5 horas. Se dejó enfriar dentro de la mufla. Después los crisoles se colocaron en un desecador para enfriar y evitar que las muestras absorbieran humedad.

Las muestras de cenizas de la harina de cascabillo de café se pueden apreciar en la siguiente figura.



Figura 9. Cenizas de harina de cascabillo de café.

Las muestras de las cenizas de los pellets de cascabillo de café se encuentran en la figura



Figura 10. Cenizas de pellets de cascabillo de café

Las muestras se pesó y la determinación del contenido total de cenizas se calculó con la fórmula:

$$%A = (P - p) \times 100$$

Donde:

%A = Porcentaje de cenizas

P = Peso del crisol con las cenizas (g)

P = Peso del crisol vacío (g)

M = Peso de la muestra (g)

4.4.4. Determinación del poder calorífico

Para determinar el poder calorífico de la muestra se utilizó un Calorímetro isoperibólico de la marca Parr modelo 6200.

Se formó un pellet con la prensadora manual Parr Pellet Press 2811 que viene como complemento del calorímetro isoperibólico, de entre 0.5 – 1g se registró el resultado del peso y se colocó en la canastilla de la bomba de oxígeno.

El pellet formado con la prensadora manual se encuentra en la siguiente figura



Figura 11. Pellet de harina de cascabillo de café armado manualmente

Para medir las calorías de los pellets realizados con la pelletizadora, se seleccionaron 3 pellets que tuvieran un peso entre 0.5g y 1g y se pusieron en la canastilla para ser introducido en el calorímetro isoperibólico.



Figura 12. Pellet armado con pelletizadora

Estas canastillas con los pellets, se introdujeron en el equipo y se registraron los pesos manualmente, para la combustión de la muestra. Una vez terminado el procedimiento, el equipo mostró las calorías totales en la pantalla en cal / g por lo que únicamente se hizo la conversión de cal /g a MJ / Kg.

4.4.5. Determinación de sólidos volátiles.

Para la determinación de sólidos volátiles se emplearon 3 crisoles de porcelana para cada biomasa, los cuales se pesaron en la balanza analítica y se registró su peso; posteriormente se colocaron a peso constante en una mufla a 550 °C. Se pesaron 3 gramos de biomasa molida y tamizada en cada crisol. Los crisoles con la biomasa se colocaron en la estufa a 103-105 °C, y se monitoreó pesando cada 30 minutos las muestras hasta llegar a un peso constante.

La muestra evaporada se colocó a 550 °C en una mufla marca Felisa en periodos de 30 minutos hasta lograr un peso constante. La pérdida de masa de la muestra posterior a la ignición equivale a los sólidos volátiles. El contenido de volátiles se determinó utilizando la ecuación.

$$\%SV = ((A-B)) / (\text{Peso muestra seca (g)}) \times 100$$

Donde:

% SV = Porcentaje de sólidos volátiles

A = Peso de la muestra + peso del crisol antes de la ignición (g)

B = Peso de la muestra + peso del crisol después de la ignición (g)

Las muestras de los resultados obtenidos se pueden apreciar en la figura 13 y 14



Figura 13. muestras obtenidas para la determinación de sólidos volátiles de harina de cascabillo de café



Figura 14. Muestras obtenidas para la determinación de sólidos volátiles de pellets de cascabillo de café

4.4.6. Determinación de carbono total.

El carbono orgánico total (COT) se determinará con el método de pérdida por ignición (loss on ignition, LOI), el cual consiste en colocar los crisoles en peso constante en una mufla a 375 °C. Después se pesaron 3 gramos de biomasa y se sometió a calcinación en una mufla a 375 °C durante 16 horas. Transcurrido este tiempo se deja enfriar, se coloca en un desecador y se pesa. El 50% de la materia orgánica está compuesta por carbono; por lo tanto, para convertir el carbono orgánico total a materia orgánica se utilizó un factor de 1.724 propuesto por Van Bemmelen (Eyherabide, 2014). El contenido de carbono se determinó usando la ecuación

$$\% C = (((A-B))/A \times 100)/1.724$$

Donde:

% C = Porcentaje de carbono

A = Peso de muestra seca + peso de crisol (g)

B = Peso de muestra incinerada + peso de crisol (g)

Las muestras de los resultados obtenidos del carbono total se pueden apreciar en las siguientes figuras:



Figura 15. Muestra del para determinación de carbono total harina



Figura 16. Muestra del para determinación de carbono total pellets

4.5. Realización de los pellets

Para densificar el material se empleó una pelletizadora de rodillos con una capacidad máxima de entre 150 a 250 kg/h con un motor marca Magne Tek de 5 HP de potencia (Figura 17.)



Figura 17. Pelletizadora

Empleando el equipo de densificado se obtuvieron los pellets mediante el empleo de presión para la obtención del producto final. Posteriormente con ayuda del tamiz que tiene el equipo, se retiró parte del polvo de los pellets y se dejaron enfriar. Los pellets obtenidos se muestran en la figura 18.



Figura 18. Pellets de cascabillo de café

4.6. Caracterización física de los pellets

La caracterización física, consistió en la medición de las dimensiones del pellet, la durabilidad mecánica, y la densidad individual y a granel.

4.6.2. Medición de la longitud y diámetro de los pellets

La longitud y el diámetro de los pellets se midieron una vez estando fríos. Para las mediciones de longitud y diámetro de los pellets se empleó un vernier digital, marca STAINLESS HARDENED, modelo 784EC.

Ambas dimensiones se determinaron en 20 pellets, y para la medición se siguió el diagrama descrito en la norma ISO 17225 y representado en la Figura (), donde D representa el diámetro y L la longitud.

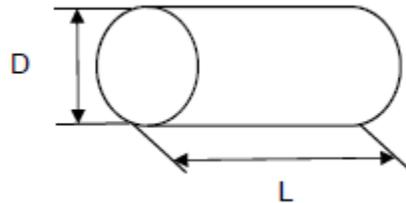


Figura 19. Dimensiones de un pellet, imagen basada en ISO 17225-6:2014.

Algunos de los pellets seleccionados al azar se muestran en la siguiente figura



Figura 20. Pellets seleccionados para obtener las dimensiones

Al final se determinó el promedio de longitud y diámetro. Para determinar el peso de los pellets se empleó una balanza marca Precisa, modelo 321, Las mediciones obtenidas con el equipo permitieron obtener la densidad después de haber obtenido en conjunto, el volumen de los pellets.

4.6.3. Durabilidad mecánica

Para la determinación de la durabilidad mecánica se utilizó una variación del Standard Test Method for Drop Shatter Test for Coke ASTM D3038 – 93 (2010), El método consistió en la medición de masa de un pellet utilizando una balanza analítica, luego se dejó caer el pellet desde una altura de 1.85 m sobre una baldosa plástica. Se tomó el pellet y nuevamente se llevó a la balanza para determinar su

masa final. Finalmente, se calculó la resistencia al impacto por diferencia de masas utilizando la balanza Precisa, modelo 321.

4.6.4. Densidad individual

Para cada pellet, después de medir su longitud y su diámetro se pesó inmediatamente en la balanza. Posteriormente, con los datos de longitud y diámetro se determinó el volumen para los 20 pellets, y con el peso se calculó la densidad para cada uno de ellos y se determinó un promedio. Las ecuaciones que se emplearon fueron las siguientes:

Volumen del pellet

$$V_p = (\pi D^2 / 4) * L$$

donde:

V_p: Volumen del pellet (cm³)

D: Diámetro (cm)

L: Longitud (cm)

Densidad individual

$$\rho_p = m_p / V_p$$

donde:

ρ_p: Densidad del pellet (g/cm³)

m_p: Peso del pellet (g)

V_p: Volumen del pellet (cm³)

4.6.5. Densidad a granel de los pellets y materia prima

Para determinar la densidad a granel de los pellets se empleó un vaso de precipitado de 50 cm³ y se comprobó con agua destilada que el volumen fuera el descrito anteriormente. Una vez que se validó el volumen, el vaso fue puesto en la balanza y se taró. Posteriormente fue llenado con los pellets correspondientes al experimento uno, hasta la marca de 50 cm³, cuidando que los pellets no sobresalieran; para ello se aplicó un poco de presión además de que fueron aplicados ligeros golpes para que los pellets se acomodaran en el vaso, procurando cubrir todo el espacio disponible en el vaso. Posterior a esta operación, el vaso se

colocó en la balanza y se registró el peso del vaso con biomasa. La densidad a granel se calculó por la ecuación:

$$\rho g = mps / 50 \text{ cm}^3$$

Donde:

ρg : densidad a granel (g/cm^3)

mps : peso de los pellets que ocupan un volumen de 50 cm^3 en (g)

Un procedimiento similar se llevó a cabo para la biomasa sin moler; esto con el fin de determinar en qué relación aumenta la densidad de la biomasa una vez densificada. Para ello se empleó un vaso de 1 litro, y de la misma manera se validó el volumen y se marcó. Una vez realizado esto, se taró y se llenó con biomasa. La masa que se obtuvo se dividió entre un 1 dm^3 para conocer la densidad de la biomasa sin procesar.

Dirección General de Bibliotecas UJAQ

V. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

5.1. Características del cascabillo de café

Los resultados obtenidos de las determinaciones para la harina del cascabillo de café y los pellets se encuentran en el cuadro, con su respectiva desviación estándar y están comparados con la norma ISO 17225-6.

Cuadro 4. Comparación de los resultados de la harina y pellets obtenidos con la norma ISO 17225-6

| Determinación | Unidades | ISO clase A | ISO clase B | Harina de cascabillo de café | Pellets de cascabillo de café |
|----------------------|-------------------|-------------|-------------|------------------------------|-------------------------------|
| Humedad | % | ≤ 12 | ≤ 15 | 8.2 ± 0.91 | 7.43 ± 0.12 |
| Cenizas | % | ≤ 6 | ≤ 10 | 3.42 ± 0.07 | 2.64 ± 0.03 |
| Poder calorífico | MJ/kg | ≥ 14.5 | ≥ 14.5 | 14.87 ± 0.08 | 17.92 ± 0.01 |
| Diámetro | mm | 6-10 | 6-10 | - | 7.96 ± 0.15 |
| Longitud | mm | 3.15-40 | 3.15-40 | - | 21.61 ± 1.19 |
| Durabilidad mecánica | % | ≥ 97.5 | ≥ 96 | - | 99.95 ± 0.01 |
| Densidad | kg/m ³ | ≥ 600 | ≥ 600 | | |
| Sólidos volátiles | % | - | - | 94.591 ± 0.46 | 89.95 ± 0.27 |
| Carbono | % | - | - | 55.44 ± 0.08 | 56.04 ± 0.34 |

5.2. Análisis de la humedad.

Como se puede observar en el cuadro, los pellets tienen una menor humedad que la harina, esto se debe a que el cascabillo de café pierde humedad al ser densificado, ya que al pasar por este proceso hay un aumento en la temperatura, evaporando así parte del agua contenida.

5.3. Análisis del contenido de cenizas

La cantidad de cenizas es menor en los pellets, comparado con la harina, como se puede observar en el Cuadro 4. Es importante tener una cantidad baja de cenizas, ya que si la ceniza es alta significa que menor será el calor obtenido, además de un problema de manejo debido a las grandes cantidades de ceniza

5.4. Análisis de poder calorífico

Como se puede notar en el cuadro, el poder calorífico aumenta con respecto a la harina, esto se debe principalmente a la densificación de la materia.

Otros factores que también pueden haber modificado el poder calorífico es el contenido de humedad ya que una alta humedad reduce la eficiencia en la combustión.

También es importante recalcar que el poder calorífico de la cascarilla de café concuerda con los resultados obtenidos de Castillo (2014), que fueron de 17.2MJ/kg.

5.5. Análisis de la materia volátil

Los sólidos volátiles, aunque no se encuentran estandarizados en la norma ISO 17225-6 son importantes, ya que nos dan un resultado indirecto de la capacidad de combustión de la materia, es decir, a mayor cantidad de sólidos volátiles, mayor cantidad de materia combustible, por lo cual, los resultados nos muestran que el cascabillo de café tanto en pellets como en harina, tienen una alta cantidad de materia combustible.

5.6. Análisis del carbono total.

El carbono, al igual que la materia volátil, no se encuentra estandarizada en la norma ISO 17225-6 sin embargo, es muy importante tenerlo en cuenta ya que el contenido de carbono es un índice de ignición, pues está relacionado con la reactividad de la materia orgánica.

5.7. Durabilidad mecánica

La durabilidad mecánica de los pellets nos muestra que hay una gran densidad de la materia, lo que hará más resistentes los pellets al manejo y transporte evitando pérdidas del material

VI. CONCLUSIONES

Es importante la densificación de la materia biomásica, ya que esta aumentará directamente en el poder calorífico de la materia, por lo cual se considera relevante producir pellets o briquetas, maximizando así el poder calorífico.

Las características del pellet de cascabillo de café permiten el densificado del mismo, sin necesidad de agregar algún aglutinante, lo cual hace más sencillo y económico su realización

El poco porcentaje de cenizas, hace los pellets de cascarilla de café versátiles para ser utilizados en hornos de calidades diferentes.

Como se puede observar en el cuadro, tanto la harina de cascarilla de café, como los pellets se encuentran dentro de los estándares de la norma ISO 17225-6, ya que sus características físico-químicas están en los rangos para ser clasificado como biocombustible de clase A, por lo cual se concluye que el cascabillo de café puede ser utilizado como biocombustible sólido.

Debido al porcentaje de residuo agroindustrial que representa el cascabillo de café y sus propiedades, se considera útil y recomendable para generar biocombustible sólido.

Debido a que dentro del proceso del café se utilizan diferentes tipos de hornos para tostar el mismo grano, los pellets de cascabillo de café pueden ser integrados al proceso durante el tostado del grano, obteniendo así un beneficio dentro del proceso.

VII. REFERENCIAS

1. Castillo,B., (2014). Determinación de parámetros fisicoquímicos y cinéticos de la degradación térmica de broza y cascarilla de café para ser utilizados en simulaciones computacionales del proceso de gasificación. Tesis de grado. Universidad de Costa Rica.
2. CEDRSSA. (2014). Producción y mercado de café en el mundo y en México. Reporte del CEDRSSA México DF. Centro de Estudios para el Desarrollo Rural Sustentable y la Soberanía Alimentaria.
3. Deepa Shenoy, Anjali Pai, R.K. Vikas, H.S. Neeraja, J.S. Deeksha, Chetan Nayak, (2007). Energía alternativa: una mirada hacia la región. Quito: Centro Ecuatoriano de Derecho Ambiental (CEDA).
4. Espinoza A. & Espinoza M., (2011) Ciencia y Tecnología para the Desarrollo "Transformación de biomasa residual en bio-combustibles sólidos XIX Conimera (congreso nacional de ingeniería mecánica, eléctrica y ramas afines).[URL:http://www.guzlopeditoras.com/web_des/ener01/biomasa/pld0464.pdf](http://www.guzlopeditoras.com/web_des/ener01/biomasa/pld0464.pdf)
5. Fernández J., (2008). Energía de la Biomasa. Energías Renovables para todos. Iberdrola. Pp 6-7.
6. INCAP, (1978). Composición química de la pulpa de café y otros subproductos. pulpa de café composición, tecnología y utilización. Guatemala. Instituto de Nutrición de Centro América y Panamá. pp19.
7. Machado, E., Rodriguez R., Teixeira, J. y Mussatto, S., (2012). Growth of fungal strains on coffee industry residues with removal of polyphenolic compounds. Biochemical Engineering Journal, 60.
8. Manals & Pinedo, (2011). Análisis termogravimétrico y térmico diferencial de diferentes biomasa vegetales. Giselle Giralt-Ortega, Universidad de Oriente, Facultad de Ingeniería Química.
9. Mendizábal M., (2008). Prólogo: Agrocombustibles: Energía del futuro. Biocombustibles. Bolivia. REDESMA. 7-9.

10. Mussatto, S., Machado, E., Martins, S., y Teixeira, J., (2011b). Production, Composition, and Application of Coffee and Its Industrial Residues. *Food Bioprocess Technology*, 4 pp 664.
11. P. Murthy & M. Naidu, (2012). Sustainable management of coffee industry by products and value addition. A review *Resources, Conservation and recycling*. 66, 45-58.
12. Palacio, L. (2005). Caracterización de propiedades fluidodinámicas de lechos fluidizados en frío con mezclas de carbón-biomasas usadas en procesos de cogasificación. Medellín, Colombia Universidad Pontificia Bolivariana
13. Pineda C., Reyes C., Alonso F., (2008). Beneficiado y calidad del café.
14. Prieto A., (2002). Caracterización química de café semitostado. Proyecto de Grado. Fundación Universidad de América. Bogotá
15. Rao C., (2011). A study on bioethanol production from cashew apple pulp and coffee pulp waste.
16. Rodríguez A., (2007). Biocombustibles y seguridad alimentaria: análisis exploratorio. Ponencia presentada en el Foro Biocombustibles
17. Salinas & Gasca, (2009). Los biocombustibles. *El Cotidiano* núm. 157. México DF. Universidad Autónoma Metropolitana Unidad Azcapotzalco. pp 157-158.
18. SIAP, (2014). Anuario estadístico de la producción agrícola. Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera. http://infosiap.siap.gob.mx/aagricola_siap_gb/icultivo/index.jsp
19. USDA, (2014). Fruits, tree nuts, and horticultural specialties. *Agricultural statistics* Washington, dc: National agricultural statistics service. 198
20. Ashfaq A., Syarif H., Muhammad S., Abu B., Abul K., Rahayu S., & Neeranuch P., (2018) Thermochemical characterisation of *Acacia auriculiformis* tree parts via proximate, ultimate, TGA, DTG, calorific value and FTIR spectroscopy analyses to evaluate their potential as a biofuel resource, *Biofuels*.
21. L. Zihare, R. & Blumberga D., (2018). The potential use of invasive plant species as solid biofuel by using binders. *Agronomy Research* 16

22. Skvaril J., Konstantinos K., Avelin A., Odlare M., Dahlquist, E., (2017). The 8th International Conference on Applied Energy – ICAE Future Energy Center, School of Business, Society and Engineering, Mälardalen University, Västerås. Suecia.
23. T. Ivanova, P. Hutla and B. Havrland, (2017). Influence of raw material properties on the quality of solid biofuel and energy consumption in briquetting process Agronomy Research 15 1708–1715, <https://doi.org/10.15159/AR.17.024>
24. Brunerova A., Malaťak J., Muller M., Valašek P. & Roubik H., (2017). Tropical waste biomass potential for solid biofuels production. Agronomy Research 15. Pp 359
25. Streikus D., Kucinskas V., Masek J., (2017). Research in fibrous plant preparation for pressed solid biofuel and determination of pellet indicators. Engineering for rural development Jelgava, pp 680
26. Ivanova T., Muntean A., IHavrland B., & Hutla P., (2018). Quality assessment of solid biofuel made of sweet sorghum biomass BIO Web of Conferences 10. Contemporary Research Trends in Agricultural Engineering <https://doi.org/10.1051/bioconf/20181002007>
27. Rosas D., Ortiz H., Herrera J. y Leyva O., (2016). Revalorización de algunos residuos agroindustriales y su potencial de aplicación a suelos agrícolas. Agroproductividad, 9
28. Barragán B, & Laguna A., (2008). Utilización de residuos agroindustriales. Revista Sistemas Ambientales, 2 pp 4.
29. Guerrero R. & Valenzuela L.. (2011). Agroindustria y medio ambiente. Trilogía. Ciencia Tecnología Sociedad,
30. Ley de Promoción y Desarrollo de los Bioenergéticos, (2008). Diario Oficial de la Federación, 01 de febrero de 2008. Pp 10
31. FAO (Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura), (2013). La bioenergía y los biocombustibles. Vías de la sostenibilidad. <http://www.fao.org/3/a-ar589s.pdf>

32. Valdés O y Palacios O., (2016). Evolución y situación actual de plantaciones para biocombustibles: perspectivas y retos para México. *Agroproductividad*, 9(2):33-41.
33. Salinas Callejas, Edmar; Gasca Quesada, Víctor, (2009) Los biocombustibles. *El Cotidiano*, núm. 157, septiembre-octubre,, pp. 75 Universidad Autónoma Metropolitana Unidad Azcapotzalco Distrito Federal, México.
34. Saidur, R., E. . Abdelaziz, A. Demirbas, M. S. Hossain, y S. Mekhilef. (2011). A review on biomass as a fuel for boilers. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. <http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2011.02.015>
35. Zhang L, Xu C, Champagne P., (2009). Overview of recent advances in thermochemical conversion of biomass. *Energy Convers Manage*.
36. Chen, W.-H., J. Peng, y X. T. Bi., (2015). A state-of-the-art review of biomass torrefaction, densification and applications. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. <http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2014.12.039>
37. Gilbert, P., C. Ryu, V. Sharifi, y J. Swithenbank., (2009). Effect of process parameters on pelletisation of herbaceous crops.
38. Kalligeros at al. (2009) Standardization of solid biofuel. *Proceedings of the 11th International Conference on Environmental Science and Technology*. Chania, Greece,, pp. 415
39. Tbilisi (2015) Solid Biofuel Standardization Energy and Sustainable Development Institute Ilia State University pp. 8.
40. López, D., (2013). Valorización de biomasa de origen vegetal mediante procesos térmicos y termoquímicos. <https://ruidera.uclm.es/xmlui/bitstream/handle/10578/3393/TESIS%20L%C3%B3pez%20Gonz%C3%A1lez.pdf?sequence=1>
41. Guo, M., W. Song, y J. Buhain., (2015). Bioenergy and biofuels : History , status , and perspective. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*.
42. Cerquera, D., & Galindo, O. (2006). Estudio de la eficiencia energética del proceso de secado de arroz del Molino Roa S.A. Universidad de Ibagué, pp.17

43. Liu, Z., B. Fei, Z. Jiang, Z. Cai, y Y. Yu. (2013). The properties of pellets from mixing bamboo and rice straw. Renewable Energy. 55
<http://dx.doi.org/10.1016/j.renene.2012.12.014>
44. BUN-CA., (2002). Manuales sobre energía renovable: Biomasa.
<http://www.enersilva.org/libros/manual%20biomasa.pdf>
45. Kalra, Y. P., y D. G. Maynard., (1991). Methods Manual for Forest Soil and Plant Analysis. <https://books.google.com/books?id=QhEjKAAACAAJ&pgis=1>
46. Vassilev SV, Baxter D, Andersen LK, Vassileva CG. An overview of the chemical composition of biomass. Fuel.
47. Khan AA, Jonga WD, Jansens PJ, Spliethoff H., (2009) Biomass combustion in fluidized bed boilers: potential problems and remedies. Fuel Process
48. Abarca, D. Martínez R., Muñoz J., Torres M., Vargas G. (2010). Residuos de café, cacao y cladodio de tuna: Rev. Tec. ESPOL-RTE, pp. 63
49. Nogués F., García D., Rezeau A., (2010). Energía de la Biomasa. Energías Renovables. Vol. I. pp. 129.
50. Aprovechamiento de Residuos Agroindustriales: Pasado, Presente y Futuro Susana Saval Instituto de Ingeniería, UNAM, Ciudad Universitaria, México, D.F