





Tecnológico de Costa Rica

Área Académica Agroforestal

Maestría en Gestión de Recursos Naturales y Tecnologías de Producción

Trabajo Final de Graduación sometido al Tribunal del Área Académica Agroforestal del Tecnológico de Costa Rica para optar por el grado de Máster en Gestión de Recursos Naturales y Tecnologías de Producción

**Análisis del efecto de la adición de semillas oleaginosas (*Jatropha curcas* y *Ricinus communis*) sobre las características físicas y químicas de pellets fabricados a partir de la broza de café**

Esteban Díaz Jiménez

Campus Tecnológico Central, Cartago, Costa Rica

Diciembre, 2019

## **Hoja de Aprobación del Trabajo Final de Graduación**

Este Trabajo Final de Graduación fue aceptado por el Tribunal del Área Académica Agroforestal del Tecnológico de Costa Rica, como requisito parcial para optar por el grado de Máster en Gestión de Recursos Naturales y Tecnologías de Producción

---

Dr. Roger Moya Roque  
Profesor Tutor

---

Máster. Juan Carlos Valverde Otárola  
Lector

---

Ing. Rooel Campos Rodríguez Ph.D  
Presidente de Tribunal  
Coordinador del Área Académica Agroforestal

---

Bach. Esteban Díaz Jiménez  
Sustentante

## Índice general

Índice de cuadros .....	iv
Índice de figuras .....	iv
<b>CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN .....</b>	<b>1</b>
<b>1.1. Introducción general.....</b>	<b>1</b>
<b>1.2. Problema de investigación y justificación .....</b>	<b>3</b>
<b>1.3. Teoría temática .....</b>	<b>4</b>
1.3.1. Análisis próximo.....	4
1.3.2. Análisis último .....	6
1.3.3. Determinación del pH.....	6
1.3.4. Extractivos .....	7
1.3.5. Análisis composicional .....	7
1.3.6. Contenido energético .....	8
1.3.7. Proceso de pelletizado.....	10
1.3.8. Aplicación de semillas oleaginosas como aglomerantes .....	11
<b>CAPÍTULO 2. OBJETIVOS GENERALES Y ESPECÍFICOS.....</b>	<b>12</b>
<b>2.1. Objetivo general.....</b>	<b>12</b>
<b>2.2. Objetivos específicos .....</b>	<b>12</b>
<b>CAPÍTULO 3. ARTÍCULO.....</b>	<b>12</b>
<b>3.1. Introducción.....</b>	<b>15</b>
<b>3.2. Metodología .....</b>	<b>16</b>
3.2.1. <i>Diseño experimental.....</i>	16
3.2.2. <i>Características físicas y químicas de las materias primas.....</i>	17
3.2.3. <i>Efecto sobre las propiedades físicas y químicas de la adición de semillas oleaginosas .....</i>	23
3.2.4. <i>Costos de la fabricación de pellets.....</i>	26
<b>3.3. Resultados y discusión .....</b>	<b>26</b>
3.3.1 <i>Características físicas y químicas de las materias primas.....</i>	26
3.3.2. <i>Caracterización del efecto sobre las propiedades físicas y químicas de la adición de semillas oleaginosas .....</i>	33
3.3.3. <i>Costos de la fabricación de pellets.....</i>	43

3.4. Conclusiones .....	49
CAPÍTULO 4. RECOMENDACIONES .....	51
Anexos .....	52
Bibliografía.....	55

## Índice de cuadros

<b>Cuadro 1.</b> Normas aplicadas para la caracterización de las materias primas ..	18
<b>Cuadro 2.</b> Resultados del análisis de las materias primas.....	27
<b>Cuadro 3.</b> Resultados del análisis físico-químico de los tratamientos .....	34

## Índice de figuras

<b>Figura 1.</b> Materias primas utilizadas para el presente estudio: a) broza de café seca, b) semillas enteras de <i>J. curcas</i> , c) semillas molidas de <i>J. curcas</i> y d) semillas de <i>R. communis</i> .....	26
<b>Figura 2.</b> (a) Humedad y (b) contenido de cenizas en porcentajes de las tres materias primas empleadas (Br: broza de café; J: <i>J. curcas</i> ; H: <i>R. communis</i> ). Diferentes letras entre barras representan diferencias estadísticas entre las biomásas (significancia al 95%). .....	27
<b>Figura 3.</b> (a) Densidad aparente y (b) poder calorífico de las tres materias primas empleadas (Br: broza de café; J: <i>J. curcas</i> ; H: <i>R. communis</i> ). Diferentes letras entre barras representan diferencias estadísticas entre las biomásas (significancia al 95%). .....	31
<b>Figura 4.</b> Pellets elaborados a partir de los tratamientos evaluados: a) 100% broza, b) 70% broza y 30% <i>J. curcas</i> , c) 90% broza y 10% <i>J. curcas</i> , c) 90% broza y 10% <i>R. communis</i> , d) 70% broza y 30% <i>R. communis</i> . .....	34
<b>Figura 5.</b> (a) Densidad aparente y (b) durabilidad de los cinco tratamientos evaluados (Br: 100 % broza de café; J10: 10% semillas de <i>J. curcas</i> ; J30: 30% semillas de <i>J. curcas</i> ; H10: 10% de semillas de <i>R. communis</i> ; H30: 30% de semillas de <i>R. communis</i> ). Diferentes letras entre barras representan diferencias estadísticas entre las biomásas (significancia al 95%). .....	37

**Figura 6.** (a) Absorción de humedad y (b) densidad del pellet de los cinco tratamientos evaluados. Diferentes letras entre barras representan diferencias estadísticas entre las biomásas (significancia al 95%)..... 39

**Figura 7.** (a) Contenido de cenizas y (b) poder calorífico de los cinco tratamientos evaluados. Diferentes letras entre barras representan diferencias estadísticas entre las biomásas (significancia al 95%). ..... 40

**Figura 8.** (a) Resistencia a la compresión y (b) carga de compresión vr comportamiento de la deformación en los cinco tratamientos evaluados. Diferentes letras entre barras representan diferencias estadísticas entre las biomásas (significancia al 95%). ..... 42

**Figura 9.** Diagrama del proceso industrial del pelletizado. .... 46

## Capítulo 1. Introducción

### 1.1. Introducción general

Actualmente, varios países han incursionado en la investigación de energías renovables que permitan reducir el consumo de derivados del petróleo. Una de las alternativas con mayor potencial es la biomasa (Proskurina, 2018). Esta fuente de energía, por alimentarse del sol, se considera neutra en emisiones, ya que las emisiones de dióxido de carbono se compensan con la fijación de la biomasa producto de la fotosíntesis de las plantas (Castillo, 2014).

Costa Rica no ha sido la excepción a esta tendencia y en las últimas décadas ha apostado por el desarrollo de alternativas energéticas que reduzcan la dependencia de los combustibles fósiles y contribuyan a la descarbonización de la economía al año 2050 (Mora, 2018). Durante el 2016 la matriz de generación eléctrica del país empleó fuentes renovables como agua, geotermia, eólica, biomasa y solar para producir un 98,21% del total de la energía eléctrica generada. No obstante, la biomasa solo aportó un 0,69% a esta matriz, representado principalmente por el bagazo de caña (Herrera, 2017). Según la más reciente encuesta sobre biomasa realizada en Costa Rica, se cuenta con una oferta de biomasa seca de alrededor de 6 millones de toneladas anuales, tomando en cuenta únicamente los residuos agropecuarios generados (Chacón, Coto, & Flores, 2018).

La producción de café en el país es la actividad agrícola con mayor extensión con 84 133 ha cultivadas, según datos del último Censo Nacional Agropecuario (Instituto Nacional de Estadística y Senso, 2015). En estas áreas de cultivo se producen aproximadamente 510 000 toneladas anuales de fruta fresca (Mora & Ramírez, 2019). Aproximadamente, por cada 2 toneladas de fruta fresca, se produce una de broza de café (Blinová, Sirotiak, Bartošová, & Soldán, 2017). Si bien la pulpa de café se aprovecha de distintas formas, actualmente ninguna de las opciones garantiza un ingreso económico rentable con una reducción de los impactos negativos ambientales generados por un mal manejo. Una alternativa que ha tomado fuerza en los últimos años para el aprovechamiento de residuos agroindustriales, es la

densificación de la biomasa en forma de pellets. Con este proceso no solo se logra mejorar los índices de combustión (aumentando la densidad y por ende el poder calorífico), sino que también ayuda a resolver los problemas asociados a la carga, transporte y almacenamiento del producto debido a la reducción del volumen (Colomer, Gallardo, Arias, & Campos, 2019). El aprovechamiento de esta biomasa a nivel mundial se da principalmente en procesos de generación de energía eléctrica para uso industrial o doméstico. El crecimiento en la demanda de pellets en el mercado mundial ha aumentado a un ritmo del 14% anual. Durante el 2016 Europa demandó un 75% de la producción mundial (el equivalente a 19 Mt) principalmente para generación eléctrica y aprovechamiento en calefacción durante el invierno (Thrän, Peetz, & Schaubach, 2017).

El principal limitante para el aprovechamiento de la broza del café como biomasa es su alto contenido de humedad (entre un 80 - 90%) y su bajo poder calorífico (entre 16 y 17 MJ·Kg<sup>-3</sup>) aún después de su secado y densificación (Cubero, Moya, Valaret, & Tomazello, 2014). Estudios previos han demostrado que la adición de grasas o aceites en los procesos de densificación de biomasa de origen agrícola, tienen un efecto positivo sobre el aumento del poder calorífico y mejora de las propiedades mecánicas y físicas de los pellets (Emami, Tabil, & Adapa, 2015; Lazo, 2018; Marrugo, Valdés, Gómez, & Chejne, 2019). El presente trabajo pretende evaluar una variación de esta línea de investigación mediante la adición de semillas con altos contenidos de aceite a biomazas como la broza de café. En Costa Rica existen dos especies vegetales con semillas que presentan altos contenidos de aceites y que han sido ampliamente estudiados con fines de aprovechamiento energético: *Ricinus communis* (higuerilla o mamona) y *Jatropha curcas* (tempate). Estas dos plantas presentan características relevantes para esta investigación: altos contenidos de aceite en sus semillas, su facilidad para sobrevivir bajo condiciones hostiles y un amplio uso como sombra en plantaciones de café y cercas vivas (Roldan, Hernández, Astorga, & Vargas, 2011). Además, tienen la particularidad de que sus aceites no son comestibles, ya que sus semillas contienen sustancias tóxicas. Una exhaustiva revisión bibliográfica puso en evidencia que trabajos con mezclas de broza de café y semillas oleaginosas no se han realizado a la fecha, por

lo que se propuso analizar el efecto sobre las propiedades físicas y químicas de los pellets producidos a partir de broza de café y mezclas en distintas proporciones de semillas oleaginosas de las especies previamente mencionadas, permitiendo realizar una gestión más sostenible y eficiente de estos residuos agropecuarios.

## **1.2. Problema de investigación y justificación**

Existe un vínculo entre la necesidad del país de generar energía a partir de fuentes renovables y la subutilización de fuentes de biomasa como la broza del café. Actualmente un kilo de broza de café para abono se vende en promedio a ₡12, no obstante, los últimos censos efectuados evidencian que más de la mitad de la producción nacional de este residuo se termina cediendo sin costo alguno (Chacón et al., 2018). La actual subutilización de este residuo se puede modificar mediante la fabricación de pellets para aprovechamiento energético. Una mezcla entre broza de café y semillas oleaginosas podría resultar en una mejoría de las características fisicoquímicas y energéticas. Si se logra demostrar que existe una mejora sustancial mediante esta mezcla, se podrían promover políticas e inversiones para dinamizar la economía rural del país mediante un modelo de negocio novedoso y bajo en emisiones de carbono. El aprovechamiento térmico de la broza permitiría generar hasta 460 TJ por año durante la época seca, periodo en el que se procesa el café y que coincide con el periodo en que la generación hidroeléctrica en el país se reduce.

Desde un punto de vista ambiental, el manejo inadecuado de la broza puede provocar malos olores, atraer insectos o ser el caldo para generar plagas como la mosca del establo (Chacón et al., 2018; Gómez, 2018). En cuerpos de agua, la pulpa de café puede provocar problemas ambientales debido a sus altos contenidos de cafeína y taninos, además del empobrecimiento del oxígeno disuelto, el cual es indispensable en el desarrollo de la flora y fauna acuática (Rattan, Parande, Nagaraju, & Ghiwari, 2015). La turbiedad ocasionada por los contaminantes suspendidos en las aguas obstaculiza el paso de la luz, interfiriendo con la actividad fotosintética de las algas y otras plantas (Alfaro, 1994). Existe una creciente

evidencia de que los compuestos bioactivos de la broza son de preocupación ecotoxicológica. Se han observado anomalías en el desarrollo, el comportamiento y la morfología en gran variedad de organismos acuáticos debido a la exposición a la cafeína y los taninos, incluidas las algas, los erizos de mar y los peces (Janissen & Huynh, 2018). Por otra parte, la producción de fuentes energéticas más limpias como pellets de biomasa, representan una reducción importante en la generación de gases de efecto invernadero. Según el inventario de gases de efecto invernadero del Instituto Meteorológico Nacional (Chacón, Jiménez, Montenegro, Sasa, & Blanco, 2010) el sector agrícola y ganadería representan un 37% de las emisiones del país, del cual una cuarta parte se deben a la cadena de producción del café.

### **1.3. Teoría temática**

Las características químicas de las biomásas empleadas se definieron a partir de su composición, mediante un análisis próximo. Mediante este método es posible determinar el contenido de humedad, cenizas, materia volátil y carbono fijado de cualquier biomasa (Montero et al., 2016). Se aplicó un análisis último o elemental para definir el contenido de carbono, hidrógeno, nitrógeno y azufre (Cai et al., 2017). Además, se llevó a cabo un análisis composicional (celulosa y lignina), de contenido energético (poder calorífico), extractivos (agua fría y caliente y etanol-tolueno) y contenido de aceite en el caso de las semillas oleaginosas. Para el caso de los pellets producidos, se aplicaron además otras pruebas de calidad, según normas internacionales, como: durabilidad mecánica, resistencia a la compresión, absorción de humedad, densidad de los pellets y densidad aparente.

#### **1.3.1. Análisis próximo**

El contenido de humedad, es la cantidad de agua contenida en un kilogramo de materia seca y que generalmente se expresa como un porcentaje (Rincón & González, 2014). La pulpa de café fresca o húmeda presenta valores entre 80% y 90% de humedad y entre 9,93-13,37% en base seca (Cubero et al., 2014; Fierro, Contreras, González, Rosas, & Morales, 2018; Gómez, 2018; Gurram et al., 2016;

Janissen & Huynh, 2018). En el caso de *J. curcas* el contenido de humedad de las semillas ronda entre 5,9% y 8,5% (Murata et al., 2011; Sankar, Kumar, Panda, & Singh, 2016) y entre 7,18% y 8,79% para *R. communis* (Akande, Odunsi, Ojediran, & Taiwo, 2012; Machado, Castilho, & Guimarães, 2016).

El contenido de cenizas se expresa como el porcentaje de residuos que quedan después de la oxidación seca de una muestra a elevadas temperaturas. Cuanto mayor sea el contenido de cenizas, mayor será la emisión de micro aerosoles y humos, así como la formación de escoria y menor será el valor calorífico debido a los restos de la combustión (Merete, Haddis, Alemayehu, & Ambelu, 2014). Un alto contenido de cenizas en determinada biomasa, la hace menos deseable como combustible (Demirbas, 2002). Para el caso de la broza en base seca, se reportan valores de entre 6,55% y 9,5% (Blandón, Dávila, & Rodríguez, 1999; Cubero et al., 2014; Fierro et al., 2018; Janissen & Huynh, 2018; Parascanu, Sandoval-Salas, Soreanu, Valverde, & Sanchez-Silva, 2017). Las semillas de *J. curcas* y *R. communis* reportan contenidos de entre 4,72% y 7,9% (Ortiz, 2012; Sankar et al., 2016) y 2,24% y 5,6% (Akande et al., 2012; Kalogiannis, Stefanidis, Michailof, & Lappas, 2016; Vasco et al., 2017), respectivamente.

La materia volátil es la fracción de materia (incluida la humedad) que se liberan de la biomasa cuando se calienta a altas temperaturas en ausencia de oxígeno (Cai et al., 2017). Un alto contenido de volátiles promueve la ignición a bajas temperaturas, aumentando la eficiencia del proceso de combustión (Montero et al., 2016). La bibliografía consultada reporta para la broza valores entre 69,48% y 83% (Castillo, 2014; Parascanu et al., 2017). Odetoeye et al., (2018) y Sankar et al., (2016) señalan en sus estudios que *J. curcas* presenta contenidos de materia volátil en el rango de 82%, dato similar al reportado por Sricharoenchaikul & Atong, (2009) quienes señalan un contenido de materia volátil de 79,2%. Los reportes de materia volátil para *R. communis* son de entre 65,21% y 77,6% (Santos, Magriotis, Saczk, Fássio, & Vieira, 2015; Sokoto & Bhaskar, 2018).

El carbono fijado es el remanente que queda después de extraer la humedad, la materia volátil y calcular el contenido de cenizas de una muestra. Según los datos

obtenidos por Parascanu et al., (2017) el porcentaje de carbono fijado en broza de café es de 21,23%. Para *J. curcas* el dato obtenido por Sricharoenchaikul & Atong, (2009) es de 18,86% y de 2,33% para *R. communis* según la información recabada en la investigación de Sokoto & Bhaskar, (2018).

### **1.3.2. Análisis último**

Este análisis consiste en la medición del contenido de carbono, hidrógeno, oxígeno, nitrógeno y azufre de cualquier materia prima. Este proceso se realiza empleando analizadores elementales que llevan a cabo una combustión en una atmósfera controlada de una muestra previamente pesada. En el proceso de combustión, el carbono se convierte en CO<sub>2</sub>; hidrógeno a H<sub>2</sub>O; nitrógeno a NO<sub>x</sub> y el azufre a SO<sub>2</sub>. El contenido de carbono, hidrógeno, nitrógeno y azufre se puede determinar mediante la detección de los gases liberados (Cai et al., 2017).

Cruz et al., (2012) citaron en su trabajo que la pulpa de café seca presenta contenidos de estos elementos en proporciones de 43,7% para C, 8% para H, 1,81% para N y 38,3% para O. Otros datos al respecto fueron publicados por Parascanu et al., (2017), quienes indican valores de 43,33% para C; 5,6% para H; 2,5% para N y 0,35% para S. Estudios efectuados en este tema para las especies de semillas oleaginosas tratadas en este trabajo, han señalado contenidos de estos elementos en los siguientes porcentajes, para *J. curcas*: C 56,55 %; H 4,23%; N 4,68%; O, 33,46% y S 1,08% (Sankar et al., 2016). Para el caso de *R. communis* los datos recabados indican valores de: 44,2% a 48,96% para el C, 5,5% a 7,4% para el H, 32,6% a 42,61% para el O, 2,79% a 7% para el N y 0,12% a 0,61% para el S (Mishra & Mohanty, 2018; Sokoto & Bhaskar, 2018).

### **1.3.3. Determinación del pH**

El potencial de hidrógeno es una medida convencional que permite expresar la concentración de iones hidrógeno de manera simplificada. Su determinación es importante en el caso de broza considerando el alto porcentaje de este residuo que es empleado como abono orgánico. Valores cercanos a 5 son considerados como

ácidos, lo que puede ocasionar problemas de toxicidad en suelos si no se maneja adecuadamente. Algunos autores como Fierro et al., (2018) y Rodríguez, (2013) señalan que la broza de café ronda en valores de pH entre 4,2 a 4,6.

#### **1.3.4. Extractivos**

Los extractivos o extraíbles incluyen sustancias presentes en el tejido vegetal que pueden ser separados mediante solventes como etanol-tolueno o agua fría y caliente. Estos métodos permiten extraer sustancias tales como: ceras, grasas, resinas, gomas, azúcares, colorantes y almidones de cualquier biomasa de origen vegetal. Estos compuestos no son componentes estructurales de la biomasa y comúnmente oscilan entre un 3% a 7% del peso seco de la misma. Algunos son importantes por las características que le brindan a la materia como olor, color, resistencia a la descomposición y combustibilidad (Döring, 2013).

En el presente trabajo se realizaron extracciones empleando tratamientos con solventes de agua fría y caliente que extraen principalmente taninos, gomas, azúcares, almidones y colorantes. Además, se llevó a cabo un procedimiento para establecer el porcentaje de extractivos en etanol-tolueno. Demirbas (2009) señaló que el solvente etanol-tolueno determina principalmente el contenido de ceras, grasas, resinas y aceites, las cuales son fuentes importantes para iniciar y generar calor (citado en Bonilla & Moya, 2014).

La broza de café presenta cantidades importantes de taninos, azúcares y colorantes en su composición. Bressani et al., (1978) señaló en su investigación contenidos en la pulpa de taninos entre 1,8 y 8,5% y hasta 12,4% de azúcares, todos importantes extractivos que se obtienen mediante la exposición a agua caliente y fría.

#### **1.3.5. Análisis composicional**

La biomasa lignocelulósica está compuesta en un 95% por tres biopolímeros: celulosa, lignina y hemicelulosa (Döring, 2013). Estos carbohidratos se encuentran asociados entre ellos y varían en su concentración según la biomasa lignocelulósica

estudiada (Cai et al., 2017). La pared celular de la planta provee soporte estructural y le permite mantenerse estable en el suelo. Los componentes de la pared celular se subdividen típicamente en carbohidratos y lignina, los carbohidratos principalmente son fibras de celulosa y hemicelulosa, los cuales le proveen resistencia a la pared celular. Por otra parte, la lignina tiene una función aglutinante, manteniendo las fibras unidas (Castillo, 2014).

La celulosa, polímero más abundante de la tierra, es representado generalmente por la fórmula  $(C_6H_{10}O_5)_n$  y compuesto principalmente por moléculas más pequeñas de glucosa. A pesar de ser un carbohidrato, no es digerible para los seres humanos. Como referencia, en madera representa entre un 40-44% del peso seco (Basu, 2018). Para el caso de la broza se reportan contenidos que van desde un valor máximo de 63% hasta un valor mínimo de 17,1 % (Castillo, 2014). Las semillas de *J. curcas* reportan contenidos de 15,31% (Gottipati & Mishra, 2011), mientras que *R. communis* de 46,95% (Santos et al., 2015).

La lignina es un polímero aromático de estructura tridimensional bastante complejo, ramificado y amorfo. Es el segundo polímero más abundante del planeta, solo superado por la celulosa y el tercer componente en importancia de la biomasa lignocelulósica con valores de entre 18 y 25% para madera y 25 a 35% para plantas herbáceas (Basu, 2018). Para el caso de la lignina en broza se registran valores de 12,2% a 26% (Castillo, 2014). Las semillas de *J. curcas* contienen un 23,79% (Gottipati & Mishra, 2011) y las de *R. communis* 32,31% (Santos et al., 2015).

En el presente estudio no se incluye el contenido de hemicelulosa ya que, dada la naturaleza de esta fibra, resultó muy difícil su determinación en el laboratorio.

### **1.3.6. Contenido energético**

El poder calorífico de determinada biomasa se define como el contenido de energía o unidades de calor que son liberadas durante un proceso de combustión en presencia de oxígeno, en un recipiente cerrado y con una masa constante (Cai et al., 2017; García, 2011).

Para el caso particular de las biomásas, usualmente el contenido energético es dado en términos de energía contenida por unidad de masa (Montero et al., 2016) y que puede ser expresado en calorías o Julios. Una caloría equivale a 4,1868 Julios, que es aproximadamente la energía requerida para aumentar un grado de temperatura un gramo de agua a 15°C (ASTM, 2019a).

El potencial de la broza del café para su aprovechamiento en procesos termoquímicos ha sido analizado en varias investigaciones. Rojas, Jiménez & Díaz (como se citó en Castillo, 2014), determinaron que la utilización de la broza como combustible es energéticamente viable. Concluyen en su trabajo que emplear un 30% del volumen de la broza es suficiente para su secado, quedando un 70% de broza seca para su aprovechamiento. Trabajos más recientes han evaluado el poder calorífico de la pulpa de café empleando bombas calorimétricas adiabáticas y reportan valores de entre 16,2 y 17,1 MJ·Kg<sup>-1</sup> (Gómez, 2018; González, Hernández, & Menjívar, 2016; Parascanu et al., 2017).

El aspecto limitante más importante a considerar para el aprovechamiento de la pulpa es su alto contenido de humedad. Este es un aspecto primordial, teniendo en consideración que, altos contenidos de humedad en el material requieren de mayor cantidad de energía para la evaporación de los excesos de agua (Merete et al., 2014). En consecuencia, altos contenidos de humedad reducen significativamente el poder calorífico de la broza de café (Castillo, 2014). Cubero et al (2014) señalaron en su investigación que el método más eficiente de secado de la broza es el uso de cámaras de aire caliente, alcanzando un valor final de 18% en un periodo de 58 horas a 80°C. Otras alternativas energéticas de fuentes renovables como la solar, requirieron de periodos de hasta 424 horas para lograr porcentajes de humedad de 11%. Torres et al (2016) reportaron en su trabajo reducciones de humedad de 18% en periodos de un 4,6 horas de exposición al sol.

El poder calorífico reportado para las semillas de tempate está entre 24,84 y 25 MJ·kg<sup>-1</sup> (Bedassa, 2016; Nallathambi, 2009; Ružbarský, Miroslav, Marecek, & Geršl, 2014). En el caso de *R. communis* se registra un valor de 22,75 MJ·kg<sup>-1</sup> (Santos et al., 2015).

### 1.3.7. Proceso de pelletizado

El pelletizado es un procedimiento mediante el cual se aglomeran y densifican partículas de biomasa lignocelulósica o residuos agrícolas en pequeños cilindros comprimidos (Castillo, 2014; Colomer et al., 2019; Lazo, 2018). El tamaño de estas partículas es muy variable y depende de la materia prima empleada y el uso que se desea dar al producto obtenido, pero por definición un pellet tiene un largo de entre 5 - 40 mm y un diámetro < 25 mm. Diámetros entre 6 y 8 mm son los más utilizados para sistemas de aprovechamiento térmico (Döring, 2013).

Para evaluar las características fisicoquímicas de los pellets se aplica un análisis próximo y último como el utilizado para las materias primas. Otras pruebas adicionales para evaluar la calidad de estos materiales son: absorción de humedad (que indica el nivel de absorción de agua que le proporcionaría la lluvia o los ambientes altos en humedad a los pellets), durabilidad mecánica (que predice el porcentaje de polvos liberados durante el manejo mecánico), resistencia a la compresión (máxima carga que puede soportar un pellet antes de romperse o agrietarse), densidad del pellet y densidad aparente. La estandarización de estos conceptos y procedimientos ayudan a eliminar las barreras comerciales entre los interesados (Hiegl, Janssen, & Pichler, 2009).

Cubero et al (2014) evaluaron las características de pellets fabricados a partir de broza seca de café. Para el parámetro de contenido de cenizas se aplicó la norma ASTM D-1102-84, resultando que los pellets contienen un 6,74%. El contenido de humedad en base seca, evaluado en este mismo estudio bajo la norma ASTM D-4442 fue de 10,1%. Otros resultados de características físicas también consideradas en esta investigación fueron: densidad evidente ( $600 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ ), densidad aparente ( $1\ 300 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ ), absorción de humedad (8,1%), durabilidad mecánica (75,54%) y resistencia a la compresión de 3,28 MPa. El poder calorífico se evaluó aplicando el estándar ASTM D-5865 obteniendo un valor de  $11,59 \text{ MJ}\cdot\text{Kg}^{-1}$ . Otro estudio para evaluar el efecto de la densificación de cáscara de café fue conducido por Faria et al., (2016). En esta investigación se reportó que la cáscara de café presentó un 9,5% de humedad, una densidad aparente de  $118 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$  y una

densidad de la biomasa ya pelletizada de  $708,9 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ . El poder calorífico obtenido fue  $15,84 \text{ MJ}\cdot\text{Kg}^{-1}$ . Los valores de durabilidad de los pellets y resistencia a la compresión reportados fueron, 94,51% y 3,24 MPa, respectivamente.

### **1.3.8. Aplicación de semillas oleaginosas como aglomerantes**

Una alternativa para mejorar las propiedades de los pellets es la adición de aglomerantes. Tales sustancias pueden ser de origen natural y estar presente en la misma biomasa, como es el caso de la lignina o el agua; las cuales bajo presión son expulsadas de la pared celular, estabilizando la unión de las partículas (Marrugo et al., 2019). Olugbade, Ojo, & Mohammed (2019) señalan que, además de la función de aumento de la densidad, los aglomerantes tienen influencia sobre otras propiedades como la durabilidad y poder calorífico. Si el aglomerante resulta ser una sustancia adicionada para tales propósitos, debe cumplir algunos requisitos básicos como: ser económicamente viable, no afectar las características físico-químicas de la biomasa o materia prima, no generar impactos ambientales y preferiblemente ser libre de emisiones.

En base a su composición, un aglomerante puede ser orgánico o inorgánico (Olugbade et al., 2019). Cultivos con semillas oleaginosas como las especies *Jatropha curcas* y *Ricinus communis* reúnen las características antes señaladas. Estas dos plantas arbustivas de la familia de las Euphorbiaceas, se caracterizan por los altos contenidos de aceite en sus semillas. Los valores rondan entre un 35 % y 44,1 % para *J. curcas* (Campuzano, Ríos, & Cardeño, 2016; Jingura & Kamusoko, 2018; Wakandigara, Nhamo, & Kugara, 2013) y un 49 a 51% para *R. communis* (Sánchez, Castañeda, & Castañeda, 2016; Vasco et al., 2017). La estimación del contenido de aceite puede variar según el método de extracción que se utilice. Las semillas de ambas especies no son comestibles, por la presencia de sustancias tóxicas como el éster de forbol en el caso de *J. curcas* (Wakandigara et al., 2013) y la ricina y ricinina en *R. communis* (Makhlouf, Hamrouni, Khouja, & Hanana, 2010).

## **Capítulo 2. Objetivos generales y específicos**

### **2.1. Objetivo general**

Analizar el efecto de la adición de semillas de *Ricinus communis* y *Jatropha curcas* sobre las características físicas y químicas de los pellets fabricados a partir de broza de café.

### **2.2. Objetivos específicos**

- Determinar las características físicas y químicas de las materias primas utilizadas para la fabricación de pellets de broza de café con semillas oleaginosas.
- Caracterizar el efecto sobre las propiedades físicas y químicas de la adición de semillas oleaginosas a los pellets fabricados a base de broza de café.
- Calcular los costos de la fabricación de pellets con la adición de semillas oleaginosas para modelos de beneficiado de gran escala en el país.

### **2.3. Hipótesis**

La adición de semillas de *Ricinus communis* y *Jatropha curcas* a los pellets fabricados a partir de broza de café mejora sus características físico-químicas y energéticas.

## **Capítulo 3. Artículo**

El presente trabajo de investigación fue realizado siguiendo los lineamientos para la modalidad de artículo. Por tal motivo, el formato utilizado en este apartado será el de una revista indexada, con el fin de posteriormente presentarlo para su publicación.

**Análisis del efecto de la adición de semillas de *Jatropha curcas* y *Ricinus communis* sobre las características físicas y químicas de pellets fabricados a partir de la broza de café**

**Palabras Claves**

Café, broza, pellets, semillas oleaginosas

**Resumen**

El presente trabajo analizó el efecto de la adición de semillas de *Ricinus communis* y *Jatropha curcas* sobre las características físicas y químicas de los pellets fabricados a partir de broza de café. Para su adecuado aprovechamiento posterior, se caracterizaron las materias primas empleadas para determinar sus propiedades fisicoquímicas y potencial energético. Tres tipos de muestras fueron evaluadas: Br (broza de café seca), J (semillas molidas de *J. curcas*) y H (semillas enteras de *R. communis*). Los valores obtenidos demostraron los siguientes resultados: Br: Mc-8,22%, Ac-5,59%, CV-16,79 MJ·Kg<sup>-1</sup>; J: Mc-7,26%, Ac-3,62%, CV-20,97 MJ·Kg<sup>-1</sup>; H: Mc-4,42%, Ac-3,12%, CV-28,53 MJ·Kg<sup>-1</sup>. Se determinó un contenido de aceite de 51,6% para *J. curcas* y 58,48% para *R. communis*.

Se llevaron a cabo cinco tratamientos: broza con semillas de *R. communis* en proporciones de 10 y 30%, broza con semillas de *J. curcas* en proporciones de 10 y 30% y un testigo con pellets de 100% broza. El poder calorífico de los pellets de broza fue de 16,79 MJ·Kg<sup>-1</sup>, el valor más alto se presentó en el tratamiento H30 con 19,55 MJ·Kg<sup>-1</sup>. El contenido de cenizas aumentó con la adición de semillas oleaginosas a los pellets siendo H30 el tratamiento más alto con un 6,91%. La absorción de humedad resultó mayor en los pellets de broza con un 16,77%, frente a los pellets con semillas oleaginosas que presentaron valores entre 10,6 y 11,5%. La resistencia a la compresión y durabilidad de los pellets se redujo con la adición de las semillas de oleaginosas a los pellets de broza.

***Analysis of the effect of the addition of *Jatropha curcas* and *Ricinus communis* seeds on the physical and chemical characteristics of pellets made from coffee pulp***

**Key words**

Coffee, pulp, pellets, oilseeds

**Abstract**

The present work analyzed the effect of the addition of seeds of *Ricinus communis* and *Jatropha curcas* on the physical and chemical characteristics of the pellets made from coffee pulp. Within the determination of most suitable subsequent utilization, the samples were subjected to the analysis of their basic physicochemical parameters and energy potential. Three types of samples were evaluated: Br (dried coffee pulp), J (ground seeds of *J. curcas*) and H (whole seeds of *R. communis*). The values obtained showed the following results: Br: Mc-8.22%, Ac-5.59%, CV-16.79 MJ · Kg<sup>-1</sup>; J: Mc-7.26%, Ac-3.62%, CV-20.97 MJ·Kg<sup>-1</sup>; H: Mc-4.42%, Ac-3.12%, CV-28.53 MJ · Kg<sup>-1</sup>. The determined oil content was 51.6% for *J. curcas* and 58.48% for *R. communis*.

Five treatments were carried out, the coffee pulp with seeds of *R. communis* in proportions of 10 and 30%, the pulp with seeds of *J. curcas* in proportions of 10 and 30% and a control with pellets of 100% coffee pulp. The calorific value of the pulp pellets was 16,79 MJ·Kg<sup>-1</sup>, the highest value was presented in the H30 treatment with 19,55 MJ·Kg<sup>-1</sup>. The ash content increased with the addition of oilseeds to the pellets, with H30 being the highest treatment with 6.91%. Moisture absorption was higher in pulp pellets with 16.77%, compared to oilseed pellets that showed values between 10.6 and 11.5%. The compressive strength and durability of the pellets was reduced with the addition of oilseeds to the pulp pellets.

### 3.1. Introducción

Costa Rica es un país con abundantes fuentes de energía renovable, entre las que destaca la biomasa, considerando su abundancia y carácter renovable. Dentro de la amplia gama de opciones que ofrece este sector, los residuos biomásicos agrícolas presentan una alternativa que podría generar importantes beneficios socioeconómicos y ambientales en las zonas rurales. El sector cañero y cafetalero del país son de los más interesados en el aprovechamiento y conversión energética de residuos agrícolas (Chacón et al., 2018). El 9% de los gases de efecto invernadero a nivel nacional son generados por la industria del café (Gómez, 2018). Se estima que se producen 0,68 toneladas de residuos por cada tonelada de café procesado, tomando en consideración la generación de broza y cascarilla (Janissen, & Huynh, 2018).

Cruz, (2014) menciona que existen tres métodos para el tratamiento postcosecha del grano de café: seco, semiseco y húmedo. En Costa Rica predomina el uso del método húmedo (Castillo, 2014). En este proceso, la pulpa es el residuo que se produce en mayor volumen, representando un 43,5 % sobre base húmeda (Montilla et al., 2008; Rodríguez & Zambrano, 2010). Esto equivale a una generación por año en el país de alrededor de 212 000 toneladas de broza fresca. La broza o pulpa, cubierta más externa del fruto del café, se compone de la unión del exocarpio, mesocarpio y parte del parénquima (Cruz, 2014; Gómez, 2018).

Considerando un contenido de humedad de la broza fresca de entre 80 y 90%, en el país se generan alrededor de **41 000** toneladas en peso seco. Actualmente alrededor del 90% de este residuo lignocelulósico es empleado para la fertilización de suelos. El otro 10% restante se divide en 6% para alimentación de ganado y 4% que se almacena o no se le da aprovechamiento alguno (Chacón et al., 2018). Como alimento animal los resultados han sido pobres debido a los altos contenidos de cafeína, taninos y abundante potasio, lo que limita su aprovechamientos en dietas animales a porcentajes no mayores al 10% (Cruz, Berruti, Briens, & Ferrante, 2012).

## 3.2. Metodología

La investigación se desarrolló en dos lugares, el trabajo de densificación de las biomasas se llevó a cabo en el Instituto del Café (ICAFE), ubicado en Santa Bárbara de Heredia. Respecto a la evaluación de las materias primas y los pellets obtenidos, se realizó en las instalaciones del laboratorio de la Escuela de Ingeniería Forestal del Campus Tecnológico Central, sede Cartago, ubicado en las coordenadas planas latitud norte 9°50'59'' y longitud oeste 83°54'40''.

### 3.2.1. Diseño experimental

Esta investigación empleó la recolección de datos basada en la medición numérica y análisis estadísticos para evaluar procesos y realizar la toma de decisiones con base en los resultados obtenidos. Este enfoque se orienta a la descripción, predicción y explicación de los problemas y busca describir y explicar los cambios y movimientos entre las variables, mediante la medición de las mismas para su posterior análisis estadístico e interpretación de los resultados obtenidos (Hernández, Fernández y Baptista, 2014).

El trabajo de laboratorio se dividió en dos etapas, una primera que permitió caracterizar las materias primas a emplear y la segunda que culminó con la fabricación de los pellets bajo la metodología definida para el alcance de los objetivos. Se realizaron baches de 10 kg de pellets por tratamiento: Br - 100% broza de café (testigo), H10 - 90% broza más 10% semillas de *R. communis*, H30 - 70% broza más 30% de semillas de *R. communis*, J10 - 90% broza más 10% semillas de *J. curcas* y J30 - 70% broza más 30% de semillas de *J. curcas*.

La decisión de los porcentajes de mezcla se tomó considerando en primer lugar el costo económico de las semillas oleaginosas y segundo, los volúmenes de producción o rendimientos por unidad de área de estas mismas especies (Roldan et al., 2011). Proporciones de mezclas demasiado altas necesitarían grandes cantidades de semillas, lo que elevaría los costos y requerimientos de área de siembra o densidades en las plantaciones más elevadas. Además, a raíz de

pruebas preliminares, se logró determinar qué mezclas por encima del 30% aportan un volumen excesivo de aceite, lo que afecta de manera negativa ciertas propiedades físicas y mecánicas de los pellets.

### **3.2.2. Características físicas y químicas de las materias primas**

El análisis de las materias primas es parte importante de este proceso, ya que proporciona información crítica sobre las biomásas permitiendo una mejor comprensión e interpretación de los resultados. Respecto a la obtención de los materiales empleados, la broza provino del ICAFE, como un residuo generado a partir de procesos de beneficiado llevados a cabo por este Instituto. La misma fue previamente deshidrata en un secador de flujo de aire caliente. Las semillas de *J. curcas* se obtuvieron de un proyecto desarrollado de manera conjunta entre FAO y el Instituto de Desarrollo Rural, en los cantones de Buenos Aires y Coto Brus de Puntarenas, Costa Rica. Esta plantación se inició desde el 2012 con variedades provenientes de bancos de germoplasma de la Estación Experimental Fabio Baudrit de la Universidad de Costa Rica y el Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza. La recolección de las semillas se llevó a cabo durante diciembre del 2018. Respecto a las semillas de *R. communis*, se consiguieron en la estación experimental Fabio Baudrit, ubicada en la Garita de Alajuela. Estas semillas fueron colectadas de una plantación de 8 meses de edad, durante el mes de marzo del 2019. Ambas especies fueron descascaradas empleando equipos ubicados en la Estación Fabio Baudrit.

En el caso particular de *J. curcas*, al considerar la dureza de la testa o cáscara de la semilla, se decidió realizar un pretratamiento previo al pelletizado. La semilla se quebró empleando un picador Nogueira DPM-2 que permitió reducir el tamaño de la partícula a fragmentos de 2-4 mm (Figura 1). En el caso de *R. communis* este proceso no fue necesario ya que la cáscara de esta semilla es blanda y fácil de quebrar durante el pelletizado.

Para la caracterización química de las materias primas se debió moler a un tamaño de partícula aún menor los materiales, de manera que fuera posible tamizar las muestras en un tamiz número 40 ( $425\mu\text{m}$ ), y reteniendo la muestra a

utilizar en un tamiz número 60, que retiene partículas mayores a  $250\mu\text{m}$ . Las normas y análisis aplicados se resumen en la Cuadro 1.

Cuadro 1. Normas aplicadas para la caracterización de las materias primas

Norma aplicada	Parámetro	Breve descripción
ASTM D-4442	Contenido de humedad	Se pesaron 10 muestras al azar de 10 gr cada una y se colocaron en la estufa por 48 horas a una temperatura de $60^{\circ}\text{C}$ . Se registró el peso final.
ASTM D-1102-84	Cenizas	Se colocó una muestra de 1 gr en la mufla a $800^{\circ}\text{C}$ por 60 minutos, se dejó enfriar y se pesó. Se repitió la prueba con 3 muestras al azar.
E872-82	Volátiles	Se colocó una muestra de 1 gr en la mufla a $950^{\circ}\text{C}$ por 6 minutos. Se dejó enfriar y se procedió a registrar el peso. Se repitió la prueba con 3 muestras al azar.
ASTM D-1107	Solubles en etanol –tolueno	Se utilizó en un extractor Soxhlet™ 2043 System manufacturado por Foss Tecator, bajo las siguientes condiciones: tiempo de extracción 4 horas, temperatura límite $210^{\circ}\text{C}$ , temperatura del plato $140^{\circ}\text{C}$ , tiempo de enjuague 1 hora. Se repitió la prueba con 3 muestras al azar.
ASTM D-1110	Solubles en agua caliente	Las muestras se colocaron en baño maría en un aparato de reflujo por 3 horas. Se repitió la prueba con 3 muestras al azar.
ASTM D-1110	Solubles en agua fría	En un erlenmeyer se agregó agua destilada fría y se mantuvo en baño maría a $23^{\circ}\text{C}$ por 48 horas, se realizaron agitaciones periódicas. Se repitió la prueba con 3 muestras al azar.
ASTM D-5865	Poder calorífico	Se colocó una pastilla de aproximadamente 0.010 g en la bomba calorimétrica de cada material a evaluar. Se repitió la prueba con 5 muestras al azar.

### *Análisis próximo*

La medición del contenido de humedad de las materias primas se hizo según el estándar ASTM D-4442 (ASTM, 2016), colocando 10 muestras de 10 g cada una en un horno a  $60^{\circ}\text{C}$  por 24 horas. La medición de la masa inicial y final se realizó en una balanza digital de 2 decimales. Esta variación a la norma se realizó considerando no afectar el contenido de aceite, exponiendo la muestra a temperaturas muy elevadas por periodos muy cortos de tiempo. El valor final se calculó mediante la ecuación:

$$\text{Humedad (\%)} = \frac{A-B}{A} * 100 \quad (1)$$

Donde A en la muestra verde y B la muestra seca.

El porcentaje de contenido de cenizas se realizó según el estándar ASTM D-1102-84 (ASTM, 2013a), colocando una muestra de 1 g en una cápsula de porcelana dentro de una mufla a  $800 \pm 25$  °C, durante 60 minutos. Posteriormente se dejó enfriar la muestra en un desecador durante 24 horas. Se registró el peso de la muestra antes y después del calentamiento, en una balanza analítica con una precisión de cuatro decimales. Se llevaron a cabo tres repeticiones. Finalmente se utiliza la ecuación (2) para determinar el contenido de cenizas en base seca.

$$\text{Cenizas (\%)} = \frac{M_f}{M_i} * 100 \quad (2)$$

Donde  $M_f$  es el peso de la masa final, después del calentamiento y  $M_i$  es el peso de la masa antes del procedimiento.

Para la medición de la materia volátil se aplicó el estándar E872-82 (ASTM, 2019b), que establece que se debe preparar una muestra de 1 g, se precalienta por 5 minutos y luego se coloca por seis minutos a 950 °C, en ausencia de oxígeno. Luego, se saca la muestra, se enfría en un desecador y se pesa. La pérdida de peso debido a la volatilización es el contenido de materia volátil. Este procedimiento se repitió 3 veces. Para calcular la pérdida de materia volátil se aplica la ecuación (3).

$$\text{Materia volátil (\%)} = \frac{M_i - M_f}{M_i} * 100 \quad (3)$$

Donde  $M_f$  es el peso de la masa final, después del calentamiento y  $M_i$  es el peso de la masa antes del procedimiento.

El carbono fijado se obtiene de restar el porcentaje de cenizas, humedad y materia volátil a la masa inicial. Se utiliza para esto la ecuación:

$$\text{CF (\%)} = 100 - (\text{MV} + \text{Ash} + \text{MC}) \quad (4)$$

Donde CF es el porcentaje de carbono fijado, MV materia volátil, Ash el contenido de cenizas y MC el contenido de humedad (Merete et al., 2014).

### *Análisis último*

Los contenidos de carbono, hidrógeno, nitrógeno y azufre de las materias primas se analizaron mediante el uso del equipo marca Elementar, modelo Vario EL CUBE. Para esto se colocaron 3 muestras seleccionadas al azar de los materiales retenidos en un tamiz N° 60 y secados de 5 mg. Estos se colocan en cápsulas de estaño que fueron colocadas luego dentro del equipo para su análisis.

### *Extractivos*

La determinación de los extractivos fue realizada por triplicado. En agua caliente y fría se empleó la norma ASTM D-1110 (ASTM, 2013b), se colocaron 2 g de muestra retenidos en un tamiz N° 60, libres de humedad. En el caso de agua caliente la muestra se colocó en 100 ml de agua destilada. El recipiente se puso en un baño de agua hirviendo durante 3 horas. Posteriormente el material se filtra, lava y seca y se determina la cantidad de material soluble. En el caso de agua fría, la muestra de 2 g se colocó en 300 ml de agua destilada, dejándola reposar a una temperatura de 23 °C por 48 horas. Posteriormente el material se filtra, se lava, se seca y se determina la cantidad de material soluble.

Para el reporte de los porcentajes de extractivos se utiliza la siguiente fórmula:

$$\text{Extractivos (\%)} = \frac{W_1 - W_2}{W_1} * 100 \quad (5)$$

Dónde:  $W_1$  es la masa inicial de la muestra y  $W_2$  es la masa de la muestra luego de los tratamientos y secada.

Los extractivos en etanol tolueno se obtuvieron por triplicado siguiendo la norma ASTM D-1107 (ASTM, 2013c). Para este tratamiento se empleó el equipo automatizado para extracción Soxhlet 2043, marca Foss. Se prepararon 2 g, tamizados y secos de cada material evaluado. Las muestras se envolvieron en papel filtro y se colocaron dentro de los dedales en el equipo de extracción. Las muestras se colocaron en 50 ml de la solución etanol tolueno, en proporciones de 1000 ml de etanol y 427 ml de tolueno, a 126 °C durante 4 horas, dejando

escurrir luego por una hora adicional. El material se secó en el horno por 24 horas a 100 °C. El cálculo del porcentaje de extractivos en la muestra de compuestos solubles en etanol tolueno se calculó mediante la fórmula:

$$\text{Extractivos (\%)} = \frac{W_1 - W_2}{W_1} * 100 \quad (6)$$

Dónde:  $W_1$  es la masa inicial de la muestra y  $W_2$  es la masa de la muestra luego de los tratamientos y seca.

#### *Carbohidratos estructurales*

La determinación de lignina y celulosa se realizó por triplicado en el laboratorio siguiendo las normas propuestas por la Technical Association of the Pulp and Paper Industry (TAPPI). En el caso de la lignina se aplica la norma T 222 om-2 que permite hidrolizar los carbohidratos presentes en maderas o pulpas permitiendo solubilizarlos en ácido sulfúrico. La lignina, insoluble en este ácido, se filtra, se seca y se pesa. La determinación del contenido de este carbohidrato complejo se realiza mediante la siguiente ecuación:

$$\text{Contenido de lignina (\%)} = \frac{M_f}{M_i} * 100 \quad (7)$$

Donde  $M_f$  es la masa final obtenida y  $M_i$  es la masa al inicio del proceso.

En el caso del contenido de celulosa, se aplicó la norma TAPPI-17 wd-70. En este procedimiento se utilizó una disolución de etanol al 95% y ácido nítrico al 65% en una relación de 2:1. Luego de calentar la muestra, se lava, se filtra y se seca. Para el cálculo del porcentaje de celulosa se aplicó la fórmula:

$$\text{Contenido de celulosa (\%)} = \frac{M_f}{M_i} * 100 \quad (8)$$

Donde  $M_f$  es la masa final obtenida y  $M_i$  es la masa al inicio del proceso.

#### *Determinación del pH*

El contenido de pH de las materias primas se determinó mediante el uso de un pHmetro, preparando 1 g de cada muestra macerado y agregando de 5 ml de agua destilada. Se efectuaron 3 repeticiones por cada materia prima.

### *Densidad aparente*

La densidad aparente se determinó tomando de manera aleatoria una muestra de biomasa en un beaker de 500 ml. Se realizaron 10 repeticiones para cada materia prima. Se pesó la muestra y se calculó la densidad mediante la relación entre peso y volumen ocupado por cada una.

### *Determinación del poder calorífico*

Se analizó el poder calorífico de cada materia prima, siguiendo el estándar ASTM D-5865. Se empleó una bomba calorimétrica modelo 6725 marca Parr Semi Calorimeter. Inicialmente se midieron 15 cm de alambre de platino (filamento de ignición), el cual fue conectado a los electrodos de la bomba y puesto en contacto con el crisol que contenía el material (este inicialmente fue molido, tamizado y pesado). Luego se presurizó la bomba a 30 atmósferas de presión con oxígeno puro y se conectó a un instrumento de ignición. Posteriormente la bomba se puso en un recipiente con 450 ml de agua y fue introducido en una camisa adiabática, conectada a un termómetro digital. Una vez transcurridos los 15 minutos de combustión y estabilización de la muestra, se tomó el dato de incremento neto reportado por el calorímetro. La calibración de la bomba se realizó utilizando una pastilla de ácido benzoico. Se llevaron a cabo 5 repeticiones para cada caso. El poder calorífico se calculó mediante la aplicación de la ecuación:

$$\text{Poder calorífico (kJ} \cdot \text{kg}^{-1}) = \frac{(\Delta t)(w) - f}{m} \quad (9)$$

Donde, Pc es el poder calorífico,  $\Delta t$  es el incremento en la temperatura,  $w$  la energía equivalente,  $f$  el factor de corrección debido al fusible y  $m$  la masa de la pastilla de la biomasa evaluada.

### *Contenido de aceite de las semillas*

El contenido de aceite de las semillas empleadas en el presente trabajo se determinó con el apoyo del Centro para Investigaciones en Granos y Semillas (CIGRAS), mediante la aplicación de la ecuación de Cromarty (Cromarty, Ellis & Roberts, 1982). En su investigación, Cromarty et al., determinaron que existe una

estrecha relación, aunque no lineal, entre el contenido de humedad de cualquier semilla y la humedad relativa, concluyendo que estas se relacionan estrechamente con el contenido de aceite. De esta manera, a mayor contenido de aceite, menor será el contenido de humedad de equilibrio. De modo que, si se cuantifican los demás parámetros de la ecuación, se podría determinar de forma indirecta el contenido de aceite de una semilla. Esta ecuación permite calcular el contenido neto de aceite de cualquier semilla despejando la siguiente fórmula:

$$M_e = \frac{\left( (1 - D_o) \times \sqrt{-440 \times \ln(1 - R)} \right)}{1.1 + \left( \frac{T}{90} \right)} \quad (10)$$

Donde  $M_e$  es el contenido de humedad de equilibrio,  $D_o$  el contenido de aceite de la semilla,  $R$  la humedad relativa y  $T$  la temperatura del aire. Es importante recalcar que el método de cuantificación del contenido de humedad de equilibrio va a influir significativamente en el cálculo del contenido de aceite.

### **3.2.3. Efecto sobre las propiedades físicas y químicas de la adición de semillas oleaginosas**

El proceso de densificado de la broza de café con las distintas proporciones de semillas oleaginosas se llevó a cabo utilizando la pelletizadora ubicada en el ICAFE, modelo ZLSP300B. Este equipo fue fabricado por Anyang Gemco Energy Machinery, con una potencia nominal de 22 KW y una capacidad de procesamiento nominal de 250 a 350 kg/hora. El proceso de pelletizado consistió en una extrusión de la biomasa al ser forzada por dos rodillos del mismo diámetro girando en ejes horizontales paralelos, en moldes con orificios cilíndricos de 8 mm de grosor. Al forzar la biomasa a pasar a través del espacio entre los dos rodillos, se consigue formar el producto densificado.

Una vez obtenidos los aglomerados de biomasa, se procedió a realizar una evaluación siguiendo la misma metodología empleada para las materias primas: análisis próximo, análisis último, extractivos (agua caliente y fría, etanol-tolueno),

celulosa, lignina y poder calorífico. Adicionalmente se evaluó la calidad de los pellets obtenidos de las mezclas propuestas y la del testigo evaluando los siguientes parámetros: absorción de humedad, densidad aparente y densidad del pellet, resistencia a la compresión y durabilidad mecánica.

La densidad aparente se determinó, llenando un beaker de 500 ml de capacidad con pellets seleccionados de manera aleatoria. Se pesó la muestra y se calculó la densidad mediante la relación entre peso volumen. La prueba se realizó en 10 repeticiones para cada tratamiento.

En el caso de la absorción de humedad, se seleccionaron 30 pellets, se pesaron y se colocaron en un desecador, expuestos a una solución saturada de nitrato de potasio ( $\text{KNO}_3$ ) al 21% por 15 días. Las muestras se pesaron después de este tiempo, y el porcentaje de absorción de agua se calculó aplicando la siguiente ecuación:

$$\text{Absorción de humedad (\%)} = \frac{P_{21\%} - P_i}{P_i} * 100 \quad (11)$$

Donde  $P_{21\%}$  es el peso de las muestras luego de la exposición a la solución saturada y  $P_i$  es el peso al inicio de la prueba.

La densidad de los pellets ( $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ ) se calculó seleccionando una muestra aleatoria de 30 ejemplares. Se midió el largo y ancho de cada uno utilizando un calibrador y se determinó el peso en una balanza analítica. La densidad de cada pellet se calculó aplicando la siguiente ecuación:

$$\text{Densidad del pellet (kg} \cdot \text{m}^{-3}\text{)} = \frac{P}{3,14 * L * (r^2)} \quad (12)$$

La resistencia a la compresión se determinó a partir de una muestra de 30 pellets de 13 mm cada uno. El procedimiento empleado es el propuesto por Aarseth & Prestløkken, (2003). Se utilizó una máquina de compresión marca Tinus Olsen modelo H10KT. En esta prueba, la carga de compresión se aplicó a una velocidad de  $0.2 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$ . Se reporta la carga de compresión frente a la deformación del pellet en la zona elástica y la carga máxima alcanzada por el pellet antes de perder su forma. Se reporta el dato de fuerza al momento de la deformación.

La durabilidad mecánica se calculó siguiendo lo planteado en la norma ASAE Standard S269.4. Este método emplea una muestra de 500 g de pellets tamizados en un tamiz de 5,60 mm para eliminar todas las partículas pequeñas. Luego fueron colocados en una caja rotatoria a una velocidad de 50 rpm por 10 minutos. Cada muestra se volvió a tamizar y se registró el peso final. Se repitió el procedimiento 10 veces para cada tratamiento. El porcentaje de durabilidad se calculó mediante la ecuación:

$$\text{Durabilidad (\%)} = \frac{m_i}{m_f} * 100 \quad (13)$$

Donde  $m_i$  es la masa inicial y  $m_f$  es la masa final.

Los resultados obtenidos se compararon frente a los lineamientos establecidos en la norma europea “Especificaciones y clases de combustibles Parte 6: Clases de pellets de origen no leñoso (EN ISO 17225-6:2014)”. El objetivo de la Norma ISO 17225 es apoyar el uso de pellets no leñosos de calidad en edificios residenciales, edificios comerciales pequeños y edificios públicos. Esta norma de ISO vino a sustituir la anterior EN 14961-6, para pellets de biomasa no maderable para usos no industriales.

El análisis estadístico fue llevado a cabo tomando en consideración la media, desviación estándar y límites mínimos y máximos para todos parámetros evaluados. Adicionalmente se determinó que las variables cumplieran con las premisas de distribución normal y homogeneidad de las varianzas, así como la presencia de valores extremos. Posteriormente, se aplicaron diferentes tipos de análisis estadísticos para comparar los resultados: un primer tipo fue el análisis de varianza (ANDEVA) para determinar el efecto de las variables sobre cada uno de los tratamientos estudiados y luego para determinar la diferencia entre medias de los tratamientos en cada uno de los parámetros, se aplicó el rango múltiple de Tukey, con un nivel de confianza de 95%.

### 3.2.4. Costos de la fabricación de los pellets

Para el análisis económico se recopilaron los datos necesarios a partir de revisiones bibliográficas, consultas a empresas y entrevistas con representantes del sector público y privado que permitieran realizar una aproximación a los costos de producción, mercado y factibilidad económica bajo los supuestos previamente definidos. La propuesta se desarrolló ubicando el modelo de negocio en el sector occidental del valle central, entre los cantones de Grecia, Atenas y San Ramón. Para determinar y decidir si el proyecto es viable se utilizaron indicadores de viabilidad como, Valor Actual Neto (VAN) y Tasa Interna de Retorno (TIR). Los parámetros de aceptación de estos indicadores pueden cambiar de acuerdo a los requerimientos de cada inversionista; sin embargo, como base se consideró que el VAN debe ser mayor a cero y TIR debe oscilar entre el 10 y 20 por ciento para ser un resultado aceptable.

## 3.3. Resultados y discusión

### 3.3.1 Características físicas y químicas de las materias primas

La figura 1 muestra las distintas materias primas utilizadas para el presente trabajo de investigación.

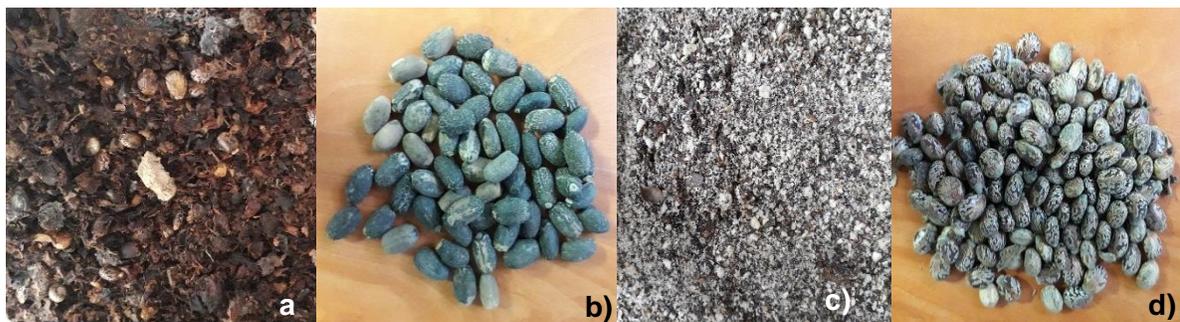


Figura 1. Materias primas utilizadas para el presente estudio: a) broza de café seca, b) semillas enteras de *J. curcas*, c) semillas molidas de *J. curcas* y d) semillas de *R. communis*

Los resultados obtenidos a partir del diseño experimental para la determinación de las propiedades químicas, físicas y energéticas, se presentan en el Cuadro 2.

Cuadro 2. Resultados del análisis de las materias primas

Parámetro	Broza	<i>J. curcas</i>	<i>R. communis</i>
Volátiles (%)	83,84 (3,42) <sup>a</sup>	83,09 (3,03) <sup>a</sup>	87,23 (1,92) <sup>a</sup>
Carbono fijado (%) <sup>*</sup>	2,36	9,65	5,23
N (%)	1,96 (0,06) <sup>a</sup>	4,98 (0,83) <sup>b</sup>	2,71 (0,25) <sup>b</sup>
C (%)	40,95 (0,64) <sup>a</sup>	50,77 (8,59) <sup>a</sup>	58,49 (10,63) <sup>a</sup>
H(%)	6,33 (0,12) <sup>a</sup>	7,84 (1,34) <sup>a</sup>	8,64 (1,44) <sup>a</sup>
S(%)	0,32 (0,12) <sup>a</sup>	0,28 (0,05) <sup>a</sup>	0,21 (0,02) <sup>a</sup>
pH	5,31 (0,06) <sup>a</sup>	5,82 (0,03) <sup>b</sup>	5,85 (0,12) <sup>b</sup>
Extractivos - agua caliente (%)	21,90 (1,32) <sup>a</sup>	7,53 (0,69) <sup>c</sup>	12,20 (0,34) <sup>b</sup>
Extractivos - agua fría (%)	20,12 (0,24) <sup>a</sup>	7,12 (1,37) <sup>b</sup>	9,22 (0,45) <sup>b</sup>
Extractivos etanol tolueno (%)	4,75 (0,51) <sup>a</sup>	35,11 (4,40) <sup>b</sup>	47,55 (2,09) <sup>c</sup>
Celulosa (%)	33,98 (1,12) <sup>ab</sup>	22,37 (4,64) <sup>a</sup>	36,78 (7,48) <sup>b</sup>
Lignina (%)	78,20 (0,29) <sup>a</sup>	66,39 (0,35) <sup>b</sup>	51,95 (1,11) <sup>c</sup>
Contenido de aceite (%)	--	51,61 (3,79)	58,48 (1,58)

<sup>\*</sup>Valor calculado por diferencia. Los datos entre paréntesis indican la desviación estándar de la media. Diferentes letras en la misma fila expresan diferencias significativas ( $p < 0,05$ ) en la prueba de Tukey.

El mayor porcentaje de contenido de humedad en base seca se obtuvo en la broza con 8,22% (Figura 2 a). Este resultado es similar al reportado por Gómez, (2018) de entre 9,93 y 13,5%. En el caso de las semillas, el contenido de

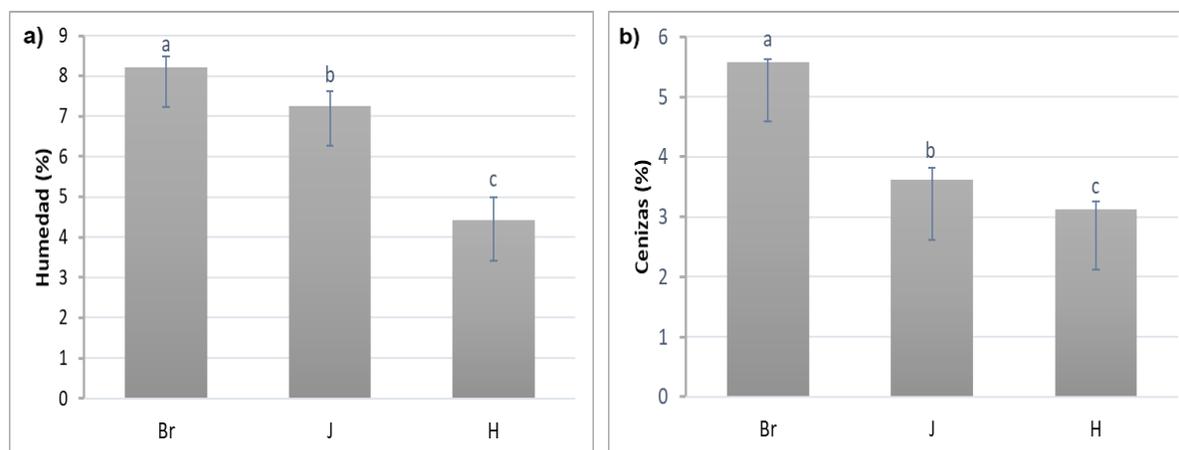


Figura 2. (a) Humedad y (b) contenido de cenizas en porcentajes de las tres materias primas empleadas (Br: broza de café; J: *J. curcas*; H: *R. communis*). Diferentes letras entre barras representan diferencias estadísticas entre las biomásas (significancia al 95%).

humedad se ajusta a los reportado en la literatura, con contenidos que aportan poca humedad al proceso, 7,26% para *J. curcas* y 4,42% para *R. communis*. Esta característica es importante si se considera que bajos contenidos de humedad vuelve menos susceptibles a las materias primas ante procesos de deterioro por acciones de microorganismos como hongos y bacterias, pudiendo ser almacenadas y conservadas durante un tiempo prolongado sin afectar su viabilidad (Vasco et al., 2017).

El contenido de cenizas obtenido para la broza de café presenta el valor más alto con un 5,59 % (Figura 2 b). Este resultado es menor al reportado por Fierro et al., (2018) y Janissen & Huynh (2018) que señalan valores del alrededor de 9%. En el caso de las semillas oleaginosas, el contenido de cenizas registrado (J=3,62% y H=3,12%) concuerda con los resultados de otras investigaciones como los realizadas por Ortiz (2012) y Vasco et al, (2017) para *J. curcas* y *R. communis*, respectivamente. Elevados contenidos de ceniza contribuyen a la corrosión de los equipos que se emplean para el aprovechamiento térmico de cualquier biomasa, además de representar un costo adicional por el hecho de tener que estar removiendo mayor cantidad de residuos. Los valores bajos de contenido de cenizas de las semillas empleadas aportan positivamente al generar menor cantidad de escoria.

El resultado de material volátil obtenido para broza (83,84%) concuerdan con lo señalado por Castillo, (2014), que indica que la broza presenta contenidos de alrededor de 83%. Los resultados de las demás biomásas analizadas son similares entre sí, siendo el de las semillas de *R. communis* el valor más alto con un 87,23%. Este dato es mayor a lo reportado por Sokoto & Bhaskar, (2018) quienes indicaron un contenido de 77,6% en su trabajo. De igual forma para las semillas de *J. curcas*, Sankar et al., (2016) indicaron en sus resultados contenidos de materia volátil de 82%. En general, altos contenidos de material volátil son un indicador de elevada inflamabilidad del material analizado, además de producir una llama de buena calidad (Rincón & González, 2014).

El contenido de carbono fijado de las materias primas se calculó como una diferencia al restar al 100%, los contenidos de humedad, cenizas y volátiles. La broza de café presentó alrededor de 2,36%, el cual es un valor más bajo que el reportado por Parascanu et al., (2017) de 21,23%. Los resultados obtenidos para *J. curcas* y *R. communis* fueron un poco más altos, 9,65% y 5,23%, respectivamente. Estos valores no concuerdan con los obtenidos por Sricharoenchaikul & Atong, (2009) para *J. curcas* (21,23%) y Sokoto & Bhaskar, (2018) para *R. communis* (2,33%). No obstante, hay que recalcar que este valor es derivado de forma indirecta a partir de otros resultados, como bien se señaló previamente. Los contenidos de carbono fijado bajos, como los obtenidos, representan una ventaja si se considera que estos residuos, junto con las cenizas, son parte importante de los sólidos carbonizados remanentes en procesos de combustión (Castillo, 2014). Conocer la cantidad de estos residuos en procesos de combustión es importante para definir con precisión aspectos del mantenimiento de los equipos y eventuales pérdidas por residuos generados en los procesos de aprovechamiento energético.

Los resultados obtenidos a partir del análisis elemental de las materias primas, indica que los contenidos de carbono concuerdan con los valores típicos reportados para biomásas lignocelulósicas, de alrededor de 45% (Cai et al., 2017). Los porcentajes de hidrógeno de las semillas oleaginosas fueron más altos con respecto a la broza. Según Cai et al., (2017) el contenido promedio de hidrógeno para un material lignocelulósico es de entre 4.0-6,5%. Las semillas presentaron valores de 7,8% y 8,6%, para *J. curcas* y *R. communis*, respectivamente, mientras que la broza arrojó un dato de 6,33%. Estos valores más elevados posiblemente se deben a las cadenas de los ácidos grasos saturados de los aceites contenidos en estas materias primas. Los contenidos de N en las materias primas concuerda con lo reportado por Cruz, (2012), Sankar et al., (2016) y Mishra & Mohanty, (2018) para Br, J y H, respectivamente. El contenido de azufre en todos los casos fue menor a 1% lo cual es consecuente con lo reportado en otros estudios realizados sobre el contenido de este elemento para las biomásas evaluadas.

El valor de pH obtenido para la broza fue de 5,31, lo cual está un punto por arriba del 4,21 reportado por Fierro et al., (2018). Los valores de pH para las semillas oleaginosas rondaron en 5,8 para ambos materiales.

Los extraíbles en broza mediante los métodos de agua caliente y agua fría fueron de 21,9% y 20,12% respectivamente. Hay que recordar que estos dos métodos extraen principalmente taninos, gomas, azúcares, almidones y colorantes, lo que evidencia que este tipo de sustancias son abundantes en esta biomasa. Los valores obtenidos para las semillas oleaginosas bajo estos mismos métodos fueron menores. La cantidad de extraíbles obtenidos bajo el método de etanol-tolueno fue de 4,75% en broza. Este dato es similar al reportado para algunas maderas como *Eucalyptus deglupta* y *Croton niveus* (Bonilla & Moya, 2014). Los extraíbles obtenidos con etanol-tolueno son principalmente del tipo ceras, grasas, aceites y resinas, por lo que resulta muy lógico que las semillas oleaginosas presentaran valores mayores (35,11% para *J. curcas* y 47,55% para *R. communis*).

El porcentaje más alto obtenido para celulosa fue el de la biomasa de *J. curcas* con un 36,78%, seguido de la broza con un 33,98% y el menor fue *R. communis* con 22,37%. Castillo (2014) señala un contenido de celulosa para broza de entre 17% a 27%, valores un poco menores al obtenido en este estudio. Para el caso de las semillas de *J. curcas*, Gottipati & Mishra, (2011) reportaron un valor de 15,31%, dato menor al encontrado para esta materia prima. Caso contrario a las semillas de *R. communis*, donde Santos et al., (2015) señalaron en su investigación contenidos del orden de 46,95%, dato mayor al encontrado en la presente investigación. No obstante los resultados obtenidos son similares a los reportados por Gómez, (2018) en su trabajo para otras biomásas de origen vegetal como bagazo de caña (32-43%) y cascarilla de arroz (34%). Esta misma autora señala que la broza de café, obtenida de diferentes procedencias del país, contiene un valor promedio de celulosa de 21,83%. Este valor es menor al obtenido en los diferentes tratamientos evaluados. El contenido de celulosa en las materias primas analizadas es un indicador importante del poder calorífico,

pues altos contenidos de este biopolímero favorecen los procesos de combustión de la biomasa (Tenorio, Moya, & Valaert, 2016).

Los contenidos de lignina de los materiales vegetativos analizados estuvieron en el rango de 51,95 – 78,2%, siendo *R. communis* el más bajo y la pulpa de café el valor más alto. Cruz, (2012) reportó en su trabajo contenidos de lignina para broza de 17,5%, valor que resulta menor al encontrado en esta investigación. De igual manera los contenidos de este polímero en ambas especies de semillas resultó mayor al reportado por Gottipati & Mishra, (2011) para *J. curcas* de 23,79% y Santos et al., (2015) para *R. communis* de 32,31%. Altos contenidos de este carbohidrato estructural se relacionan directamente con el poder calorífico de las biomásas, inclusive la lignina tiene un poder calorífico mayor que el de la celulosa (Cruz, 2012).

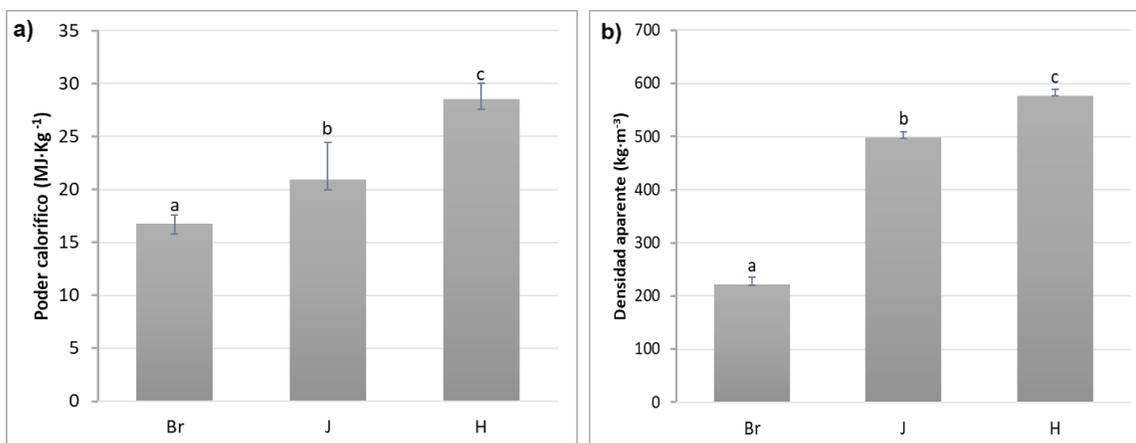


Figura 3. (a) Densidad aparente y (b) poder calorífico de las tres materias primas empleadas (Br: broza de café; J: *J. curcas*; H: *R. communis*). Diferentes letras entre barras representan diferencias estadísticas entre las biomásas (significancia al 95%).

La broza de café presentó la menor densidad aparente (Figura 3 a) con 221,92 Kg·m<sup>-3</sup>, resultado que es mayor al reportado por Faria et al., (2016) de 171,6 Kg·m<sup>-3</sup> para cáscara de café. Esta baja densidad aparente es uno de los factores que limita su manejo y aprovechamiento en procesos de combustión. Esta materia prima sin procesar ocupa grandes volúmenes de espacio para representar cantidades significativas en peso. La mayor densidad aparente se obtuvo para *R. communis*, con 577,38 Kg·m<sup>-3</sup>. Estos valores son altos comparados con las medias normales de biomásas provenientes de residuos

agrícolas que rondan entre 80 y 100 Kg·m<sup>-3</sup> (Jamradloedluk & Lertsatitthanakorn, 2017) debido a que las semillas son biomásas compactas que no han sido alteradas mediante procesos industriales.

El poder calorífico obtenido para la broza de café fue de 16,79 MJ·Kg<sup>-1</sup>, valor que coincide con los resultados reportados por Gómez, (2018), de 16 a 17 MJ·Kg<sup>-1</sup>. Los resultados del poder de combustión de las semillas oleaginosas fueron superiores al de la broza, con un 20,97 MJ·Kg<sup>-1</sup> para las semillas de *J. curcas* y un 28,53 MJ·Kg<sup>-1</sup> para las semillas de *R. communis*. Como se menciona más adelante en este mismo trabajo, estas diferencias en el poder calorífico entre las semillas, se puede deber a las diferencias en el contenido de aceite, ya que las semillas de *R. communis* contienen en promedio entre un 15-20% más de aceite que las de *J. curcas*. En el caso de *J. curcas*, este valor es menor que el reportado por Bedassa, (2016) de 25 MJ·Kg<sup>-1</sup>, caso contrario a *R. communis*, donde el valor más bien fue mayor al reportado por Santos et al., (2015) de 22,7 MJ·Kg<sup>-1</sup>.

El contenido de aceite obtenido aplicando la ecuación de Cromarty, determinó un 51,6% para *J. curcas* y 58,48% para *R. communis*. Estos resultados obtenidos mediante este método indirecto resultan más elevados que lo señalado en otros estudios. Otro resultado que se puede asociar con el contenido de aceite en las semillas es el obtenido en los extractivos de etanol-tolueno, ya que por polaridad este disolvente tiene la capacidad de extraer de los sustratos los aceites, grasas y ceras que puedan estar presentes. Los resultados obtenidos en esta prueba de 35,11% para *J. curcas* y 47,55% para *R. communis* son similares a algunos reportados en otros artículos. Campuzano et al., (2016) y Vasco et al., (2017) señalaron en sus investigaciones, contenidos de aceite de 44,1% y 51% para *J. curcas* y *R. communis*, respectivamente. Estos elevados contenidos de aceite se relacionan estrechamente con el poder calorífico de las materias primas utilizadas, por lo que su consideración a la hora de seleccionar cuál de ellas utilizar es muy relevante.

### **3.3.2. Caracterización del efecto sobre las propiedades físicas y químicas de la adición de semillas oleaginosas**

En la Figura 4 se pueden observar los pellets obtenidos a partir de broza pura, así como de las distintas mezclas realizadas. Los pellets de broza presentaron el contenido de humedad más alto (12,6%), valor que es mayor al reportado por Cubero et al., (2014) de 11,4%. La adición de semillas oleaginosas a los pellets provocó una reducción en los contenidos de humedad. Los tratamientos J10 y H10 arrojaron contenidos de entre 8 - 8,7%, mientras que los tratamientos J30 y H30 mostraron los menores contenidos con 7,3 y 7,8%, respectivamente (Cuadro 3). El contenido de humedad de los pellets es determinado por las condiciones existentes durante la pelletización (humedad relativa, contenido de humedad del material, tiempo y lugar de almacenamiento) así como durante su almacenamiento. La relación entre el contenido de humedad y el poder calorífico de una biomasa es directamente proporcional, por lo que contar con bajos contenidos de agua es importante para obtener resultados más eficientes en los procesos de aprovechamiento térmico. Estos resultados evidencian que la adición de aceite a los pellets reduce los contenidos de humedad, debido posiblemente a su naturaleza hidrofóbica. Por otra parte, bajos contenidos de humedad posibilitan el almacenamiento de los pellets, dado que los procesos de descomposición biológica solo se desencadenan en contenidos de agua por arriba del 16% (Döring, 2013).

La norma EN ISO 17225-6:2014 (AENOR, 2014), establece que los pellets del tipo A provenientes de biomasa herbácea, de frutas o mezclas, deben presentar valores  $\leq 12\%$  en base húmeda. Por tanto, para este parámetro, al cumplir los tratamientos de las mezclas evaluados con lo establecido en la referida norma, podrían ser comercializados en los países de la Unión Europea. Los pellets de broza al 100% se catalogan como pellets de tipo B, con contenidos de humedad  $\leq 15\%$ .

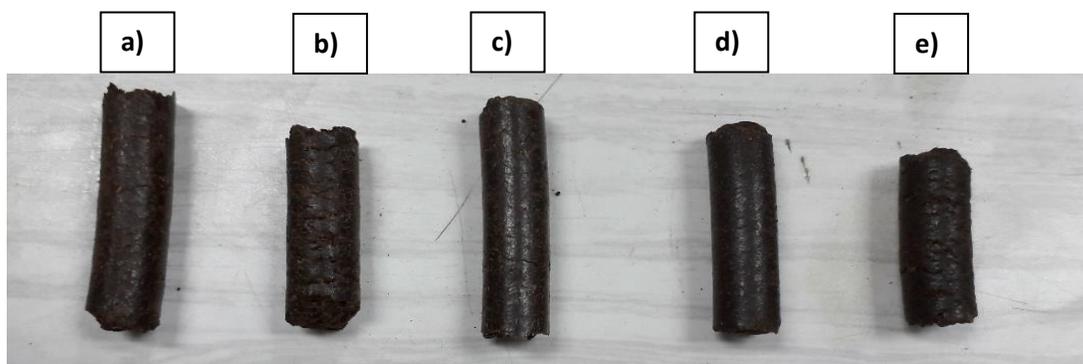


Figura 4. Pellets elaborados a partir de los tratamientos evaluados: a) 100% broza, b) 70% broza y 30% *J. curcas*, c) 90% broza y 10% *J. curcas*, c) 90% broza y 10% *R. communis*, d) 70% broza y 30% *R. communis*.

Respecto al contenido de material volátil, las mezclas con semillas oleaginosas presentaron pocas variaciones respecto a la broza. El porcentaje más alto fue obtenido en el tratamiento J10 con un 86,6% y el menor para J30 con 77,05%. El contenido de volátiles, representa el porcentaje de masa que se volatiliza, lo que significa una pérdida de masa en el proceso de combustión del material. Para los tratamientos evaluados, valores entre 77 y 83% resultan normales en comparación a otras materias biomásicas de origen agrícola (Döring, 2013).

Cuadro 3. Resultados del análisis físico-químico de los tratamientos

Parámetro	Br	J10	J30	H10	H30
Cont. humedad (%)	12,64 (1,67) <sup>a</sup>	8,04 (0,10) <sup>c</sup>	7,31 (0,12) <sup>d</sup>	8,73 (0,49) <sup>b</sup>	7,82 (0,15) <sup>cd</sup>
Volátiles (%)	83,84 (3,42) <sup>a</sup>	86,60 (9,63) <sup>a</sup>	77,05 (2,51) <sup>a</sup>	78,77 (5,49) <sup>a</sup>	83,57 (5,39) <sup>a</sup>
N (%)	1,96 (0,06) <sup>a</sup>	2,85 (0,52) <sup>a</sup>	2,85 (0,23) <sup>a</sup>	2,81 (0,28) <sup>a</sup>	2,84 (0,43) <sup>a</sup>
C (%)	40,95 (0,64) <sup>a</sup>	44,76 (8,05) <sup>a</sup>	44,97 (3,93) <sup>a</sup>	46,46 (4,47) <sup>a</sup>	45,84 (6,84) <sup>a</sup>
H (%)	6,33 (0,12) <sup>a</sup>	6,83 (1,27) <sup>a</sup>	6,92 (0,66) <sup>a</sup>	7,09 (0,72) <sup>a</sup>	7,07 (1,07) <sup>a</sup>
S (%)	0,32 (0,12) <sup>a</sup>	0,23 (0,03) <sup>a</sup>	0,22 (0,04) <sup>a</sup>	0,24 (0,02) <sup>a</sup>	0,22 (0,03) <sup>a</sup>
Extractivos - agua caliente (%)	21,90 (1,32) <sup>a</sup>	26,60 (2,07) <sup>a</sup>	24,22 (0,60) <sup>a</sup>	31,14 (0,94) <sup>b</sup>	31,42 (0,65) <sup>b</sup>
Extractivos - agua fría (%)	20,12 (0,24) <sup>a</sup>	20,80 (0,35) <sup>b</sup>	20,18 (0,44) <sup>b</sup>	28,28 (0,61) <sup>c</sup>	27,29 (0,99) <sup>c</sup>
Extractivos etanol tolueno (%)	4,75 (0,51) <sup>a</sup>	18,0 (2,48) <sup>b</sup>	25,79 (1,09) <sup>c</sup>	18,76 (0,42) <sup>b</sup>	25,45 (0,45) <sup>c</sup>
Celulosa (%)	33,98 (1,12) <sup>a</sup>	30,81 (2,23) <sup>a</sup>	33,12 (1,71) <sup>a</sup>	31,41 (2,19) <sup>a</sup>	32,08 (0,52) <sup>a</sup>
Lignina (%)	78,20 (0,29) <sup>a</sup>	76,52 (0,26) <sup>ab</sup>	76,14 (0,50) <sup>b</sup>	73,36 (1,21) <sup>c</sup>	71,26 (0,50) <sup>d</sup>

**Br:** 100% broza, **J10:** 90% broza+10% semillas de *J. curcas*, **J30:** 70% broza+30% semillas de *J. curcas*, **H10:** 90% broza+10% semillas de *R. communis*, **H30:** 70% broza+30% semillas de *R. communis*. Los datos entre paréntesis indican la desviación estándar de la media. Diferentes letras en la misma fila expresan diferencias significativas ( $p < 0,05$ ) en la prueba de Tukey.

Los datos para el análisis elemental (CHNS) de los pellets de 100% broza se completaron utilizando los mismos resultados obtenidos en el proceso de determinación de las características químicas de la materia prima en cuestión. La adición de las semillas oleaginosas a los pellets de broza provocó un aumento en el contenido de N de las muestras, en alrededor de un 30%, pasando de 1,96% a 2,8%. Los contenidos de nitrógeno de los pellets evaluados no cumplen con el límite de  $N \leq 1,5\%$  establecido en la norma EN ISO 17225-6:2014 (AENOR, 2014). Únicamente los pellets de broza cumplen con el límite para pellets de tipo B ( $N \leq 2\%$ ). Por lo que se concluye que la adición de semillas oleaginosas podría aumentar la generación de gases  $NO_x$  durante los procesos de combustión.

Los contenidos de H y C aumentaron con la adición de semillas oleaginosas, siendo mayor esta tendencia en los tratamientos con semillas de *R. communis*, que rondaron entre un 44,7 y 46,4%. Estos valores son similares a los señalados por Cai et al., (2017) para biomásas lignocelulósicas, de alrededor de un 45%. El contenido de hidrógeno obtenido ronda entre 6,3% y 7,1%, siendo el tratamiento de 100% broza el que presentó el menor resultado y los tratamientos H10 y H30 los que presentaron los mayores valores. Las proporciones de estos elementos en la naturaleza ayudan a determinar el poder calorífico y la cantidad de emisiones de  $CO_2$  de cualquier combustible, sea fósil o lignocelulósico. La relación atómica de un combustible disminuye a medida que aumenta su edad geológica, lo que significa que cuanto más viejo es el combustible, mayor es su contenido de energía (Basu, 2018). Por tanto, cuando la relación H/C de un material combustible se incrementa, el poder calórico se reduce.

El contenido de azufre en los pellets de broza fue de 0,32%. En los tratamientos el porcentaje de este elemento disminuyó a valores de entre 0,22 – 0,24%. Esta reducción representa una mejoría de los materiales obtenidos, por cuando la norma EN ISO 17225-6:2014 (AENOR, 2014), establece que los pellets con valores  $\leq 0,3\%$  se categoriza como Tipo B.

El porcentaje de extractivos en agua caliente fluctuó entre 21,9 y 31,42%, siendo el porcentaje más bajo el de broza de café y el más alto el obtenido para el

tratamiento H30. Los extractivos en agua fría mostraron un intervalo entre 20,12 y 28,28%, siendo de nuevo el valor más bajo para la broza de café y el valor más alto el tratamiento H10. Al ser la pulpa de café el componente mayoritario de estos tratamientos, es fácil comprender porque los contenidos de extractivos en estos solventes son altos, aun cuando se agregan las semillas. Los extractivos que se obtienen en agua caliente y fría son principalmente taninos, azúcares y colorantes, sustancias que son comunes en la broza de café.

Al comparar el testigo con los tratamientos, se encontró que bajo el procedimiento para extractivos en etanol-tolueno, la broza presentó el porcentaje más bajo con un 4,75% y las mezclas con adiciones de 30% de semillas de *J. curcas* y *R. communis*, las más altas con 25,79 y 25,45%, respectivamente. Este resultado demuestra que el aditamento de semillas oleaginosas aumenta el contenido de sustancias como grasas, aceites, gomas y ceras en los pellets finales. Este hallazgo es importante si se considera lo mencionado por Demirbas, (2002), quien señala que existe una relación directamente proporcional entre el porcentaje de extractivos de un material y su poder calorífico. Además, se logró evidenciar que existe una relación positiva entre la cantidad de extraíbles obtenidos en etanol-tolueno y el poder calorífico de los pellets obtenidos en los diferentes tratamientos. El contenido de celulosa mayor se obtuvo para el tratamiento Br con un 33,98% y el más bajo fue J10 con un 30,81%. Los resultados muestran poca variación entre tratamientos, mostrando una tendencia a la baja con la adición de las semillas oleaginosas. El contenido de lignina más elevado fue el de la broza con un valor de 78,2% y el tratamiento H30 el más bajo con un 71,26%. Como se puede apreciar, la adición de semillas oleaginosas redujo el contenido de lignina levemente. Estos resultados no concuerdan con la teoría, ya que la celulosa es el componente más abundante en la biomasa (Gani & Naruse, 2007). Estos altos contenidos de lignina pueden provocar un aumento en la cantidad esperada de alquitranes durante procesos de combustión, en comparación a otras biomásas (Gómez, 2018).

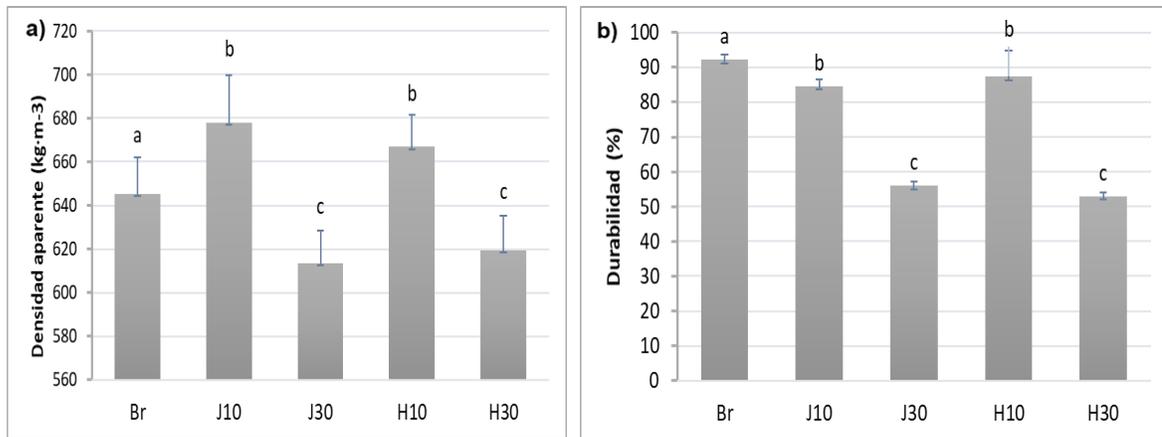


Figura 5. (a) Densidad aparente y (b) durabilidad de los cinco tratamientos evaluados (Br: 100 % broza de café; J10: 10% semillas de *J. curcas*; J30: 30% semillas de *J. curcas*; H10: 10% de semillas de *R. communis*; H30: 30% de semillas de *R. communis*). Diferentes letras entre barras representan diferencias estadísticas entre las biomásas (significancia al 95%).

En relación a la densidad aparente de los tratamientos analizados (Figura 5) se observa que, los pellets manufacturados a partir de broza de café se encuentran en un punto intermedio con  $645,18 \text{ Kg}\cdot\text{m}^{-3}$ . La adición de un 10% de semillas oleaginosas a la pulpa de café, en ambos casos presentó un efecto positivo de aumento de la densidad aparente de los pellets en alrededor de un 5%. No obstante, un aumento de la proporción de semillas oleaginosas a 30% en la mezcla tuvo un efecto negativo, reduciendo la densidad aparente de los pellets obtenidos a  $613,39 \text{ Kg}\cdot\text{m}^{-3}$  en el caso de semillas de *J. curcas* y  $619,5 \text{ Kg}\cdot\text{m}^{-3}$  en el caso de *R. communis*. Esta reducción en la densidad a granel puede estar relacionada con un aumento en el diámetro promedio que presentaron los pellets en las mezclas H30 y J30. Dichos tratamientos mostraron un agrietamiento de la superficie y un abultamiento en promedio 0,2 milímetros en comparación a las mezclas al 10%. Faria et al., (2016) menciona que estos fenómenos se pueden deber a un proceso de migración de la humedad desde el centro del pellet hacia la superficie, aprovechando los espacios vacíos y provocando una ruptura de las uniones formadas durante el pelletizado.

En general todos los comprimidos producidos cumplen con el valor requerido de densidad aparente de  $\geq 600 \text{ Kg}\cdot\text{m}^{-3}$  establecido en la norma EN ISO 17225-6:2014 (AENOR, 2014). Los valores obtenidos fueron superiores a los reportados por Cubero et al., (2014) en pellets de pulpa de café, quienes indicaron un valor promedio de  $600 \text{ Kg}\cdot\text{m}^{-3}$ . En relación al valor de densidad aparente obtenido para la broza de café sin densificar, se registra un aumento de hasta un 200% en algunos de los pellets con semillas oleaginosas. Este hecho resalta el potencial que presenta la densificación de biomasas de este tipo para la producción de biocombustibles.

Los datos obtenidos para la durabilidad de los pellets elaborados, presentó un comportamiento similar al parámetro de densidad aparente, donde los valores más bajos fueron reportados para los tratamientos J30 (56%) y H30 (53%). La broza al 100% obtuvo el valor más alto con un 92,19% y los tratamientos J10 y H10 mostraron valores de 84,6% y 87,3%, respectivamente. Esta reducción de nuevo puede estar asociada al agrietamiento sufrido por los pellets durante el proceso de pelletizado y enfriamiento. Esta condición afectó la cohesión entre partículas dentro del pellet. Otro aspecto que puede afectar este parámetro es la viscosidad de los aceites. Una alternativa para reducir este fenómeno podría ser cambiar algunas variables durante el proceso de prensado como la presión o la temperatura de pelletizado o inclusive el sistema de enfriamiento post prensado.

De acuerdo con la norma EN ISO 17225-6:2014 (AENOR, 2014), los pellets para uso comercial deben cumplir con un estándar mínimo de  $\geq 96\%$ , para la categoría B. Los pellets con densidades muy bajas tienden a desintegrarse muy fácilmente durante su transporte y almacenaje, generando polvo y volviéndolos inviables para su aprovechamiento en procesos de combustión (Cubero et al., 2014; Faria et al., 2016).

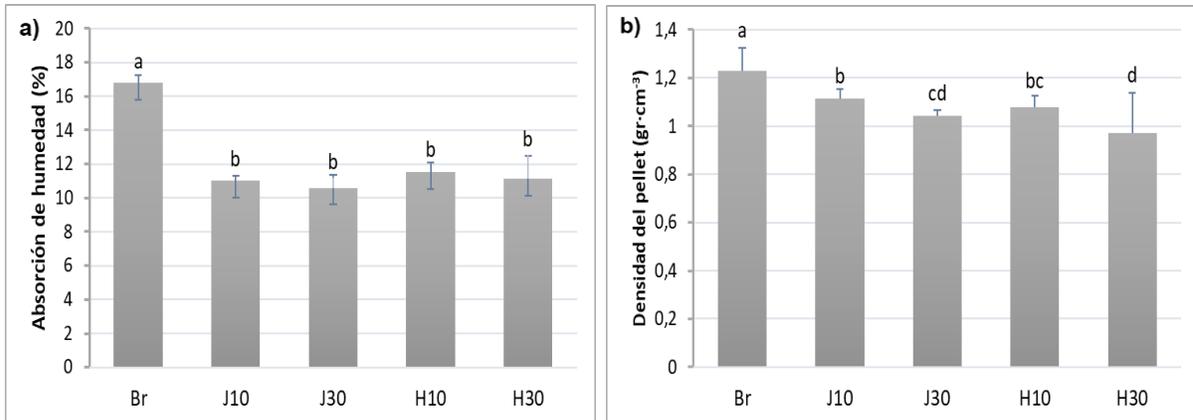


Figura 6. (a) Absorción de humedad y (b) densidad del pellet de los cinco tratamientos evaluados. Diferentes letras entre barras representan diferencias estadísticas entre las biomásas (significancia al 95%).

El porcentaje de absorción de humedad para pellets de broza de café presentó el valor más elevado con un 16,77% (Figura 6a). Los restantes tratamientos mostraron un comportamiento uniforme con valores en un rango entre 10,5 - 11,5%. Esta reducción en los tratamientos con aditamentos de semillas oleaginosas puede responder a la baja polaridad del aceite, producto de las cantidades de oligómeros y pocos grupos polares que estas moléculas poseen, lo cual las hace no solubles ante sustancias polares como el agua (Lazo, 2018). Estos resultados son mayores a los obtenidos por Cubero et al., (2014) quienes reportaron un porcentaje de absorción de humedad en pellets de broza de 8,1%. Al respecto, Fasina (2008) establece que valores óptimos de absorción de humedad para pellets, no deben exceder el 5% (citado en Cubero et al., 2014). Lo que sugiere que los pellets obtenidos absorben humedad rápidamente. Estos problemas se podrían resolver mediante un empacado eficiente que reduzca la exposición de los materiales a la humedad del ambiente.

Los pellets producidos a partir de 100% broza de café presentaron la mayor densidad del pellet con un valor de 1 230,67 Kg·m<sup>-3</sup>. Este dato es menor al publicado por Cubero et al., (2014) para pellets del mismo material (1 300 Kg·m<sup>-3</sup>). La adición de semillas oleaginosas redujo la densidad de los pellets, resultando aún menor en los tratamientos con mayor porcentaje de mezcla (J30:

1041,38 Kg·m<sup>-3</sup> y H30 970,76 Kg·m<sup>-3</sup>). Este resultado pone en evidencia que, bajo los estándares empleados para la presente investigación, la adición de grandes cantidades de semillas oleaginosas tiene un efecto negativo sobre la densidad de los pellets. Esto se puede deber a que el aceite contenido en estas, lubrica y disminuye la fricción entre las partículas, reduciendo el grado de aglomeración. Otros aspectos que se deben tomar en consideración es el alto contenido de lignina de la broza, y como esta afecta las propiedades físicas de los pellets obtenidos al momento del pelletizado.

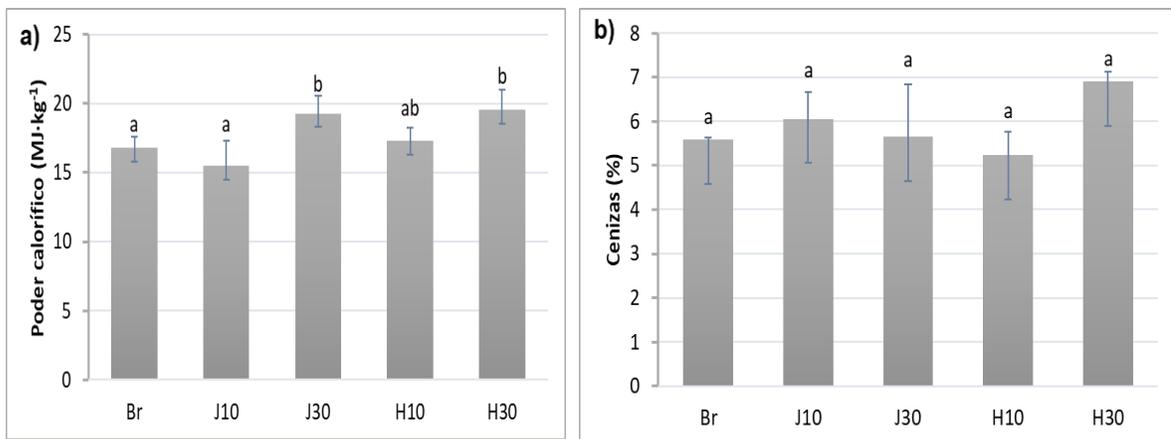


Figura 7. (a) Contenido de cenizas y (b) poder calorífico de los cinco tratamientos evaluados. Diferentes letras entre barras representan diferencias estadísticas entre las biomásas (significancia al 95%).

El resultado obtenido para cenizas en los pellets de broza fue de 5,59% (Figura 7.a). En la mayoría de los tratamientos la adición de semillas tuvo un efecto al alza en el contenido de ceniza, excepto en H10 donde el contenido fue ligeramente menor (5.23%). El mayor contenido se registró en el tratamiento H30 con un 6,91%. Estos valores son menores a los encontrados por Cubero et al., (2014) de 6,74% pero mayores a los reportados por Faria et al., (2016) para pellets de cáscara de café de 3,39%. Estos resultados son similares a los obtenidos por Aragón, Moya, Bond, Valaert, & Tomazello, (2016), para pellets de otras especies de plantas herbáceas, de 5,5% para sorgo (*Sorghum bicolor*) y

4,9% para caña brava (*Gynerium sagittatum*). Los pellets obtenidos en los distintos procedimientos atienden lo dictado por la norma EN ISO 17225-6:2014 (AENOR, 2014) para contenidos de ceniza. Bajo este estándar los tratamientos Br, J30 y H10, clasifican como tipo A (% m/m en base seca  $\leq 6\%$ ), mientras que los pellets obtenidos bajo las mezclas J10 y H30, se clasifican como tipo B (% m/m en base seca  $\leq 10\%$ ).

El poder calorífico de la broza fue de  $16,79 \text{ MJ}\cdot\text{Kg}^{-1}$ , sólo por encima del tratamiento J10, que reportó un poder de combustión de  $15,52 \text{ MJ}\cdot\text{Kg}^{-1}$ . Las mezclas con semillas oleaginosas a 30%, mostraron importantes aumentos en el poder calorífico de alrededor de 15%, como fue el caso de H30 y J30 con un poder de combustión de  $19,55$  y  $19,3 \text{ MJ}\cdot\text{Kg}^{-1}$  respectivamente. Los resultados obtenidos, además, muestran una relación directamente proporcional entre el contenido de aceite de las semillas empleadas y el poder calorífico, siendo que las semillas de *R. communis* presentaron los valores más altos. Estos resultados son mayores a los obtenidos por Cubero et al., (2014) para pellets fabricados a partir de broza de café, de  $11,59 \text{ MJ}\cdot\text{Kg}^{-1}$  y a los reportados por Faria et al., (2016) para pellets de cáscara de café ( $15,84 \text{ MJ}\cdot\text{Kg}^{-1}$ ) y cáscara de café con madera de eucalipto ( $16,74 \text{ MJ}\cdot\text{Kg}^{-1}$ ).

Estos datos demuestran que la adición de semillas oleaginosas a la broza de café, tiene un efecto positivo sobre el poder calorífico de los pellets que se fabrican. Estos resultados cumplen con los límites establecidos en la norma EN ISO 17225-6:2014 (AENOR, 2014) para pellets de tipo A ( $\geq 14,5 \text{ MJ}\cdot\text{Kg}^{-1}$ ).

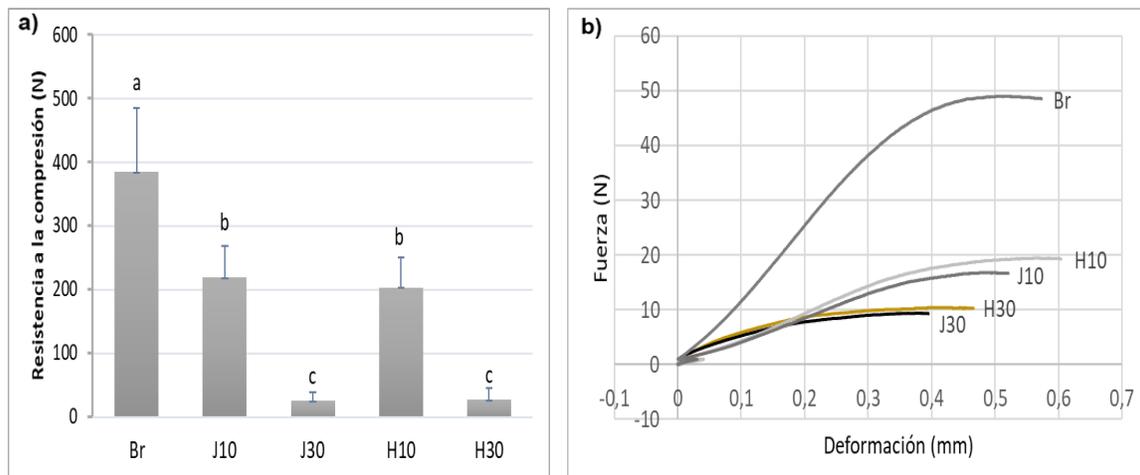


Figura 8. (a) Resistencia a la compresión y (b) carga de compresión vs comportamiento de la deformación en los cinco tratamientos evaluados. Diferentes letras entre barras representan diferencias estadísticas entre las biomásas (significancia al 95%).

Los pellets del tratamiento Br o testigo mostraron la mayor resistencia a la compresión con un valor de 384 N. La adición de semillas oleaginosas redujo el grado de resistencia a la compresión de los pellets significativamente. Los tratamientos J30 y H30 presentaron los menores valores, 25,33 y 26,92 N, respectivamente. Estos resultados ponen de manifiesto que altas proporciones de semillas oleaginosas tienen efectos negativos sobre las características mecánicas de los pellets. Resultados intermedios fueron observados para las combinaciones J10 y H10.

La Figura 7. (b) muestra el comportamiento de un pellet representativo por cada tratamiento de la curva Fuerza versus Deformación. Según los resultados, el tratamiento de 100% broza soporta mayor carga de compresión (superior a 380 N) y bajos niveles de deformación, presentando una curva con pendiente pronunciada en el área elástica del pellet. Los demás tratamientos se pueden agrupar en una serie de líneas que alcanzan bajos niveles de fuerza y curvas con pendientes poco pronunciadas. Esta resistencia es importante porque establece el esfuerzo al que pueden someterse los pellets durante su almacenamiento o durante su aprovechamiento (Tenorio, Moya, Filho, & Valaert, 2015). Estas diferencias en la resistencia a la compresión guardan una estrecha relación con

la densidad de los pellets elaborados y su composición química. Los pellets con altos contenidos de semillas oleaginosas mostraron una disminución importante en la resistencia a la compresión con relación al testigo.

### **3.3.3. Costos de la fabricación de pellets**

#### *Descripción del sector cafetalero seleccionado*

La industria del café en Costa Rica está compuesta principalmente por tres actores: productores, beneficios y comercializadores. Los productores a su vez se pueden clasificar en pequeños, con áreas de siembra menores a 5 hectáreas, que representan 44% de la producción total; 6% son medianos productores que aportan 21% del área de siembra y solo 2% de los productores con áreas mayores a 20 ha que representan un 35% del sector (ICAFE, 2019). Las principales empresas cafetaleras de este último segmento por volumen de producción y áreas de siembra, son: Coopevictoria R.L., Coopeatenas R.L., Coopetarrazú R.L., Café de Altura S.A. y Coopesabalito R.L. Considerando que *R. communis* es un cultivo que se ha usado convencionalmente como sombra en plantaciones de café, y que *J. curcas* es también comúnmente utilizada para el establecimiento de cercas vivas se analizaron los costos de producción para definir la viabilidad de desarrollar modelos de aprovechamiento de la broza densificada con aditamentos de estas semillas oleaginosas.

#### *Sondeo de mercado*

La broza del café es un residuo que se genera durante el proceso de beneficiado, quedando disponible en los centros de procesamiento de las empresas cafetaleras. Esto implica que no debe ser movilizado grandes distancias para su aprovechamiento. Como un aspecto logístico importante, se analizó la distribución geográfica de las principales empresas cafetaleras del occidente del Valle Central. Según datos del Informe Anual del ICAFE, (2017), Atenas, San Ramón y Grecia representan una tercera parte de la producción nacional a gran

escala. Por su ubicación y lejanía, las empresas cafetaleras Coopetarrazú R.L. y Coopesabalito R.L., no se incluirán en este análisis.

Costa Rica produce aproximadamente 510 000 toneladas anuales de fruta fresca (Mora & Ramírez, 2019), de las cuales entre un 40-45% es pulpa (Alves, Rodrigues, Antónia Nunes, Vinha, & Oliveira, 2017; Bressani et al., 1978). Según se mencionó anteriormente, al menos una tercera parte de la producción nacional de café (2% de los productores nacionales) son de gran escala por lo que 80 000 toneladas de broza fresca se deben de generar en las más grandes empresas cafetaleras del país. Considerando un contenido de humedad de alrededor de 90% (Cubero et al., 2014), si esta biomasa se seca hasta llevarla a un 10% de contenido de humedad, se obtendrían alrededor de 15 000 toneladas de broza seca en total. De esta cantidad, alrededor de una tercera parte correspondería a las empresas cafetaleras del occidente del valle central. El precio de venta regular de la broza reportado por Chacón et al., (2018) es de ₡12 por kilo, siendo los usos más comunes la alimentación animal y el compostaje.

A partir de los resultados generados en los objetivos uno y dos, se logró demostrar que los pellets obtenidos a partir de las semillas de *R. communis* generan el mayor rendimiento energético y por tanto serán los que se consideren para esta sección. La disponibilidad de las semillas oleaginosas está sujeta a la utilización de esta especie en asocio con el café como sombra temporal. Para llevar a cabo una mezcla del 30% de estas semillas con 70% de broza, se deberían de plantar alrededor de 8 500 hectáreas en asocio café-higuerilla a una densidad de 5 x 5 metros y con una producción estimada de semillas por planta de 500 gramos (Rivera & Hernández, 2015). Bajo estos supuestos se generarían alrededor de 1 700 toneladas de semillas, cantidad suficiente para abastecer la necesidad de materia prima para mezclas con proporciones de un 30%. El precio de la semilla de *R. communis* para extracción de aceite se cotiza en ₡200 el kilo, según información suministrada por Agronegocios de Costa Rica S. A.

Actualmente Pelletics es la única empresa en el país que produce pellets de biomasa, principalmente de residuos de la industria maderera. Ubicados en el

cantón de San Carlos de Alajuela, esta empresa ofrece este servicio desde el 2010. El precio pagado por la tonelada de biomasa puesta en el plantel es de ₡12 000 y el precio de venta de una tonelada de pellets ya procesados ronda los ₡155 000.

En Costa Rica varias empresas requieren de fuentes de energía para calor de proceso como empresas cementeras, procesadoras de alimentos, empresas generadoras de electricidad y en general toda industrial o institución que pueda necesitar calderas para procesos diversos como: secado, calefacción, esterilización y cocción. Las ventajas comparativas con otras fuentes de energía como los combustibles fósiles se deben relacionar con mejoras en el precio y reducción de emisiones, al ser un combustible carbono neutral. Además de generar una economía de distribución de riqueza en zonas rurales al dar valor agregado a la broza del café y generar una economía de producción de semillas oleaginosas asociada. Muchas de las cooperativas líderes en la producción de café están conformadas por gran cantidad de pequeños y medianos productores que podrían verse beneficiados bajo un esquema participativo de producción.

Un importante segmento de mercado es la exportación de esta biomasa a países europeos (Alemania, Suiza, Holanda, Dinamarca, Bélgica, etc). A nivel internacional la tonelada de pellets se cotiza a precios que rondan entre €200 a €300 la tonelada, dependiendo de la fuente de biomasa y calidad final del producto. Aunque estos mercados son altamente atractivos y con un elevado consumo para generación de calor, tanto en casas como industrias (Thrän et al., 2017), existen importantes factores limitantes que deben ser considerados como las distancias y costos de traslado y los parámetros de calidad establecidos en los estándares europeos.

#### *Perfil técnico*

En la Figura 8 se muestra el diagrama del proceso industrial para la elaboración de los pellets. Este comienza con la recepción de las materias primas, broza fresca o húmeda y semillas a granel. En el caso de la primera, deberá ser dispuesta en patios para una reducción preliminar del contenido de humedad al

sol por dos días, con lo que se espera una reducción de alrededor de 20% en el contenido de humedad. Posterior a esto se pasa al secador de aire caliente de donde sale con un contenido de humedad de alrededor de 10-15%, para luego ser mezclada en las proporciones señaladas con las semillas oleaginosas. Posteriormente se pasa la biomasa a la sección de aglomeración, donde se pelletiza y se deja enfriar para luego ser tamizado y finalmente ser empacado.

Tomando en consideración las densidades de las materias primas empleadas, la pulpa de café ya deshidratada más el volumen de semillas necesario para realizar una mezcla al 30%, sumarían alrededor de 3 365 toneladas/año de biomasa ya densificada. El volumen de producción en el presente estudio se basará en la disponibilidad de materia prima, principalmente de la broza generada en los beneficios de las empresas previamente definidas.



Figura 9. Diagrama del proceso industrial del pelletizado.

El equipo empleado para el secado de la broza (secador de flujo de aire caliente) debe tener una capacidad de alrededor de 5 toneladas por hora. Revisando las alternativas en el mercado y las experiencias del ICAFE, se definió un costo de

alrededor de 8 millones de colones para su adquisición. El segundo equipo es una pelletizadora con capacidad para procesar 2 toneladas de biomasa por hora. Se cotizó una máquina marca Gemco, modelo BPM508 con capacidad para procesar entre 1,5 y 2 toneladas de biomasa hora. El costo de este equipo es de alrededor de 19 millones, precio FOB. Además, se considera una inversión en un equipo de empaque de los pellets de alrededor de 15 millones de colones.

Una vez determinada la cantidad y dimensiones del equipo requerido se procedió a calcular el tamaño de las construcciones. Se necesita un patio en cemento de 2 000 m<sup>2</sup> para el secado de la broza al sol, así como un plantel de al menos 300 m<sup>2</sup> para ubicar los equipos y almacenar los pellets que se van obteniendo del proceso. Considerando que la propuesta va dirigida a ser ubicada en el terreno de alguna de las tres empresas identificadas, no se requieren otras obras adicionales como oficinas, parqueos, o baños, ya que estos estarán anexos en los edificios aledaños. Se definió Atenas como el lugar idóneo para la ubicación de este proyecto, considerando que fuese un lugar céntrico para el acopio de la broza de las tres empresas cafetaleras del oeste del valle central y que el acceso sea fácil para los posibles clientes.

Respecto a la mano de obra requerida se estima en al menos 8 operarios para manejar el secador y la pelletizadora en dobles turnos, un técnico de línea que se encargue del mantenimiento preventivo y correctivo de los equipos y un jefe de planta que coordine el equipo de trabajo y se encargue de aspectos de logística y ventas. Los salarios se estiman con base a lo establecido por ley para este tipo de colaboradores.

### *Análisis económico*

Las inversiones requeridas incluyen las edificaciones que se calculan sobre un costo por metros cuadrado de ₡225 000 el m<sup>2</sup> de obra gris para la bodega y para el planché de cemento en ₡8 000 el m<sup>2</sup>. El equipo requerido suma una aproximado de 42 millones de colones. La materia prima se calcula sobre los supuestos de ₡12 000 para la tonelada de broza y ₡200 000 la de semillas de R.

*communis*. Por lo que para el primer año se calcula una inversión de ¢60 millones para compra de la broza y ¢340 millones para compra de las semillas.

Los costos se desglosaron en dos partes, costos fijos y costos variables. En los costos fijos es posible encontrar costo de mantenimiento del equipo y salarios, y en los costos variables se encuentra la materia prima, electricidad y mantenimiento correctivo para equipos e infraestructura, calculado como un 5% de la inversión fija más un 10% para mantenimiento correctivo de los equipos industriales. Para determinar el capital de trabajo necesario, se consideraron las inversiones iniciales requeridas, la compra de materia prima y los costos operativos para un año.

Se incluye en el flujo de caja un préstamo por 495 millones que incluye el capital de trabajo y las inversiones iniciales (infraestructura y equipos) por un periodo de 10 años, a una tasa de interés del 8% anual.

De acuerdo a lo calculado previamente, precio y proyección de la producción, se obtuvo un estimado de ingreso por ventas del producto de ¢521 575 000 anuales.

#### *Flujo de caja*

El flujo de caja se realizó a un plazo de evaluación de 10 años para determinar la factibilidad del proyecto. La inversión inicial (Anexo 1) tomó en cuenta la infraestructura requerida y la compra de los equipos industriales. Se tomó en consideración la vida útil y depreciación de los todos los bienes. El monto total para este rubro asciende a ¢124,5 millones, con una tasa de depreciación anual de alrededor de ¢5 122 666.

Los costos operativos considerados en el presente análisis incluyen un porcentaje por mantenimiento preventivo de los equipos de 5% y un 10% adicional para mantenimiento correctivo, ante cualquier eventualidad que surja. El consumo de electricidad se determinó en función de las fichas técnicas de los equipos.

Se incluye en el presente análisis el costo de adquirir un préstamo para financiar los costos de inversión inicial y capital de trabajo para el año uno. El periodo del

préstamo se calculó sobre un plazo de 10 años a una tasa de interés del 8% anual, lo que genera una cuota por año de ₱100 473 132.

El flujo de caja del proyecto evidencia que los ingresos y los gastos son casi iguales, por lo que la utilidad contable es de aproximadamente ₱3,5 millones. Si a esto se suman los impuestos (establecidos en el presente análisis en un 25%) y el gasto asociado a la cancelación de las responsabilidades con la entidad bancaria, producto del préstamo para el capital de trabajo, arroja un flujo neto de efectivo negativo.

#### *Viabilidad del proyecto:*

Para determinar la viabilidad del proyecto se utilizaron los indicadores de la Tasa Interna de Retorno (TIR) y Valor Actual Neto (VAN). De acuerdo a los datos obtenidos en el flujo de caja se obtienen los siguientes indicadores:

TIR= <0%

VAN= (₱1 036 702 810)

Los indicadores de la tasa interna de retorno menor a cero y un valor actual neto negativo, son concluyentes en señalar que esta alternativa de inversión, bajo los supuestos planteados, no es viable. El costo de las semillas oleaginosas representa más del 50% del capital inicial y de trabajo. Este rubro es fundamental para elevar el poder calorífico de los pellets, no obstante, el costo de recolección y procesamiento de las semillas oleaginosas representa un monto demasiado alto. Otros gastos como la inversión en infraestructura y la compra de equipos tienen un peso importante sobre el flujo de caja, ya que representan un monto importante del préstamo bancario.

### **3.4. Conclusiones**

El análisis fisicoquímico de las biomásas seleccionadas permitió determinar aspectos importantes como el poder calorífico, extractivos, carbohidratos

estructurales, análisis elemental y próximo y contenidos de aceite de las semillas oleaginosas, todos aspectos relevantes para valorar la idoneidad de estos materiales para su aprovechamiento energético.

El alto contenido de ceniza obtenido para la broza de café, así como su baja densidad aparente y bajo poder calorífico son aspectos que limitan su aprovechamiento en procesos termoquímicos. La generación de escorias y cenizas en procesos de combustión térmica es uno de los factores limitantes más importantes que se deben de considerar al momento de aprovechar este tipo de biomasa.

La caracterización de los diferentes tratamientos permitió determinar diferencias significativas en el contenido energético, de hasta un 15% más, entre los pellets de broza de café y los tratamientos con la adición de semillas de *J. curcas* y *R. communis*. No obstante, se vieron afectadas algunas propiedades mecánicas de los pellets como: durabilidad, densidad del pellet y resistencia mecánica. La viscosidad que aporta el aceite no resulta como buen aglomerante pues reduce la fricción entre las partículas, afectando su compactación.

El contenido de cenizas no varió con la adición de semillas oleaginosas, pero si se observó una reducción significativa en el contenido de humedad de los pellets, favorecida posiblemente por la hidrofobicidad de los aceites adicionados. La absorción de humedad también se redujo significativamente, lo que indica que la adición de semillas potenciaría la capacidad de almacenamiento de esta biomasa por largos periodos de tiempo, disminuyendo su vulnerabilidad ante agentes biológicos.

Bajo los supuestos planteados para el presente análisis de viabilidad, el modelo de negocio no resulta rentable. El costo de las semillas oleaginosas resulta muy elevado frente a los precios de venta de la tonelada de pellets. El precio final con que sale esta biomasa al mercado no se puede elevar demasiado, pues dejaría de ser atractiva frente a otras alternativas como los combustibles fósiles.

## Capítulo 4. Recomendaciones

- Se recomienda realizar un proceso de pelletizado a mayor escala, que permita determinar si cambios en la presión y temperatura del prensado, pueden tener efectos importantes sobre las propiedades mecánicas de los pellets obtenidos. Otro aspecto que debe ser valorado es el tiempo de secado óptimo requerido por el pellet luego de su procesamiento para expulsar la humedad que se evapora durante el proceso de pelletizado.
- Se deben explorar opciones más eficientes para el secado de la broza de café, sostenibles y bajas en demanda de energía, de preferencia a partir de fuentes alternativas como la solar. Dado los altos contenidos de humedad de la pulpa, es uno de los factores limitantes más importantes, junto con la baja densidad que presenta dicha biomasa.
- Se recomienda considerar alternativas para el aprovechamiento energético de las biomásas analizadas como la gasificación y pirolisis, procesos en los cuales la combustión de la biomasa es casi completa, lo que reduce el porcentaje de cenizas y escorias generadas.
- Se deben explorar otros escenarios de aprovechamiento económico a distintos niveles de producción de la biomasa y procesamiento industrial (micro beneficios) que permitan desarrollar sistemas de aprovechamiento de la broza con semillas oleaginosas bajo esquemas que sean sostenibles y con mayor eficiencia y rentabilidad. Otras opciones podrían incluir la identificación de otras especies de plantas con semillas oleaginosas con un costo económico menor, que no eleve demasiado el precio final de los pellets o mejorar y mecanizar los procesos de producción de *R. communis* para reducir su costo final.
- Se recomienda explorar otras tecnologías como la torrefacción como una alternativa para aumentar la densidad de los pellets, lo que tendría un impacto directo sobre su poder calorífico, el almacenaje y la movilización.

## Anexos

### Anexo 1. Cálculos previos y flujo de caja del proyecto

Inversión inicial requerida para el proyecto.

Inversión inicial					
Rubro	Precio unitario	Vida útil / cantidad	Valor residual	Precio	Depreciación
Infraestructura	₪83 500 000	50	₪ 16 700 000	₪83 500 000	₪1 336 000
Pelletizadora	₪18 000 000	15	₪3 600 000	₪18 000 000	₪960 000
Secador	₪8 000 000	15	₪1 600 000	₪8 000 000	₪426 666
Empacadora	₪15 000 000	5	₪3 000 000	₪15 000 000	₪2 400 000
<b>COSTOS TOTALES DE INVERSIÓN INICIAL</b>				<b>₪124 500 000</b>	<b>₪5 122 666</b>

Costos operativos anuales de la industria (fijos y variables)

Costos Operativos Anuales				
Ítem	Precio	Cantidad	Costo	
Costos de Mantenimiento(5%)	₪ 6 250 000	1	₪	6 250 000
Mantenimiento correctivo(10%)	₪ 12 450 000	1	₪	12 450 000
Agua	₪ 1 200 000	1	₪	1 200 000
Electricidad	₪ 50 000 000	1	₪	50 000 000
Broza de café (t)	₪ 12 000	5000	₪	60 000 000
Semillas oleaginosas (t)	₪ 200 000	1700	₪	340 000 000
<b>Salarios de personal**</b>				
Jefe Planta	₪ 805 000	1	₪	14 103 600
Técnico	₪ 540 000	1	₪	9 460 800
Operarios	₪ 401 102	8	₪	56 218 495,56
<b>TOTAL</b>			<b>₪</b>	<b>549 682 895,56</b>

## Proyección del préstamo bancario requerido para la inversión inicial y capital de trabajo

Tasa de interés= 0,08

Monto= ¢ 674 182 895

N= 10

Periodos	Saldo inicial	Interés	Amortización	Cuota	Saldo final
0					¢674 182 895
1	¢674 182 895	¢ 53 934 631	¢46 538 500	¢100 473 132	¢627 644 395
2	¢627 644 395	¢50 211 551	¢50 261 580	¢100 473 132	¢577 382 814
3	¢577 382 814	¢46 190 625	¢54 282 507	¢100 473 132	¢523 100 307
4	¢523 100 307	¢41 848 024	¢58 625 107	¢100 473 132	¢464 475 199
5	¢464 475 199	¢37 158 015	¢63 315 116	¢100 473 132	¢401 160 083
6	¢401 160 083	¢32 092 806	¢68 380 325	¢100 473 132	¢332 779 757
7	¢332 779 757	¢26 622 380	¢73 850 751	¢100 473 132	¢258 929 006
8	¢258 929 006	¢20 714 320	¢79 758 811	¢100 473 132	¢179 170 194
9	¢179 170 194	¢14 333 615	¢86 139 516	¢100 473 132	¢93 030 677
10	¢93 030 677	¢7 442 454	¢93 030 677	¢100 473 132	¢0,00

## Flujo de caja del proyecto

Periodo	P0	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7	P8	P9	P10
Inversión inicial	-¢ 124 500 000										
Capital de trabajo	-¢ 549 682 895										
Ingresos	0	¢ 549 682 896	¢ 549 682 896	¢ 549 682 896	¢ 549 682 896	¢ 549 682 896	¢ 549 682 896	¢ 549 682 896	¢ 549 682 896	¢ 549 682 896	¢ 549 682 896
Gastos	0	¢ 541 332 896	¢ 541 332 896	¢ 541 332 896	¢ 541 332 896	¢ 541 332 896	¢ 541 332 896	¢ 541 332 896	¢ 541 332 896	¢ 541 332 896	¢ 541 332 896
Valor Inflación	100%	103%	106%	109%	113%	116%	104%	107%	110%	114%	117%
		3,0%	3,0%	3,0%	3,0%	3,0%	3,0%	3,0%	3,0%	3,0%	3,0%
Ingresos + Inflación		¢ 566 173 382	¢ 583 158 584	¢ 600 653 341	¢ 618 672 942	¢ 637 233 130	¢ 571 670 211	¢ 588 820 318	¢ 606 484 927	¢ 624 679 475	¢ 643 419 859
Gastos + Inflación		¢ 557 572 882	¢ 574 300 069	¢ 591 529 071	¢ 609 274 943	¢ 627 553 191	¢ 562 986 211	¢ 579 875 798	¢ 597 272 072	¢ 615 190 234	¢ 633 645 941
Depreciación		¢ 5 122 667	¢ 5 122 667	¢ 5 122 667	¢ 5 122 667	¢ 5 122 667	¢ 5 122 667	¢ 5 122 667	¢ 5 122 667	¢ 5 122 667	¢ 5 122 667
Utilidad contable		¢ 3 477 833	¢ 3 735 848	¢ 4 001 604	¢ 4 275 332	¢ 4 557 272	¢ 3 561 333	¢ 3 821 853	¢ 4 090 189	¢ 4 366 575	¢ 4 651 252
Préstamo		¢ 99 228 736	¢ 99 228 736	¢ 99 228 736	¢ 99 228 736	¢ 99 228 736	¢ 99 228 736	¢ 99 228 736	¢ 99 228 736	¢ 99 228 736	¢ 99 228 736
TAX (25%)		¢ 869 458	¢ 933 962	¢ 1 000 401	¢ 1 068 833	¢ 1 139 318	¢ 890 333	¢ 955 463	¢ 1 022 547	¢ 1 091 644	¢ 1 162 813
UDI		-¢ 96 620 361	-¢ 96 426 850	-¢ 96 227 533	-¢ 96 022 237	-¢ 95 810 782	-¢ 96 557 736	-¢ 96 362 346	-¢ 96 161 094	-¢ 95 953 805	-¢ 95 740 297
mas depreciación		¢ 5 122 667	¢ 5 122 667	¢ 5 122 667	¢ 5 122 667	¢ 5 122 667	¢ 5 122 667	¢ 5 122 667	¢ 5 122 667	¢ 5 122 667	¢ 5 122 667
Flujo neto efectivo	-¢ 674 182 895	-¢ 91 497 694	-¢ 91 304 183	-¢ 91 104 866	-¢ 90 899 570	-¢ 90 688 115	-¢ 91 435 069	-¢ 91 239 679	-¢ 91 038 427	-¢ 90 831 138	-¢ 90 617 630

## Bibliografía

- Aarseth, K. A., & Prestløy, E. (2003). Mechanical properties of feed pellets: Weibull analysis. *Biosystems Engineering*, 84(3), 349–361. Extraído de: [https://doi.org/10.1016/S1537-5110\(02\)00264-7](https://doi.org/10.1016/S1537-5110(02)00264-7)
- AENOR. (2014). *Biocombustibles sólidos: Especificaciones y clases de combustibles Parte 6: Clases de pélets de origen no leñoso (EN ISO 17225-6:2014)*.
- Akande, T., Odunsi, A., Ojediran, O., & Taiwo, T. (2012). Physical and Nutrient Characterisation of Raw and Processed Castor (*Ricinus communis* L.) Seeds in Nigeria. *World Journal of Agricultural Sciences*, 8(1), 89–95. Extraído de: <https://www.researchgate.net/publication/312591109>
- Alves, R. C., Rodrigues, F., Antónia Nunes, M., Vinha, A. F., & Oliveira, M. B. P. (2017). State of the art in coffee processing by-products. In *Handbook of Coffee Processing By-Products: Sustainable Applications*. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-811290-8.00001-3>
- Aragón, S., Moya, R., Bond, B., Valaert, J., & Tomazello, M. (2016). Production and quality analysis of pellets manufactured from five potential energy crops in the Northern Region of Costa Rica. *Biomass and Bioenergy*, 87, 84–95. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2016.02.006>
- ASTM. (2013a). ASTM D1102-84. Standard Test Method for Ash in Wood. *American Society for Testing and Materials*, 84 (Reaprovado en 2013), 1–2. <https://doi.org/10.1520/D1102-84R13.1>
- ASTM. (2013b). ASTM D1110 – 84: Standard Test Methods for Water Solubility of Wood. In *Astm* (Vol. 04). <https://doi.org/10.1520/D1110-84R13.2>
- ASTM. (2013c). D1107-96 Standard Test Method for Ethanol-Toluene Solubility of Wood. In *Astm* (Vol. 96). <https://doi.org/10.1520/D1107-96R13>.
- ASTM. (2016). Standard test methods for moisture content of wood ASTM D4442. *1983 Annual Book of ASTM Standards*, (Noviembre), 431–445. <https://doi.org/10.1520/D4442-16.These>
- ASTM. (2019a). *Standard Test Method for Gross Calorific Value of Coal and Coke D5865-13*. <https://doi.org/10.1520/D5865-13.2>
- ASTM. (2019b). Standard Test Method for Volatile Matter in the Analysis of Particulate Wood Fuels. *American Society for Testing and Materials*, 82 (Reaprovado), 5–7. <https://doi.org/10.1520/E0872-82R19.2>
- Basu, P. (2018). *Biomass gasification and pyrolysis: practical design and theory* (3rd ed.). <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-812992-0.00003-0>
- Bedassa, T. (2016). Chemical Composition, Bio-Diesel Potential and Uses of *Jatropha curcas* L. (Euphorbiaceae). *American Journal of Agriculture and*

- Forestry*, 4(2), 35–48. <https://doi.org/10.11648/j.ajaf.20160402.15>
- Blandón, G., Dávila, M. & Rodríguez, N. (1999). Caracterización microbiológica y físico-química de la pulpa de café sola y con mucílago. *Cenicafé*, 50(1), 5–23.
- Blinová, L., Sirotiak, M., Bartošová, A., & Soldán, M. (2017). Review : Utilization of Waste From Coffee Production. *Research Papers*, 25(40), 91–102. <https://doi.org/10.1515/rput-2017-0011>
- Bonilla, R., & Moya, R. (2014). Determinación de los extractivos y su correlación con el peso específico básico de diez especies utilizadas como sombra en cafetales de Costa Rica. *Revista Forestal Mesoamericana Kurú*, 11(27), 34–36. <https://doi.org/10.18845/rfmk.v11i27.1776>
- Bressani, R., Egaña, J., Elías, L., Flores, A., Gómez, R., Molina, M., & Murillo, B. (1978). PULPA DE CAFE Composición, tecnología y utilización. In J. Braham & R. Bressani (Eds.), *The British Journal of Psychiatry*. <https://doi.org/10.1192/bjp.111.479.1009-a>
- Cai, J., He, Y., Yu, X., Banks, S., Yang, Y., Zhang, X., ... Bridgwater, A. (2017). Review of physicochemical properties and analytical characterization of lignocellulosic biomass. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 76 (Octubre 2016), 309–322. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.03.072>
- Campuzano, L., Ríos, A., & Cardeño, F. (2016). Caracterización composicional del fruto de 15 variedades de *Jatropha curcas* L. en el departamento del Tolima, Colombia. *Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria*, 17(3), 379–390. [https://doi.org/10.21930/rcta.vol17\\_num3\\_art:514](https://doi.org/10.21930/rcta.vol17_num3_art:514)
- Castillo, A. (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*. Universidad del Costa Rica.
- Chacón, L., Coto, O., & Flores, O. (2018). *Actualización de la encuesta de biomasa como insumo para su incorporación en la matriz energética de Costa Rica*. San José Costa Rica.
- Chacón, R., Jiménez, G., Montenegro, J., Sasa, J., & Blanco, K. (2010). *Inventario nacional de gases de efecto invernadero y absorción de carbono 2010: Costa Rica 2014*. San José, Costa Rica: Ministerio de Ambiente y Energía. Instituto Meteorológico Nacional.
- Colomer, F., Gallardo, A., Arias, D., & Campos, R. (2019). *Aprovechamiento energético de residuos sólidos* (Publicaciones de la Universitat Jaume, Ed.). <https://doi.org/10.6035/MediAmbient.2019.10>
- Cromarty, A., Ellis, R. & Roberts, E. (1982). The desing of seed storage facilities for genetic conservation. IBPGR. Rome.
- Cruz, D. (2012). *Production of Bio-coal and Activated Carbon from Biomass* (The

- University of Western Ontario). Extraído de: <https://ir.lib.uwo.ca/etd://ir.lib.uwo.ca/etd/1044>
- Cruz, D., Berruti, F., Briens, C., & Ferrante, L. (2012). *Production of Bio-coal and Activated Carbon from Biomass* (Vol. 1). University of Western Ontario.
- Cruz, R. (2014). *Coffee by-products: Sustainable Agro-Industrial Recovery and Impact on Vegetables Quality*. Universidade do Porto.
- Cubero, R., Moya, R., Valaret, J., & Tomazello, M. (2014). Use of coffee (*Coffea arabica*) pulp for the production of briquettes and pellets for heat generation. *Ciência e Agrotecnologia*, 38(5), 461–470. <https://doi.org/10.1590/s1413-70542014000500005>
- Demirbas, A. (2002). Relationships between heating value and lignin, moisture, ash and extractive contents of biomass fuels. *Energy Exploration and Exploitation*, 20(1), 105–111. <https://doi.org/10.1260/014459802760170420>
- Döring, S. (2013). *Power from Pellets*. Neuwied, Germany: Springer Berlin Heidelberg.
- Emami, S., Tabil, L. G., & Adapa, P. (2015). Effect of glycerol on densification of agricultural biomass. *International Journal of Agriculture and Biological Engineering*, 8(1), 64–73. <https://doi.org/10.3965/j.ijabe.20150801.009>
- Faria, W., Protásio, T., Trugilho, P., Pereira, B., Carneiro, A., Andrade, C., & Guimarães, J. (2016). Transformação dos resíduos lignocelulósicos da cafeicultura em Pellets para geração de energia Térmica. *Coffee Science*, 11(1), 137–147.
- Fierro, N., Contreras, A., González, O., Rosas, E., & Morales, V. (2018). Caracterización química y nutrimental de la pulpa de café (*Coffea arabica* L.). *Agroproductividad*, 11(4), 9–13. Extraído de: <http://revista-agroproductividad.org/index.php/agroproductividad/article/view/261>
- Gani, A., & Naruse, I. (2007). Effect of cellulose and lignin content on pyrolysis and gasification characteristics for several types of biomass. *Renewable Energy*, 32, 649–661. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2006.02.017>
- García, L. (2011). Obtención de gas combustible a partir de la gasificación de biomasa en un reactor de lecho fijo. Universidad Nacional de Colombia.
- Gómez, C. (2018). *Evaluación de la incidencia de la zona geográfica de Costa Rica en la composición fisicoquímica de la broza de café para su potencial uso en sistemas de gasificación de lecho descendente*. Universidad de Costa Rica.
- González, Á., Hernández, M., & Menjívar, E. (2016). *Evaluación del Recurso Biomásico en El Salvador para la Generación de Energía Eléctrica*. Universidad de El Salvador.
- Gottipati, R., & Mishra, S. (2011). A kinetic study on pyrolysis and combustion

- characteristics of oil cakes: Effect of cellulose and lignin content. *Ranliào Huaxue Xuebao/Journal of Fuel Chemistry and Technology*, 39(4), 265–270. [https://doi.org/10.1016/S1872-5813\(11\)60021-2](https://doi.org/10.1016/S1872-5813(11)60021-2)
- Gurram, R., Al-Shannag, M., Knapp, S., Das, T., Singasaas, E., & Alkasrawi, M. (2016). Technical possibilities of bioethanol production from coffee pulp: A renewable feedstock. *Clean Technologies and Environmental Policy*, 18(1), 269–278. <https://doi.org/10.1007/s10098-015-1015-9>
- Hernández, R., Fernández, C. y Baptista M. (2014). Metodologías de la Investigación. México D.F, México: Mc Graw Hill
- Herrera, J. (2017). *Informe Estado de la Nación en Desarrollo Humano Sostenible 2017: Uso y estado de los recursos: energía*. Extraído de: [https://estadonacion.or.cr/files/biblioteca\\_virtual/023/Ambientales/Herrera\\_J\\_2017b.pdf](https://estadonacion.or.cr/files/biblioteca_virtual/023/Ambientales/Herrera_J_2017b.pdf)
- Hiegl, W., Janssen, R., & Pichler, W. (2009). *Advancement of pellets-related European standards*. Extraído de: [www.pelletsatlas.info](http://www.pelletsatlas.info)
- ICAFFE. (2017). *Informe sobre la actividad cafetalera de Costa Rica 2017*. Extraído de: [http://www.icafe.go.cr/sector\\_cafetalero/estadisticas/infor\\_activ\\_cafetal/actual/InformeActividadCafetalera.pdf](http://www.icafe.go.cr/sector_cafetalero/estadisticas/infor_activ_cafetal/actual/InformeActividadCafetalera.pdf)
- Instituto Nacional de Estadística y Censo. (2015). *VI Censo Nacional Agropecuario: Atlas Estadístico Agropecuario*. San José, Costa Rica.
- Jamradloedluk, J., & Lertsatitthanakorn, C. (2017). Influences of Mixing Ratios and Binder Types on Properties of Biomass Pellets. *Energy Procedia*, 138, 1147–1152. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2017.10.223>
- Janissen, B., & Huynh, T. (2018). Chemical composition and value-adding applications of coffee industry by-products: A review. *Resources, Conservation and Recycling*, 128 (Septiembre 2017), 110–117. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2017.10.001>
- Jingura, R. M., & Kamusoko, R. (2018). Technical Options for Valorisation of Jatropha Press-Cake: A Review. *Waste and Biomass Valorization*, 9, 701–713. <https://doi.org/10.1007/s12649-017-9837-9>
- Kalogiannis, K. G., Stefanidis, S. D., Michailof, C. M., & Lappas, A. A. (2016). Castor bean cake residues upgrading towards high added value products via fast catalytic pyrolysis. *Biomass and Bioenergy*, 95, 405–415. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2016.07.001>
- Lazo, M. (2018). *Estudio de la producción de pellets a partir de borra de café*. Universidad Nacional de Colombia.
- Machado, A., Castilho, L., & Guimarães, D. (2016). Characterization of babassu, canola, castor seed and sunflower residual cakes for use as raw materials for fermentation processes. *Industrial Crops and Products*, 83, 140–148. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2015.12.050>

- Makhlouf, K., Hamrouni, L., Khouja, M. L., & Hanana, M. (2010). Notes ethnobotanique et phytopharmacologique sur *Ricinus communis* L. *Phytothérapie*, 8, 374–376. <https://doi.org/10.1007/s10298-010-0591-4>
- Marrugo, G., Valdés, C. F., Gómez, C., & Chejne, F. (2019). Pelletizing of Colombian agro-industrial biomasses with crude glycerol. *Renewable Energy*, 134, 558–568. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2018.11.004>
- Merete, W., Haddis, A., Alemayehu, E., & Ambelu, A. (2014). The Potential of Coffee Husk and Pulp as an Alternative Source of Environmentally Friendly Energy. *East African Journal of Sciences*, 8(1), 29–36.
- Mishra, R. K., & Mohanty, K. (2018). Characterization of non-edible lignocellulosic biomass in terms of their candidacy towards alternative renewable fuels. *Biomass Conversion and Biorefinery*, 8(4), 799–812. <https://doi.org/10.1007/s13399-018-0332-8>
- Montero, G., Coronado, M. A., Torres, R., Jaramillo, B. E., García, C., Stoytcheva, M., ... Valenzuela, E. (2016). Higher heating value determination of wheat straw from Baja. *Energy*, 109, 612–619. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2016.05.011>
- Montilla, J., Arcila, J., Aristizábal, M., Montoya, E., Puerta, G., Oliveros, C., & Cadena, G. (2008). Caracterización de algunas propiedades físicas y factores de conversión del café durante el proceso de beneficio húmedo tradicional. In *Cenicafé* (Vol. 59). Extraído de: [https://www.cenicafe.org/es/publications/arc059\(02\)120-142.pdf](https://www.cenicafe.org/es/publications/arc059(02)120-142.pdf)
- Mora, L. (2018). *Programa país carbono neutralidad: Categoría Organizacional*. San José Costa Rica.
- Mora, S., & Ramírez, Y. (2019). *Boletín estadístico agropecuario N°29*. Extraído de: [www.sepsa.go.cr](http://www.sepsa.go.cr)
- Murata, K., Somwongsa, P., Larpiattaworn, S., Liu, Y., Inaba, M., & Takahara, I. (2011). Analyses of liquid products from catalytic pyrolysis of jatropha seed cakes. *Energy and Fuels*, 25(11), 5429–5437. <https://doi.org/10.1021/ef201237s>
- Nallathambi, V. (2009). Biomass estimates, characteristics, biochemical methane potential, kinetics and energy flow from *Jatropha curcas* on dry lands. *Biomass and Bioenergy*, 33(4), 589–596. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2008.09.002>
- Odetoye, T., Afolabi, T., Abu Bakar, M., & Titiloye, J. (2018). Thermochemical characterization of Nigerian *Jatropha curcas* fruit and seed residues for biofuel production. *Energy, Ecology and Environment*, 3(6), 330–337. <https://doi.org/10.1007/s40974-018-0104-0>
- Olugbade, T., Ojo, O., & Mohammed, T. (2019). Influence of Binders on Combustion Properties of Biomass Briquettes: A Recent Review. *BioEnergy*

- Research, 1–19. <https://doi.org/10.1007/s12155-019-09973-w>
- Ortiz, A. (2012). *Composición química de Jatropha curcas* (Universidad Autónoma De Querétaro). Extraído de: <http://ring.uaq.mx/bitstream/123456789/449/1/RI000264.pdf>
- Parascanu, M. M., Sandoval-Salas, F., Soreanu, G., Valverde, J. L., & Sanchez-Silva, L. (2017). Valorization of Mexican biomasses through pyrolysis, combustion and gasification processes. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 71(Abril), 509–522. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.12.079>
- Proskurina, S. (2018). *International trade in biomass for energy production: The local and global context*. Lappeenranta University of Technology.
- Rattan, S., Parande, A. K., Nagaraju, V. D., & Ghiwari, G. K. (2015). A comprehensive review on utilization of wastewater from coffee processing. *Environmental Science and Pollution Research*, 22(9), 6461–6472. <https://doi.org/10.1007/s11356-015-4079-5>
- REN21. (2018). *Renewables 2018-Global status report*. <https://doi.org/978-3-9818911-3-3>
- Rincón, S., & González, Y. (2014). *Estudio de factibilidad para la fabricación de pellets a partir de material lignocelulósico proveniente de palma de aceite* (Universidad Libre). Extraído de: <https://www.bps.go.id/dynamictable/2018/05/18/1337/persentase-panjang-jalan-tol-yang-beroperasi-menurut-operatornya-2014.html>
- Rivera, P., & Hernández, J. (2015). Evaluación del rendimiento y calidad del aceite de siete variedades de *Ricinus communis*. *Agronomía Mesoamericana*, 27(1), 183–190. <https://doi.org/10.15517/am.v27i1.21898>
- Rodríguez, N. (2013). Producción de alcohol a partir de la pulpa de café. *Revista Cenicafé*, 64(2), 78–93. Extraído de: [http://biblioteca.cenicafe.org/bitstream/10778/541/1/arc064\(02\)78-93.pdf](http://biblioteca.cenicafe.org/bitstream/10778/541/1/arc064(02)78-93.pdf)
- Rodríguez, N., & Zambrano, D. (2010). Los subproductos del café: fuente de energía renovable. *Avances Técnicos Cenicafé*, (3), 8. <https://doi.org/ISSN-0120-0178>
- Roldan, C., Hernández, I., Astorga, A., & Vargas, E. (2011). *Estudio de factibilidad para la producción de biocombustibles a partir de la Jatropha en la Zona Sur de Costa Rica*. <https://doi.org/10.1017/CBO9781107415324.004>
- Ružbarský, J., Miroslav, M., Marecek, J., & Geršl, M. (2014). *Jatropha curcas*: analysis of gross calorific value. *Acta Universitatis Agriculturae et Silviculturae Mendelianae Brunensis*, 62(6), 1381–1384. <https://doi.org/10.11118/actaun201462061381>
- Sánchez, M., Castañeda, R., & Castañeda, M. (2016). Usos y potencialidad de la Higuierilla (*Ricinus communis*) en sistemas agroforestales en Colombia. *Medicina Veterinaria e Zootecnia*, 10(6), 507–512.

- Sankar, S., Kumar, S., Panda, A., & Singh, R. (2016). Valorization of Jatropha seed to fuel and chemical feedstock using a thermochemical conversion process. *Biofuels*, 7(5), 429–435. <https://doi.org/10.1080/17597269.2016.1149767>
- Santos, N., Magriotis, Z., Saczk, A., Fássio, G., & Vieira, S. (2015). Kinetic study of pyrolysis of castor beans (*Ricinus communis* L.) presscake: an alternative use for solid waste arising from the biodiesel production. *Energy and Fuels*, 29(4), 2351–2357. <https://doi.org/10.1021/ef401933c>
- Sokoto, A. M., & Bhaskar, T. (2018). Pyrolysis of Waste Castor Seed Cake: A Thermo-Kinetics Study. *European Journal of Sustainable Development Research*, 2(2). <https://doi.org/10.20897/ejosdr/81642>
- Sricharoenchaikul, V., & Atong, D. (2009). Journal of Analytical and Applied Pyrolysis Thermal decomposition study on *Jatropha curcas* L. waste using TGA and fixed bed reactor. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 85, 155–162. <https://doi.org/10.1016/j.jaap.2008.11.030>
- Tenorio, C., Moya, R., Filho, M. T., & Valaert, J. (2015). Quality of pellets made from agricultural and forestry crops in Costa Rican Tropical Climates. *BioResources*, 10(1), 482–498.
- Tenorio, C., Moya, R., & Valaert, J. (2016). Characterisation of pellets made from oil palm residues in Costa Rica. *Journal of Oil Palm Research*, 28(2), 198–210. <https://doi.org/10.21894/jopr.2016.2802.08>
- Thrän, D., Peetz, D., & Schaubach, K. (2017). *The global wood pellet industry and trade study 2017*. IEA Bioenergy.
- Torres, C., Molina, D., Urvina, L., Castillo, J., & Chaves, M. (2016). *Informe densificación de residuos de café para su uso en gasificación*. San José Costa Rica.
- Vasco, J., Hernández, I., Méndez, S., Ventura, E., Cuellar, M., & Mosquera, J. (2017). Relación entre la composición química de la semilla y la calidad de aceite de doce accesiones de *Ricinus communis* L. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 8(6), 1343–1356. Extraído de: <http://www.scielo.org.mx/pdf/remexca/v8n6/2007-0934-remexca-8-06-1343.pdf>
- Wakandigara, A., Nhamo, L., & Kugara, J. (2013). Chemistry of phorbol ester toxicity in *Jatropha curcas* seed – a review. *International Journal of Biochemistry Research*, 3(3), 146–161.

