

Panorama internacional del uso de la borra de café como biocombustible sólido. Revisión de estudios a nivel mundial

International Overview of the Use of Spent Coffe Ground as Solid Fuel. A Review of Worldwide Studies

Claudio Alberto Moreno-Arias^{a,b}, Oscar Chamarraví-Guerra^a, Eric-Fabián Navarro-Árquez^a, Miguel-Fernando Jiménez-Jiméneza^a

RESUMEN

El presente artículo es una revisión del estado de la investigación (2010 – 2020) sobre estudios y proyectos de elaboración, caracterización y comercialización de briquetas y pellets, cuya materia base es la borra del café, a nivel mundial. Las revisiones evidenciaron que estos combustibles sólidos utilizan como materia base este desecho del café con residuos como aserrín, grasa de cocina, ramas, y hojas secas, o insumos como la glicerina, la goma xantara, el almidón de yuca, o el biodiesel. La fabricación de las briquetas o pellets tiene un proceso de mezclado de borra base con la sustancia aglomerante para luego ser prensado de forma manual en la mayoría de los casos. Los resultados de caracterización físico-química principalmente su poder calorífico, es comparado su desempeño con respecto al carbón y la leña, los cuales se buscan sustituir con la implementación de este tipo de biomasa. Los resultados de esta revisión arrojaron valores muy similares para briquetas en cuanto al potencial energético y la generación de gases de combustión, pero en todos los casos fueron inferiores al del carbón mineral utilizado como referente. A pesar de esto, estas briquetas se presentan como una solución sustentable al problema de la deforestación y las enfermedades pulmonares por exposición al humo de leña.

PALABRAS CLAVE: briquetas, biomasa sólida, borra, combustibles sólidos alternativos.

ABSTRACT

The present article is a review of the state of the art (2010-2020) about worldwide experiences and projects of elaboration, characterization, and commercialization of briquettes and pellets, whose raw material is the spent coffee ground (SCG). Reviews done evidenced these solid fuels employ this waste from coffee blending it with other wastes such as sawdust, fat cooking, branches, dried leaves, or feedstocks such as glycerine, xantara gum, cassava starch or biodiesel. The manufacturing of briquettes or pellets comprises a blending process of SCG and a binder substance to be compressed, mainly by hand. Then, the results concerning physicochemical properties were analysed, mainly the heat power, in order to compare the performance against that of the coal and firewood which are the fuels to be replaced. The results obtained from briquettes in this review yielded similar values regarding potential energy and combustion gases generated, but in all the cases were lower than coal's used as reference. In spite of that, this solid fuel appears as a sustainable solution to deforestation problems and lung diseases due to its fume exposition.

KEY WORDS: briquettes, solid biomass, spent coffee ground, solid alternative fuels.

Introducción

Uno de los problemas que afronta la población mundial es la disponibilidad de fuentes de energía accesibles, sustentables y económicas (Shukla y Vyas,

2015). Aproximadamente 3000 millones de personas en el mundo utilizan como única alternativa de energía la biomasa de madera en forma de leña o de carbón vegetal (Nijhuis, 2017), (Kurmi et al., 2012).

a Fundación Universidad de América, Facultad de Ingenierías, Programa Ingeniería Mecánica. Bogotá, Colombia. ORCID Moreno-Arias, C.A.: 0000-0001-6103-8238; ORCID Chamarraví-Guerra, O.: 0000-0002-6571-6814; ORCID Navarro-Árquez, E.-F.: 0000-0003-4645-1897; Jiménez-Jiménez, M.-F.: 0000-0001-9366-0902

b Autor de correspondencia: claudio.moreno@profesores.uamerica.edu.co

Su obtención se efectúa con la tala de árboles, lo cual reduce un significativo número de hectáreas que podrían producir oxígeno, servir de sumidero de carbono y demás servicios ecosistémicos (Armenteras et al., 2018). De otro lado, la Organización Mundial de la Salud (2020) y González-García et al. (2013) indican que la exposición al humo de la combustión de leña es uno de los factores de riesgo causantes de la enfermedad crónica pulmonar obstructiva (EPOC), de la cual se estima que alrededor de 64 millones de personas la padecen, principalmente en países en vía de desarrollo. Un estudio llevado a cabo en Colombia demostró que la exposición al humo de leña también aparece como factor de riesgo importante para el desarrollo de esta enfermedad (Ministerio de Salud, 2016).

Ante los riesgos asociados a la obtención y exposición al humo de leña, surge una oportunidad para los biocombustibles sólidos que mediante el aprovechamiento de una gran cantidad de residuos biomásicos pueden utilizarse como fuente de energía, en cocinas y otros procesos tradicionales (Goche et al., 2015). El uso de estos biocombustibles ha traído beneficios socio-económicos como el generado en la economía local de África del Este con la producción de briquetas, donde se han sustituido combustibles fósiles tradicionales como el carbón y el queroseno para uso doméstico (Asamoah et al., 2016). Su implementación ha traído grandes ventajas como, disminución de la dependencia de la leña, buena eficiencia de quemado, reducción de la deforestación, junto con la creación de nuevos puestos de trabajo y la oferta a precios accesibles en comparación con el carbón y la leña (Maninder et al., 2014). En otro estudio, la Oficina Suiza de Energía (Itten et al., 2011) analizó el ciclo de vida de diferentes combustibles biomásicos, donde se destaca que las emisiones de gases de efecto invernadero son inferiores a las de los combustibles fósiles, aunque superiores a las de la madera. Aunque su potencial energético no supere el de los combustibles convencionales, las briquetas de borra de café surgen como una solución tanto a los problemas energéticos como de salud, junto con las oportunidades de negocio de economía circular, además de servir de insumo para estudios futuros donde se estudie a profundidad otras formas de mejorar su rendimiento energético.

Metodología

Esta revisión es de carácter exploratorio con una perspectiva de tipo mixto cuantitativo-cualitativo mediante la consulta de artículos de investigación, principalmente desde el año 2010. Los artículos fueron obtenidos de las bases de datos Springer, Science Direct, Scopus, Google Académico, así como tesis de grado de diferentes repositorios. La revisión se hizo por ubicaciones geográficas en África, Europa, Asia y América, resaltando el aporte más relevante de cada uno de los estudios en aspectos como los mencionados por Shukla y Vyas (2015) en cuanto a sustancia aglomerante, proporciones de mezcla, poder calorífico, emisiones producidas o aplicaciones. La revisión permitió establecer la viabilidad de fabricar este biocombustible sólido y su implementación para sustituir la leña, el carbón y evitar la tala de árboles para su uso.

Residuos de la cosecha del café

En lo que se refiere al aprovechamiento de los residuos de café se destaca la actividad investigativa sobre el potencial de sus productos como la pulpa, la cascarilla y el mucílago en la producción de materia prima para enzimas y compuestos bioactivos, antioxidantes y aditivos para alimentos (Figueroa et al., 2016). Dependiendo del tipo, se pueden utilizar como absorbente en remoción de metales pesados, colorante para soluciones acuosas, producción de pellets y briquetas, bebidas alcohólicas, antioxidantes naturales fenólicos, tazas reutilizables, sustrato de biogás, producción de biogás, alcohol y biodiesel, entre otras utilidades (Blinová et al., 2017). Por su parte, Rodríguez y Zambrano (2010) describen las oportunidades y los usos potenciales de los constituyentes del café. La pulpa permite usarse como combustible directo, con un poder calorífico de $15,88 \text{ MJ kg}^{-1}$, pero con una baja eficiencia energética. Mezclada con agua, gas carbónico y otros compuestos puede producir biogás. El mucílago que se obtiene en el proceso de beneficio y se utiliza en la producción de biogás y bioetanol. De no realizar una adecuada disposición, su descomposición a cielo abierto genera producción de metano y contaminación en suelos y agua.

En el trabajo realizado por Zerbinatti et al. (2014), se fabricaron briquetas a base de cascarilla y

se mezclaron con residuos de cosecha como ramas y hojas en diferentes composiciones. Los ensayos aplicados arrojaron un contenido de sulfuros inferior al 0,1 % lo cual no generaría SOx en la combustión. El poder calorífico alcanzó 14,04 y 16,83 MJ kg⁻¹ con un porcentaje de cenizas inferior al 6 %, muy similar a lo obtenido por Suryaningsih et al. (2017) donde seleccionaron biomasa como cascarillas de café, arroz, coco y aserrín para producir briquetas. La cáscara de coco presentó el mayor poder calorífico (18,60 MJ kg⁻¹).

El trabajo realizado por Mhilu (2014) comparó el poder energético que proporcionan la cascarilla de arroz y café; los valores obtenidos fueron 18,34 MJ kg⁻¹ para café y 13,24 MJ/kg para arroz. Sin embargo, los contenidos de cenizas resultaron altos, lo cual afecta la eficiencia de la combustión, mientras que Pallavi et al. (2013) compararon las características de briquetas elaboradas con bagazo de caña y cascarilla de café como materia prima para obtenerlas en forma de biochar. Los resultados arrojaron que una combinación de bagazo-cascarilla de café de 3:1 tiene un poder calorífico de 11,126 MJ kg⁻¹, muy superior a los de cada biomasa individual que fueron 8,54 y 9,49 MJ kg⁻¹, respectivamente.

Vera (2014) desarrolló un estudio con briquetas de residuos agrícolas de cascarilla de café, bagazo de caña y cisco de arroz, en diferentes proporciones. La que arrojó el poder calorífico más alto fue la cascarilla de café con 60 %, seguida del cisco de arroz y el bagazo de caña con el 20% cada uno. Celis (2017) describe la elaboración de briquetas con residuos de cosecha y beneficio de café. Como materia prima utilizaron mucílago, cisco y harina de trigo, moldeada y secada durante cinco días, proporcionando un producto que se han exportado a China donde han tenido bastante aceptación.

Experiencias de elaboración y caracterización de briquetas de borra a nivel mundial

A continuación, se hace una breve descripción de las experiencias encontradas con respecto al uso de la borra de café como combustible sólido, resaltando los principales aportes de cada investigación.

África

Pilusa (2010), realizó un estudio con briquetas cuya composición oscilaba en 32 % de borra, 23 % de finos de carbón, 11 % aserrín de madera, 18 % cáscara de maíz, 10 % papel reciclado y 6 % pulpa de papel. El propósito de este estudio fue evaluar la viabilidad económica de producir briquetas ecológicas en zonas rurales y urbanas de Sudáfrica. Dentro de los resultados importantes se destaca que la combustión de las briquetas produce gases dentro de los niveles permitidos de acuerdo con los estándares OSHA (Occupational Safety and Health Organization). Pilusa et al. (2013) realizaron un estudio sobre la caracterización de briqueta, cuya composición con borra era el 32 %; polvo fino de carbón, 23 %; aserrín de madera, 11 %; cáscara de maíz, 18 %; papel reciclado, 10 %, y 6 % de pulpa de papel con agua. Se compactaron con una presión de 0,87 MPa. Las dimensiones fueron 100 mm de diámetro exterior, 35 mm de diámetro interno y 50 mm de largo. Dentro de los resultados más sobresalientes de esta caracterización como potencial combustible sólido arrojó un poder calorífico de 18,9 MJ kg⁻¹ en comparación al carbón con 25,92 MJ kg⁻¹. Igual que el trabajo anterior, se destaca los bajos valores obtenidos en emisiones producidas de su combustión debajo del límite de exposición establecido por OSHA para un periodo de 8 horas.

Pilusa et al. (2012) estudiaron la relación teórica entre la presión y la densidad de briquetas cilíndricas huecas elaboradas con diferentes tipos de biomasa como borra, cáscara de maíz, finos de carbón y aserrín de madera, sin utilizar ningún tipo de aglomerante. Se aplicaron presiones mediante una prensa manual de tornillo entre los 1,5 y 3,0 MPa para briquetas de 100 mm de diámetro externo, 35 mm de diámetro interno y 50 mm de largo. Estas alcanzaron densidades de 989 kg m⁻³ y un contenido de humedad del 28,87 %. Su análisis contiene 26,30 % de carbono fijo, 39,34 % de material volátil, 10,9 % de humedad y 10,46 % de cenizas. El poder calorífico fue de 18,9 MJ kg⁻¹.

Eshetu (2019) realizó en Etiopía un estudio en donde, a partir de borra, se obtuvieron como productos metil éster, bioetanol y briquetas. Las briquetas

se fabricaron utilizando glicerol como aglomerante en proporciones de borra: glicerol de 15:85, 25:75, 40:60. Los resultados en cuanto a poder calorífico no presentaron variaciones sustanciales con respecto a las composiciones elaboradas. Este valor estuvo alrededor de 13,64 MJ kg⁻¹, mientras que el estudio realizado en Etiopía por Shiferaw et al. (2018) se caracterizaron briquetas con borra de café y extracto de hojas de eucalipto, utilizando diferentes materiales como aglomerantes. Dentro de estos se usaron harina de trigo, tres tipos de arcilla local denominados *Mehal meda*, *Sela dengay* y *Zemaro*, así como tierra y papel. El estudio concluyó que la mezcla con eucalipto y harina de trigo proporciona el mejor poder calorífico estimado (26,66 MJ kg⁻¹), muy cercano a las de carbón convencional.

Limousy et al. (2013), en Túnez, realizaron la caracterización de pellets de borra y los humos de combustión liberados en su uso en una caldera doméstica. Se utilizaron pellets elaborados 100 % con borra y aglomerados con un 20 % de aserrín de pino. Se hizo la caracterización física-química de sus propiedades y los humos de combustión. Para la prueba de combustión se utilizó una caldera de 12 kW con resultados de eficiencia de combustión y de caldera, junto con las partículas de los gases de combustión. El estudio concluye que la borra pura es un buen combustible sustituto, pero no proporciona una alta

eficiencia, ni de combustión, ni de caldera. La mejor alternativa sería la aglomeración con aserrín de madera, el cual mejora notoriamente estas deficiencias y se obtiene una eficiencia de combustión del 91,9%.

La tabla 1 resume los aportes más relevantes de cada una de las investigaciones realizadas en África.

Europa

Fröling (2015) realizó en Suecia un estudio comparativo del comportamiento pre- y pos-incineración de briquetas de borra en forma de ladrillos, y se contrastaron con las tradicionales a base de aserrín de madera (*sawdust*); con el propósito de caracterizar los elementos presentes para establecer la perdurabilidad de cada uno durante el proceso de combustión en un asado doméstico. Los experimentos se desarrollaron utilizando un espectroscopio de plasma. Los resultados obtenidos en partes por millón (ppm) fueron mayores a 0,01 para ambos tipos de briquetas. Adicionalmente, se encontró que las cenizas de las briquetas tradicionales tienen una alta concentración de aluminio, calcio, hierro, magnesio y azufre, mientras que las de borra son ricas en boro, cobre, hierro, potasio, manganeso y fósforo.

El estudio realizado en Polonia por Ciesielczuk et al. (2015), analizó el poder energético de la borra como aditivo para la elaboración de briquetas hechas con polvo de madera pulida- basada en la

Tabla 1. Resumen de las investigaciones en briquetas para África

Fuente	Parámetro evaluado	Aporte relevante
Pilusa (2010)	Elaboración con 32 % de borra, 23 % carbón fino, 11 % aserrín de madera, 18 % cáscaras maíz, 10 % papel reciclado y 6 % de pulpa papel	Reducción de gases de combustión por debajo de niveles permitidos, según OSHAS
Pilusa et al. (2013)	Elaboración con 32% borra, 23% carbón fino, 11% aserrín de madera, 18% cáscaras maíz, 10% papel reciclado y 6% pulpa papel	<ul style="list-style-type: none"> Determinación del poder calorífico en 18,9 MJ kg⁻¹ Reducción de gases de combustión por debajo de niveles permitidos, según OSHAS
Pilusa et al. (2012)	Elaboración a base de borra, carbón fino, aserrín de madera, sin aglomerante	Determinación del poder calorífico en 18,9 MJ kg ⁻¹
Eshetu (2019)	Elaboración a base de borra, con glicerol en composiciones de 15:85; 25:75 y 40:60	Determinación del poder calorífico 13,64 MJ kg ⁻¹
Shiferaw (2018)	Elaboración a base de borra, hojas de eucalipto con aglomerantes de arcilla, harina de trigo, tierra y papel, en diferentes proporciones	El mejor poder calorífico con la mezcla de borra, hojas de eucalipto y harina de trigo
Limousy et al. (2012)	Elaboración a base de borra y aserrín de pino al 100% borra y combinación 80:20.	Desempeño como combustible de caldera de 12 kW. Presentó muy baja eficiencia en comparación con el aserrín de madera.

Fuente: elaboración propia.

norma BN-88/9103-07 que caracteriza combustibles biomásicos sólidos. Las pruebas se efectuaron a composiciones de polvo de madera pulida (PMP) y borra (B) en las siguientes proporciones: 100:0, 90:10 y 75:25. Las compresiones utilizadas para la compactación fueron de 120 bar para las de PMP y entre 80 y 90 bar para las combinadas con B. Como resultado se obtuvo que la composición de PMP con 25 % de borra, arrojó el mejor poder calorífico el cual se estimó en $20,32 \text{ MJ kg}^{-1}$. Todas las composiciones excedieron el parámetro mínimo de la norma DIN 51731, teniendo en cuenta que la base de la mezcla no fue la borra sino el PMP. Los valores de poder calorífico se acercan a los de carbones minerales utilizados tradicionalmente. Esto permite concluir que sí sería un recurso eficiente y accesible para las comunidades polacas, aunque al tener como base el PMP podría crearse la necesidad de procesar mayores cantidades de madera con las consecuencias que trae su explotación.

La empresa Bio-Bean ha desarrollado un proyecto de reciclaje de borra procedente de las cafeterías del Reino Unido, con el fin de fabricar briquetas o leños cilíndricos similares a los mostrados en la figura 1. Las briquetas se están comercializando con éxito para estufas y sistemas de calefacción. Dentro de las principales ventajas es el aroma similar a la madera y duración de un 20 % mayor que la madera seca. La borra proveniente de 25 tasas sirve para elaborar una briqueta de 500 g, que se usa tanto en estufas multi-combustibles como a cielo abierto. Su empaque se hace en bolsas de papel reciclable. Su combustión reduce los gases invernaderos en un 80 %,

ya que es un residuo que no se arroja al relleno sanitario, donde su descomposición produce metano (Bio-Bean, s. f.).

El trabajo experimental desarrollado por Allesia et al. (2017) describe cómo algunas compañías tostadoras de café utilizan la borra como fuente de energía para producir café tostado. Este proceso lo han venido desarrollando con gas natural, consumiendo alrededor de 400 m^3 por mes. La experimentación mostró que el uso de la borra como fuente de energía reduce hasta en un 10 % las emisiones de dióxido de carbono. La eficiencia de este proceso alcanza hasta un 41 % y ha permitido desarrollar un nuevo modelo de negocio donde se hace el producto y se reutiliza. El proceso de tostado con borra como fuente de energía genera un ahorro de EUR 10398 por año en un aporte energético que demanda 159 kW.

Seco et al. (2020), compararon experimentalmente el comportamiento de briquetas compuestas de borra y goma xantana (XG) como aglomerante. Este análisis se llevó a cabo tomando como variable independiente el contenido de humedad y la presión de compactado. Se compararon los valores para briquetas a base de solo borra contra las de borra y goma xantana. El resultado más relevante de este estudio es la durabilidad e integridad que logra la briqueta al mezclarse con la goma. Sin embargo, se reduce su poder calorífico.

Nosek et al. (2020) experimentaron con cuatro muestras de pellets elaborados con borra (SCG) y aserrín (SD), en composiciones 70:30; 60:40; 50:50 y 100:00. Su comportamiento como combustible se evaluó en el quemador de una caldera. Como resultado, se comprobó que los pellets de borra 100%, tienen el contenido más alto de carbono (54,56%) lo que hizo que alcanzara el mayor poder calorífico $21,08 \text{ MJ kg}^{-1}$. Pero no se logró el desempeño esperado en el funcionamiento de la caldera, puesto que el pellet no queda con buena consistencia.

Brunerová et al. (2020) analizaron el comportamiento como combustible sólido de briquetas elaboradas con viruta de abeto (SS), aserrín de aceite (LSD), mezcladas con borra (SCG) en composiciones de SCG 100% puro; LSD 100% puro; SCG:LSD, 50:50; SCG:LSD, 25:75; SS 100% puro; SCG:SS, 50:50 y SCG:SS, 25:75. Como

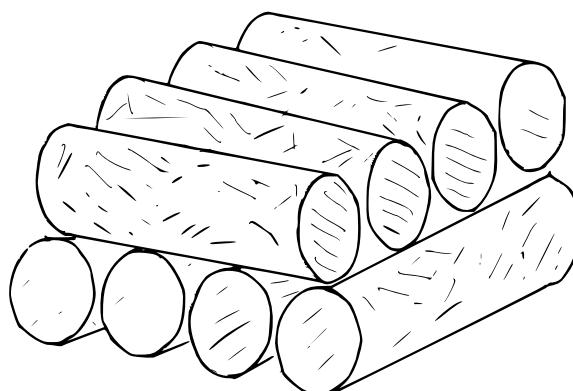


Figura 1. Briquetas cilíndricas comerciales.
Fuente: Elaboración propia.

Tabla 2. Resumen de las investigaciones en briquetas para Europa

Fuente	Parámetro evaluado	Aporte relevante
Fröling (2015)	Elaboración de ladrillos de borra y aserrín para evaluar el comportamiento poscombustión de las biomasas	Concentraciones de aluminio, calcio, cobre, hierro, magnesio, boro y azufre y fósforo encontrados en las cenizas de cada uno
Ciesielczuk et al. (2015)	Elaboración a base polvo de madera pulida y borra en composiciones de 100:0; 90:10; 75:25	Mejor poder calorífico 20,32 MJ kg ⁻¹ para la composición 75:25
Bio-Bean (s. f.)	Aprovechamiento de la borra generada en el Reino Unido	Reducción de gases de efecto invernadero (GEI) hasta en un 80%.
Allesina et al. (2017)	Aprovechamiento como combustible en el proceso de tostado de los mismos granos	Reducción del 10% en las emisiones generadas en comparación con gas natural. Ahorro de hasta EUR 10398 por concepto de energía.
Seco et al. (2020)	Elaboración a base borra y aglomerante con goma xantana	Mejora la integridad física con el incremento de la goma, pero se reduce el poder calorífico
Nosek et al. (2020)	Elaboración a base de borra más aserrín en composiciones 70:30; 60:40; 50:50; 100:0, y prueba de caldera	La composición 100% de borra obtuvo el mejor poder calorífico (21.08 MJ kg ⁻¹). Disminuye la eficiencia de la caldera debido a la baja consistencia del pellet
Brunerová et al. (2020)	Elaboración con mezclas con borra, viruta de abeto, aserrín de aceite, en diferentes combinaciones	Briquetas con 100% borra tuvieron mayor poder calorífico, pero empeoraron su consistencia física

Fuente: elaboración propia

resultados del estudio se obtuvo que el poder calorífico más alto lo tienen las briquetas de borra 100% puras, seguidas de las de aserrín y viruta, en 100 %. Sin embargo, no se mantiene homogénea para ser fabricada a gran escala. Por lo tanto, la mezcla con mayores proporciones especialmente de aserrín es indicada, a pesar de que se reduzcan alguna propiedades físico-químicas.

La tabla 2 resume los aportes más relevantes de cada una de las investigaciones realizadas en Europa.

Asia

Un estudio realizado en Malasia por Kansai et al. (2018), determinó las características físicas y económicas de la producción de briquetas carbonizadas a base de madera forestal y una combinación de borra y té, utilizando yuca como aglomerante. Se realizaron cinco relaciones entre residuos de madera forestal (árbol de lluvia, RT) y borra con té (*café-té*, CT). Todos los residuos se mezclaron después de haber sido previamente carbonizados en las siguientes proporciones RT:CT: 100:0; 75:25; 50:50; 25:75; 0:100. No se especificó la proporción de la mezcla CT. A cada una de estas se les adicionó 1 kg de yuca, y se compactó para elaborar briquetas de 1 cm de diámetro interno, 4 cm de diámetro externo y 10 cm de largo. El proceso de secado se realizó al aire libre durante un periodo de cinco días. Se destaca que se

obtuvo un alto valor, pero con un incremento del contenido de carbono fijo del combustible, lo que traería problemas similares a los generados por los carbones minerales y vegetales convencionales.

En Tailandia se llevó a cabo un estudio por Naruephat y Patcharee (2015a), donde se caracterizaron briquetas, cuyas proporciones fueron papel reciclado (PR) y borra (B) en 70:30; 60:40; 50:50; 40:60, y 30:70. Los resultados son detallados al comparar la briqueta de mejor desempeño con leña y carbón mineral (Tabla 3). A medida que aumentaba el contenido de borra en la mezcla se mejoraba el poder calorífico.

Otro proyecto llevado a cabo por Naruephat y Patcharee (2015b), consistió en aprovechar diferentes tipos de residuos municipales para la elaboración de briquetas, donde se destacan las grasas alimenticias, la borra de café y té. La caracterización se llevó a cabo organizando tres grupos de residuos de la siguiente manera: grupo I – grasas alimenticias con borra, grupo II – grasas alimenticias con aserrín de té, grupo III – borra y aserrín de té. Para cada uno de estos grupos se elaboraron mezclas en proporciones de 50:50, 40:60 y 30:70, respectivamente. Para los grupos I y II se observó que las composiciones 50:50 arrojan poderes caloríficos más altos como el de la mezcla grasa de cocina y borra estimado en 27,14 MJ kg⁻¹. Adicionalmente, el estudio mostró que la

Tabla 3. Propiedades combustibles de briquetas PR-B, leña y carbón vegetal

Parámetro	Briquetas PR:B	Leña	Carbón vegetal
Poder calorífico (MJ kg ⁻¹)	16,72-20,064	18,35	31,057
Contenido de humedad (%)	7-9	8	9,4
Contenido cenizas (%)	3,8-8,5	3,9	5,4
Material volátil (%)	82-86	65	2
Carbón fijo (%)	1-3	22,8	84,6

Fuente: Naruephat y Patcharee (2015a)

relación de 50:50 no requería de ningún aglomerante, mientras que para el grupo III se tuvo que utilizar una mayor cantidad de este, puesto que la borra de café se aglomera pobremente con el de té.

El proyecto realizado por Kristanto y Wijaya (2018) analizó la mezcla de borra con pulpa de café para la producción de pellets en Indonesia. Una de las pruebas ejecutadas permitió determinar la influencia de la compactación en la morfología para cada tipo de pellet. Para la caracterización de los pellets como combustible, se elaboraron composiciones borra-pulpa de 95:0; 85:10; 75:20; 65:30 y 55:40. Para todas las muestras se utilizó como material adhesivo almidón al 5 %. Se utilizaron los parámetros de la norma DIN 51731 y se obtuvo que el mejor poder calorífico lo alcanzó la composición 95 % borra y 5 % almidón. Las partículas de la pulpa mostraron una estructura fibrosa más densa en comparación con aserrín, lo que significa que tienen más baja porosidad. Este valor se estimó en 19,68 MJ kg⁻¹. Como conclusión principal del estudio se recomienda no agregar la pulpa en grandes cantidades debido a las emisiones de NO₂ producidas.

El trabajo realizado por Mohd (2014) en Malasia, analiza la producción de briquetas de borra con dos tipos de aglomerante: la cascarilla de arroz y el papel reciclado. Primero, se evaluó la borra sin torrefactar (tostar) combinada en proporción 50:50 con cada sustancia. Luego se modificaron las composiciones a 70:30 y 80:20. Se analizó el comportamiento mecánico de cada composición, obteniendo los valores más altos la composición 50:50 de papel reciclado. Adicionalmente se realizaron pruebas de ebullición de una masa de agua, poder calorífico, porcentaje de carbono fijo, contenido de cenizas y material volátil, en las cuales la composición 80:20 registró el mejor desempeño. Posteriormente se sometió la borra a dos procesos de torrefacción a 260 °C y 290 °C, con

lo cual se mejoraron notablemente las propiedades fisicoquímicas.

En el estudio realizado en Tailandia por Potip y Wongwuttanasatian (2018), se recolectaron muestras de borra en cafeterías. Elaboraron mezclas de borra con glicerol crudo en proporciones borra (SCG): glicerol (G) de 100:0 (G0), 95:5 (G5) y 90:10 (G10). Las mezclas se comprimieron en una prensa briquetadora a 10 MPa. Las dimensiones de las briquetas fueron de 53 mm de diámetro, 52 mm de longitud y con un peso de 100 g. El poder calorífico de las briquetas se determinó con base en la norma ASTM-D240. Los valores obtenidos para las mezclas G0, G5 y G10 fueron 21,14; 21,21 y 21,55 MJ kg⁻¹, respectivamente, los cuales superaron a otros combustibles sólidos biomásicos como la cáscara de maíz, el bagazo de caña de azúcar, tallo de yuca y las astillas de madera. Adicionalmente analizaron las emisiones desprendidas del proceso de combustión (CO, NO_x, CO₂, HC, O₂ y CO₂), las cuales se incrementan con el contenido de borra. Como conclusión, las emisiones obtenidas presentaron valores bajos debido al exceso de aire empleado.

En Malasia, Law et al. (2018) llevaron a cabo un análisis del comportamiento mecánico de briquetas elaboradas con diferentes combinaciones de residuos agrícolas. Se utilizaron cascarilla de arroz (RH), bagazo de caña (SB) y borra (SCG) en mezclas RH:SB, RH:SCG y SB:SCG, todas en proporciones de 80:20, 60:40 y 20:80. La resistencia al impacto se evaluó para simular las fuerzas que intervienen cuando las briquetas se transportan o trasladan de un sitio a otro, apilándose en cajas una sobre otra. Desde una altura de un metro se deja caer la briqueta durante diez veces. Se compara el peso final con el inicial para determinar el peso perdido en porcentaje. La resistencia a la abrasión se llevó a cabo en un tambor giratorio, donde se depositaban

tres muestras de briquetas (Figura 2). Previamente se deben tamizar durante 30 segundos para eliminar partículas finas. El tambor se hace girar durante 5 minutos a 25 rpm en sentido horario. Al igual que en la prueba de resistencia al impacto, se compara el peso perdido con el inicial.

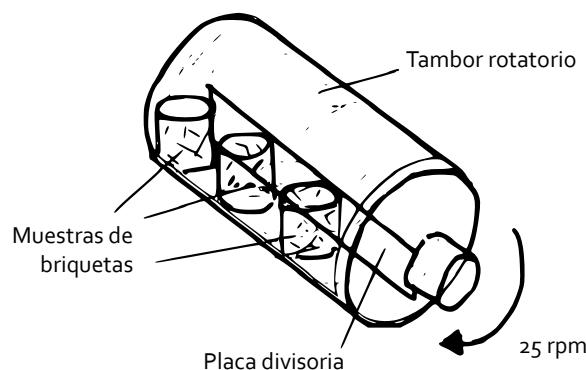


Figura 2. Tambor giratorio para ensayo de abrasión.
Fuente: elaboración propia

El estudio concluyó que el mejor comportamiento mecánico se obtiene al incrementar el contenido de borra.

Chen et al. (2017) presentaron en China los resultados de un estudio que analizó la respuesta de secado con radiación infrarroja para briquetas de los siguientes tipos de biomasa: hojas de tomentosa, tallos de algodón, borra y corteza de eucalipto. Las muestras se elaboraron en forma de pellets de 40 mm de diámetro, con espesores de 3,2 mm para las hojas de tomentosa; 3,6 mm para los tallos de algodón; 2,6 mm para borra, y 4,1 mm para corteza de eucalipto. El proceso de compactación se hizo a 20 MPa. Las muestras fueron sometidas a temperaturas entre los 100 y 200 °C. Como resultado se concluye que las tasas de secado de las briquetas con radiación infrarroja aumentan entre 1,4 y 1,9 con las temperaturas evaluadas, en comparación con los procesos de secado por convección natural.

En Corea del Sur, Kang et al. (2017) realizaron un estudio similar al de Limousy et al. (2012), con el fin de evaluar el comportamiento de la borra como combustible para una caldera residencial de 6,5 kW. Secaron al aire libre las muestras de tal forma que la humedad estuviera por debajo del 15 %. Se pasó la borra seca en tamices de 100, 250, 500, 850 y 1000 µm. Al no ser uniformes se definieron

las partículas en rangos de menos de 100, 250 -500 y 500 – 800 µm. Como resultados de este ensayo se destaca el tiempo de combustión que le tomó al agua del tanque de almacenamiento alcanzar 75°C (146 min). También se registraron emisiones bajas de CO y NOx, las cuales se estimaron en 643 y 163 ppm, respectivamente. También se destaca el interés de parte de las autoridades surcoreanas acerca de la implementación de este tipo de dispositivos con combustibles alternativos.

Las características de combustión isotérmica de briquetas elaboradas con antracita y borra fueron estudiadas en China por Wei et al. (2019). Este seguimiento se hizo mediante un análisis termogravimétrico a temperaturas entre 873 y 1173 K. Se comparó el desempeño durante la combustión para dos briquetas, cuyas composiciones fueron 60% borra – 40% de antracita, 40 % borra – 60 % antracita, contra dos de composiciones individuales de 100 % borra y 100 % antracita. Encontraron que, a una temperatura de 973 K, la tasa de quemado de la briqueta de borra es ocho veces más alta que la de la antracita. Las cuatro muestras tuvieron emisiones de NO₂ mucho más bajas que otras emisiones gaseosas.

La tabla 4 resume los aportes más relevantes de cada una de las investigaciones realizadas en Asia.

América

Un estudio de las propiedades de briquetas elaboradas con borra y aserrín de madera fue realizado por Soares et al. (2015) en Brasil. Recolectaron la borra en cafeterías y máquinas automáticas. Las tamizaron en mallas de 60, 35 y 20 mm. Elaboraron briquetas de composiciones borra-aserrín de madera de 80:20; 70:30; 60:40; 50:50 y 40:60, respectivamente. Se realizó una prueba de compresión diametral en lugar de la estandarizada en posición vertical, y se obtuvo la mejor resistencia con la composición 60:40 (13,53 MPa). Al incrementar la proporción de aserrín de madera se reducen tanto la resistencia al aplastamiento como el módulo de elasticidad. Los valores más altos de poder calorífico fueron de 84,64 MJ kg⁻¹ para la composición 100% aserrín y 85,84 MJ kg⁻¹ para la de 60% de borra.

Un proyecto global de ingeniería mecánica en el que se diseñó una prensa briquetadora para caracterizar briquetas a base de borra con almidón

Tabla 4. Resumen de las investigaciones en briquetas para Asia

Fuente	Parámetro evaluado	Aporte relevante
Kansai et al. (2018)	Elaboración a base de borra y té desechado, usando yuca como aglomerante y residuos de madera forestal	Se incrementa el poder calorífico, pero también el contenido de carbono al aumentar los residuos de madera. Por lo tanto, se incrementarían las emisiones de CO ₂
Naruephat y Patcharee (2015a)	Elaboración a base de borra y papel reciclado en composiciones de 70:30; 60:40; 50:50; 40:60 y 30:70	Comprobaron que el poder calorífico aumenta con el contenido de borra comparando con leña y carbón vegetal
Naruephat y Patcharee (2015b)	Elaboración a base de borra, más té desechado y grasas de cocina	El poder calorífico aumenta al disminuir la cantidad de borra o té. El mejor valor se obtuvo para la composición borra: grasa 50:50 (27,14 MJ kg ⁻¹)
Kristanto y Wijaya (2018)	Elaboración a partir de borra y pulpa de café, más 5% de almidón, en composiciones de 95:0; 85:10; 75:20; 65:30 y 55:40.	Determinación del poder calorífico en 19,68 MJ kg ⁻¹ para la composición 95:5. Al aumentar el contenido de pulpa aumenta las emisiones de NO _x
Mohd (2014)	Elaboración a base de borra, cascarilla de arroz y papel reciclado en composiciones de 70:30, 50:50; 80:20	La cascarilla de arroz afecta la compactación de la briqueta a pesar de mejorar el poder calorífico
Potip y Wongwuttanasatian (2018)	Elaboración a base de borra, mezcladas con glicerol en proporciones de 100:0, 95:5; 90:10	Poder calorífico en promedio de 21,30 MJ kg ⁻¹ , superior a otras biomasas
Law et al. (2018)	Ánalisis del comportamiento mecánico de briquetas de borra mezcladas con cascarilla de arroz, bagazo de caña en proporciones residuo:borra de 80:20; 60:40 y 20:80	El contenido de borra mejora la resistencia al aplastamiento, impacto y abrasión de las briquetas
Chen et al. (2017)	Secado con radiación infrarroja para briquetas de borra mezcladas con tallos de algodón, corteza de eucalipto y hojas de tormentosa	Velocidad de secado más rápida en comparación con otros métodos convencionales
Kang et al. (2017)	Empleo de pellets de borra como combustible en caldera doméstica de 6,5 kW	Se obtuvo un tiempo de 146 minutos para que el agua de alimentación alcanzara 75°C, lo cual es un proceso de baja eficiencia
Wei et al. (2019)	Evaluación de la combustión isotérmica a base de antracita y borra en composiciones de 60:40; 40:60; 100:0 y 0:100.	Las briquetas con mayor contenido de borra presentaron mayor velocidad de quemado. Las emisiones de NO _x resultaron bajas para todas las composiciones

Fuente: elaboración propia

de yuca como aglomerante, fue desarrollado por Balseca-Sampedro et al. (2018) en Ecuador. Los parámetros de composición y elaboración de briquetas fueron borra como material base 72,68 %; almidón de yuca como aglomerante, 12,82 %, y agua como solvente, 14,5 %. La presión aplicada en la compactación de la mezcla fue de 2,77 MPa. Las dimensiones fueron de 47 mm de diámetro por 50 mm de largo. No elaboraron composiciones en diferentes proporciones, pero trabajaron con cantidades de masa diferentes. La carga promedio de resistencia al aplastamiento obtenida para un lote de 20 briquetas fue de 237,74 N, lo cual incumple los parámetros de la norma NTC2060. En cuanto a la caracterización energética, determinaron que el poder calorífico superior de la briqueta fue de 17,21 MJ kg⁻¹. El contenido de cenizas fue de 1,76 %, mientras que la humedad 9,12 %. El poder

calorífico de estas briquetas es inferior a otras biomasas como el carbón vegetal, la corteza de pino, el bagazo de caña o los tallos del café. Sin embargo, es similar a la cascarilla de arroz y papel, y superior a la viruta seca, la paja, el aserrín, el coco y la corteza de caña.

En el estudio realizado por Vargas (2018) se caracterizaron pellets que emplearon como materia base la borra con tres diferentes aglomerantes: glicerina, biodiesel y aceite de palma. Para cada grupo de aglomerantes se utilizaron en proporciones en peso de 2,5 y 8%, y con contenidos de humedad de 4,6 y 8%, respectivamente. Los pellets se elaboraron con una longitud promedio de 25 mm y un diámetro de 5,3 mm. El estudio demostró que el poder calorífico de los pellets elaborados a base de solo borra es de 23,08 MJ kg⁻¹. Con los otros aglomerantes valores se obtuvieron valores entre los 20 y 24 MJ kg⁻¹.

Tabla 5. Resumen de las investigaciones en briquetas para América

Fuente	Parámetro evaluado	Aporte relevante
Soares et al. (2015)	Elaboración a base de borra, aserrín de madera en composiciones de 80:20, 70:30; 60:40; 50:50 y 40:60	Se incrementa el poder calorífico; se reduce la resistencia al aplastamiento al aumentar el contenido de aserrín. El mejor valor se obtuvo para 60% de borra (85,84 MJ kg ⁻¹)
Balseca-Sampedro et al. (2018)	Elaboración a base de borra y almidón de Yuca, usando agua como solvente. Única composición 72,68:12,82. Agua 14,5 %	Se obtuvo una resistencia al aplastamiento de 237,74 N, que está por debajo del estándar utilizado en la NTC 2060. Pero es aceptable para condiciones de apilamiento en cajas del producto. El poder calorífico se estimó en 17,21 MJ kg ⁻¹
Vargas (2018)	Elaboración con base de borra, aglomerada con glicerina, biodiesel y aceite de palma en proporciones de 2, 5 y 8 % con cada uno. Los contenidos de humedad fueron de 4, 6 y 8 %	El poder calorífico aumenta con el contenido de borra (23,08 MJ kg ⁻¹), pero disminuye la consistencia del pellet

Fuente: elaboración propia

La tabla 5 resume los aportes más relevantes de cada una de las investigaciones realizadas en América.

Las combinaciones en diferentes proporciones con diversos aglomerantes generan caracterizaciones diversas, y por ende poder calorífico más bajo cuando las briquetas o pellets son elaborados con el 100% de borra de café (Nosek et al., 2020). De igual manera, las diferentes mezclas influenciarán la composición y están relacionadas con las emisiones (Colantoni et al., 2021) durante la combustión. Las posibilidades actuales en el uso de la borra de café han llevado a estudios en la viabilidad de tecnificar aún más el proceso de fabricación y analizar valoraciones cuantitativas con modelos logísticos soportados en las Tecnologías de la Información y las Comunicaciones (ICT) (Bottani et al., 2019).

En cuanto al poder calorífico de este biocombustible sólido, la presente revisión arrojó que la mayoría de las investigaciones obtuvieron valores entre 17 y 27 MJ, cuando es más abundante la base de borra y dependiendo del aglomerante utilizado. Los estudios que evaluaron las emisiones producidas durante el proceso de combustión, evidenciaron una disminución en los gases de efecto invernadero y el material particulado. Sin embargo, aún se deben explorar alternativas para reducir los NOx que siguen estando presentes. Los estudios analizados demuestran que los biocombustibles sólidos a base de borra superan en poder calorífico a aquellos elaborados con otros residuos como la cascarilla el cual estuvo alrededor de los 16 MJ kg⁻¹.

De otro lado, el comportamiento mecánico en los estudios donde se evaluó, mostró que los biocombustibles sólidos a base de borra, logran buenas propiedades de consistencia y estabilidad física cuando se incrementa el contenido de aglomerante. Esta propiedad es de suma importancia en operaciones de transporte, distribución y almacenamiento donde se deberá garantizar la integridad y presentación física del producto.

La borra de café surge como un insumo que es prácticamente inagotable debido a la gran cantidad de café producido y consumido a nivel mundial. En un país como Colombia esta fuente está enteramente disponible para obtener la borra y aprovechar su potencial energético, y otras características en diferentes aplicaciones, dentro de las cuales se destacan, remoción de plomo del agua, producción de biodiesel, mejoras en compostaje, nutriente de suelos y fuente de antioxidantes y otros nutrientes para la industria alimenticia y cosmética (Edward Group, 2013). También aparecen oportunidades de economía circular alrededor de emprendimientos como la elaboración de prendas, utensilios, muebles, entre otros, los cuales dinamizarían la economía local (Trujillo, 2019).

Conclusiones

La revisión bibliográfica demuestra la importancia que han tenido los desechos del café como fuente energética sostenible, ya que se emplean como

materia prima que no requiere ser comprada y que no afecta el ambiente.

El poder calorífico de las briquetas de borra no supera al del carbón, ni al de la leña, pero es elevado, presenta buenos rendimientos y se surge como un buen sustituto para estos combustibles tradicionales.

La mayoría de las experiencias que toman como materia prima la borra, usan otros desechos como hojas, tallos, aserrín o papel cartón para mejorar su forma y consistencia. Esto hace que sean productos económicamente sostenibles, ya que no requieren invertir en materias primas. La excepción se encontró en el uso del almidón de yuca, la glicerina, el biodiesel y aceite de palma, que son insumos que deben comprarse (Vargas, 2018).

El desarrollo y comercialización de este tipo de biocombustibles mitiga los problemas de deforestación por la consecución de leña y acumulación de residuos en rellenos sanitarios, causantes de metano.

Colombia se perfila como un gran desarrollador de este tipo de iniciativas al ser un gran productor y consumidor de la bebida. Se deben evaluar los impactos en la salud de la población usuaria de este tipo de combustibles o sugerir su implementación con sistemas adecuados de ventilación.

Agradecimientos. Los autores expresan sus agradecimientos a la Fundación Universidad de América, sus Directivos, a la Ing. María Angélica Acosta, directora del programa de Ingeniería Mecánica, y a la dirección de Investigaciones en cabeza del Dr. Luis Fernando Sánchez por el apoyo proporcionado a la ejecución de los proyectos de las convocatorias 2018-2019 código FUA.2018-10.INV.09 y 2020-2021 código IIM-003-2020.

Contribuciones de autoría:

- Claudio Alberto Moreno Arias – Investigador principal. Consolidación de la revisión de fuentes y aportes para la elaboración del artículo.
- Oscar Chamarraví Guerra – Coinvestigador. Revisión de estudios e investigaciones en África y Asia.
- Eric Fabián Navarro Árquez – Coinvestigador. Revisión de estudios en Asia y América.
- Miguel Fernando Jiménez Jiménez – Coinvestigador. Revisión de estudios en África y Europa.

Conflictos de interés: Los autores declaramos que no tenemos ningún conflicto de interés con la elaboración y postulación del presente artículo a la revista.

Referencias

Allesina, G., Pedrazzi, S., Allegretti, F., Tartarini, P., 2017. Spent coffee grounds as heat source for coffee roasting

plants: Experimental validation and case study. *Appl. Therm. Eng.* 126, 730-736. DOI: 10.1016/j.applthermeng.2017.07.202

Armenteras, D., González, T., Meza, M., Vélez, J., 2018. Antecedentes. En: Armenteras, D., González, T., Meza, M., Ramírez-Delgado, J., Cabrera, E., Galindo, G., Yepes, A. (Ed.), Causas de degradación forestal en Colombia: una primera aproximación. FAO; MADS; IDEAM, Bogotá, DC. pp. 4-5.

Asamoah, B., Nikiema, J., Gebrezgabher, S., Odonkor, E., Njenga, M., 2016. A review on production, marketing and use of fuel briquettes. International Water Management Institute (IWMI), Colombo, Sri Lanka. DOI: 10.5337/2017.200

Balseca-Sampedro, O., López-Ortiz, S., Viteri-Núñez, E., Analuisa-López, D., Hernández-Gavilanes, E., 2018. Elaboración, caracterización y posibles aplicaciones de briquetas de residuos de café (BORRA) como biocombustible sólido. *Polo Conoc.* 3(7), 420-452. DOI: 10.23857/pc.v3i7.565

Bio-Bean, s. f. Coffee Logs. Disponible en: <https://www.bio-bean.com/coffee-logs/>; consultado marzo 2020.

Blinová, L., Sirotiak, M., Bartošová, A., Soldán, M., 2017. Review: Utilization of waste from coffee production. Research Papers Faculty of Materials Science and Technology Slovak University of Technology in Trnava 25(40), 91-101. DOI: 10.1515/rput-2017-0011

Bottani, E., Tebaldi, L., Volpi, A., 2019. The role of ICT in supporting spent coffee grounds collection and valorization: A quantitative assessment. *Sustainability* 11(23), 6572. DOI: 10.3390/su11236572

Brunerová, A., Roubík, H., Brožek, M., Haryanto, A., Hasanudin, U., Iryani, D., Herák, D., 2020. Valorization of bio-briquette fuel by using spent coffee ground as an external additive. *Energies* 13(1), 54. DOI: 10.3390/en13010054

Celis, T., 2017. Briquetas, otra forma de ver el café. *Diario de prensa La república* del 24 de enero, disponible en: <https://www.agronegocios.co/agricultura/briquetas-otra-forma-de-ver-el-cafe-2622432>; consultado: enero 2021.

Chen, N., Chen, M., Fu, B., Song, J., 2017. Far-infrared irradiation drying behavior of typical biomass briquettes. *Energy* 121, 726-738. DOI: 10.1016/j.energy.2017.01.054

Ciesielczuk, T., Karwaczyńska, U., Sporek, M., 2015. The possibility of disposing of spent coffee ground with energy recycling. *J. Ecol. Eng.* 16(4), 133-138. DOI: 10.12911/22998993/59361

Colantoni, A., Paris, E., Bianchini, L., Ferri, S., Marcantonio, V., Carnevale, M., Palma, A., Civitarese, V., Gallucci, F., 2021. Spent coffee ground characterization, pelletization test and emissions assessment in the combustion process. *Sci. Rep.* 11(1), 5119. DOI: 10.1038/s41598-021-84772-y

- Edward Group, 2013. 5 uses for spent coffee grounds. Disponible en: <https://www.globalhealingcenter.com/natural-health/5-uses-for-spent-coffee-grounds/>; consultado octubre de 2020.
- Eshetu, M., 2019. Sequential production of methyl ester, bioethanol and briquette from spent coffee ground. *J. Fundam. Renewable Energy Appl.* 9, 28.
- Figueroa, G., Homann, T., Rawel, H., 2016. Coffee production wastes: Potentials and perspectives. *Austin Food Sci.* 1(3), 1014.
- Fröling, A., 2015. Determination of element composition in Coffee Bricks before and after incineration. Trabajo de grado. Department of Chemistry-BMC, Uppsala University, Uppsala, Suecia.
- Goche, J., Domínguez, P., Montiel, E., Palacios, C., 2015. Biocombustibles sólidos, una opción sustentable para la producción de energía. En: Carrillo-Parra, A., Rutíaga Quiñones, J. (Eds.), *Biocombustibles sólidos*. Universidad Autónoma Nuevo León. Monterrey, México.
- González-García, M., Maldonado Gomez, D., Torres-Duque, C., Barrero, M., Jaramillo Villegas, C., Pérez, J., Varon, H., 2013. Tomographic and functional findings in severe COPD: comparison between the wood smoke-related and smoking-related disease. *J. Bras. Pneumol.* 39(2), 147-154. DOI: 10.1590/S1806-37132013000200005
- Itten, R., Stucki, M., Jungbluth, N., 2011. Life cycle assessment of burning different solid biomass substrates. ESU-services, Bern, Suiza.
- Kang, S., Oh, H., Kim, J., Choi, K., 2017. Characteristics of spent coffee ground as a fuel and combustion test in a small boiler (6.5 kW). *Renew. Energy* 113, 1208-1214. DOI: 10.1016/j.renene.2017.06.092
- Kansai, N., Chaisuwan, N., Supakata, N., 2018. Carbonized briquettes as a tool for adding value to waste from rain tree (*Samanea Saman*) and coffee ground/tea waste. *Eng. J.* 22(6), 47-63. DOI: 10.4186/ej.2018.22.6.47
- Kristanto, G., Wijaya, H., 2018. Assessment of spent coffee ground (SCG) and coffee silverskin (CS) as refuse derived fuel (RDF). *IOP Conf. Ser. Earth Environ. Sci.* 195(1), 12056. DOI: 10.1088/1755-1315/195/1/012056
- Kurmi, O., Lam, K., Ayres, J., 2012. Indoor air pollution and the lung in low- and medium-income countries. *Eur. Respir. J.* 40(1), 239-254. DOI: 10.1183/09031936.00190211
- Law, H., Gan, L., Gan, H., 2018. Experimental study on the mechanical properties of biomass briquettes from different agricultural residues combination. *MATEC Web of Conf.* 225, 4026. DOI: 10.1051/matecconf/201822504026
- Limousy, L., Jeguirim, M., Dutournié, P., Kraiem, N., Lajili, M., Said, R., 2013. Gaseous products and particulate matter emissions of biomass residential boiler fired with spent coffee grounds pellets. *Fuel* 107, 323-329. DOI: 10.1016/j.fuel.2012.10.019
- Maninder, Kathuria, R., Grover, S., 2014. Using agricultural residues as a biomass briquetting: An alternative source of energy. *IOSR J. Electr. Electron. Eng.* 1(5), 11-15.
- Mhilu, C., 2014. Analysis of energy characteristics of rice and coffee husks blends. *Int. Sch. Res.* 2014, 196103. DOI: 10.1155/2014/196103
- Ministerio de Salud, 2016. Tómate la vida con un segundo aire. Estrategia para la prevención y control de enfermedades respiratorias crónicas. OPS; OMS, Bogotá, DC.
- Mohd, N., 2014. The production of briquette from coffee waste. Tesis de maestría. Chemical Engineering Programme. Universiti Teknologi Petronas. Tronoh, Malasya.
- Naruephat, T., Patcharee, P., 2015a. A study on how to utilize waste paper and coffee residue for briquettes production. *Int. J. Environ. Sci. Dev.* 6(3), 221-224. DOI: 10.7763/IJESD.2015.V6.590
- Naruephat, T., Patcharee, P., 2015b. The evaluation of fuel briquettes produced from municipal wastes. *Int. J. Environ. Sci. Dev.* 6(3), 221-224. DOI: 10.7763/IJESD.2015.V6.594
- Nijhuis, M., 2017. Three billion people cook over open fires with deadly consequences. National Geographic, disponible en: <https://www.nationalgeographic.com/photography/proof/2017/07/guatemala-cook-stoves/>; consultado noviembre 2019.
- Nosek, R., Tun, M., Juchelkova, D., 2020. Energy utilization of spent coffee grounds in the form of pellets. *Energies* 13(5), 1235. DOI: 10.3390/en13051235
- Organización Mundial de la Salud, 2020. Enfermedades respiratorias crónicas – Enfermedad pulmonar obstructiva crónica. Disponible en: <https://www.who.int/respiratory/copd/es/> Consultado en junio 2020.
- Pallavi, H., Srikanthswamy, S., Kiran, B., Vyshnavi, D., Ashwin, C., 2013. Briquetting agricultural waste as an energy source. *J. Environ. Sci. Comput. Sci. Eng. Technol.* 2(1), 160-172.
- Pilusa, T., 2010. Process parameters and conditions for batch production of eco-fuel briquettes. Tesis de maestría. University of Johannesburg, Johannesburg, Sudáfrica.
- Pilusa, T., Huberts, R., Muzenda, E., 2013. Emissions analysis from combustion of eco-fuel briquettes for domestic applications. *J. Energy South. Afr.* 24(4), 30-36.
- Pilusa, T., Huberts, R., Muzenda, E., 2012. Low pressure binder-less densification of fibrous biomass material using a screw press. *Int. J. Chem. Mol. Nuclear Mater. Metallurg. Eng.* 6(8), 657-660.

- Potip, S., Wongwuttanasatian, T., 2018. Combustion characteristics of spent coffee ground mixed with crude glycerol briquette fuel. *Combust. Sci. Technol.* 190(11), 2030-2043. DOI: 10.1080/00102202.2018.1482888
- Rodríguez, N., Zambrano, D., 2010. Los subproductos del café: fuente de energía renovable. *Avances Técnicos* 393. CENICAFE, Manizales, Colombia.
- Seco, A., Espuelas, S., Marcelino, S., Echeverría, A., Prieto, E., 2020. Characterization of biomass briquettes from spent coffee grounds and xanthan gum using low pressure and temperature. *Bioenerg. Res.* 13(1), 369-377. DOI: 10.1007/s12155-019-10069-8
- Shiferaw, Y., Tedla, A., Mellese, C., Mengistu, A., Debay, B., Selamawi, Y., Merene, E., Awol, N., 2018. Conversion of coffee residue waste and *Eucalyptus globulus* leaf extract into an alternative solid fuel. *Energy Sources A: Recovery Util. Environ. Eff.* 40(7), 780-786. DOI: 10.1080/15567036.2018.1463309
- Shukla, S., Vyas, S., 2015. Study of biomass briquettes, factors affecting Its performance and technologies based on briquettes. *IOSR J. Environ. Sci. Toxicol. Food Technol.* 9(11), 37-44. DOI: 10.9790/2402-091123744
- Soares, L., Moris, V., Yamaji, F., Paiva, J., 2015. Utilização de resíduos de borra de café e serragem na moldagem de briquetes e avaliação de propriedades. *Matéria* 20(2), 550-560. DOI: 10.1590/S1517-707620150002.0055
- Suryaningsih, S., Nurhilal, O., Yuliah, Y., Mulyana, C., 2017. Combustion quality analysis of briquettes from variety of agricultural waste as source of alternative fuels. *IOP Conf. Ser. Earth Environ. Sci.* 65(1), 12012. DOI: 10.1088/1755-1315/65/1/012012
- Trujillo Flechas, J., 2019. Innovación estratégica para negocios con borra de café en la localidad de Teusaquillo – Bogotá. Tesis de maestría. Corporación Universitaria Minuto de Dios, Bogotá, DC.
- Vargas, A., 2018. Estudio de la producción de pellets a partir de borra de café. Tesis de maestría. Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional de Colombia, Bogotá, DC.
- Vera Velásquez, A., 2014. Diseño de briquetas ecológicas para la generación de energía calórica y mejoramiento de ecosistemas en el corregimiento de Nabusimake, municipio de Pueblo Bello-Cesar. Trabajo de grado. Escuela de Ciencias Agrícolas, Pecuarias y del Medio Ambiente, Universidad Nacional Abierta y a Distancia, Valledupar, Colombia.
- Wei, Y., Chen, M., Li, Q., Niu, S., Li, Y., 2019. Isothermal combustion characteristics of anthracite and spent coffee grounds briquettes. *J. Therm. Anal. Calorim.* 136(3), 1447-1456. DOI: 10.1007/s10973-018-7790-x
- Zerbinatti, O., Silva, A., Pereira, A., Miranda, J., 2014. Briquetagem de resíduos de cafeiro conduzido no sistema safra zero. *Semin. Cienc. Agrar.* 35(3), 1143-1152. DOI: 10.5433/1679-0359.2014v35n3p1143