

ESTUDIOS

Potencial energético de los subproductos del café en Centroamérica: hacia una bioeconomía circular¹

Sergio Esaú Fernández-Pérez²

Resumen: Este estudio estima, por primera vez, la generación y el potencial energético de los subproductos del café en Centroamérica, a partir de datos secundarios sobre flujos de masa del procesamiento húmedo y rendimientos de biocombustibles mediante diversas rutas de valorización. Los resultados indican que el procesamiento del café genera 3.2 millones de toneladas de subproductos, principalmente pulpa y mucílago, que representan más del 60% de la masa inicial de las cerezas de café. Entre las rutas de valorización, la digestión anaeróbica de estos subproductos podría producir hasta 172.6 millones de m³ de metano al año, equivalentes a 1.71 millones de MWh de energía, lo que se traduciría en un ahorro potencial de hasta 140 millones de dólares en combustibles. Estas alternativas permitirían sustituir combustibles fósiles, reducir emisiones de gases de efecto invernadero y fortalecer la sostenibilidad del sector cafetalero. No obstante, su implementación requiere superar desafíos técnicos, económicos y de infraestructura, así como promover políticas públicas, inversiones y capacitación que faciliten la adopción de tecnologías de valorización dentro de una estrategia regional de bioeconomía circular.

Palabras clave: *biocombustibles, residuos, energía, valorización, bioeconomía.*

Fecha de recepción: 5 de abril de 2026.

Fecha de admisión definitiva: 24 de abril de 2026.

¹ El artículo fue revisado por los evaluadores del Call for Paper 2025 organizado por SICA, SIECA y BCIE, obteniendo el primer lugar del Certamen. En el siguiente link se explica el procedimiento del concurso: <https://www.sieca.int/call-for-papers-2025/>

² Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza (CATIE), <https://orcid.org/0000-0003-4707-7366>, sergio.fernandez@catie.ac.cr.

Energy Potential of Coffee By-Products in Central America: Towards a Circular Bioeconomy

Abstract: This study estimates, for the first time, the generation and energy potential of coffee by-products in Central America, based on secondary data on mass flows from wet processing and biofuel yields from different valorization pathways. The results indicate that this process generates approximately 3.2 million tons of by-products, mainly pulp and mucilage, which account for more than 60% of the initial mass of coffee cherries. Among the valorization pathways, the anaerobic digestion of these by-products could produce up to 172.6 million m³ of methane per year, equivalent to 1.71 million MWh of energy, representing potential fuel cost savings of up to 140 million USD. These alternatives could replace fossil fuels, reduce greenhouse gas emissions, and enhance the sustainability of the coffee sector. However, their implementation requires overcoming technical, economic, and infrastructure challenges, as well as promoting public policies, investments, and capacity building to facilitate the adoption of valorization technologies within a regional circular bioeconomy strategy.

Keywords: *biofuels, byproducts, energy, valorization, bioeconomy.*

Potentiel énergétique des sous-produits du café en Amérique centrale : vers une bioéconomie circulaire

Résumé: Cette étude estime, pour la première fois, la génération et le potentiel énergétique des sous-produits du café en Amérique centrale, à partir de données secondaires sur les flux de matière issus du traitement humide et les rendements en biocarburants selon différentes voies de valorisation. Les résultats indiquent que ce procédé génère environ 3,2 millions de tonnes de sous-produits, principalement de la pulpe et du mucilage, qui représentent plus de 60 % de la masse initiale des cerises de café. Parmi les voies de valorisation, la digestion anaérobie de ces sous-produits pourrait produire jusqu'à 172,6 millions de m³ de méthane par an, soit l'équivalent de 1,71 million de MWh d'énergie, ce qui représenterait une économie potentielle allant jusqu'à 140 millions de dollars en combustibles. Ces alternatives permettraient de remplacer les combustibles fossiles, de réduire les émissions de gaz à effet de serre et de renforcer la durabilité du secteur caféier. Cependant, leur mise en œuvre nécessite de surmonter des défis techniques, économiques et d'infrastructure, ainsi que de promouvoir des politiques publiques, des investissements et des actions de formation afin de faciliter l'adoption de technologies de valorisation dans le cadre d'une stratégie régionale de bioéconomie circulaire.

Mots clés : *biocarburants, sous-produits, énergie, valorisation, bioéconomie.*

I. Introducción

El café es segunda bebida más consumidas en el mundo, solo por detrás del agua (Bosso et al., 2023). Según estimaciones recientes, el consumo diario global se sitúa en torno a los 2.25 mil millones de tazas (Surma & Oparil, 2021). Además, el café figura entre los veinte principales productos que generan mayores ingresos para los países exportadores, con ingresos estimados en aproximadamente 26.4 mil millones de dólares (FAO, 2025). Durante el ciclo productivo 2023/24, la *International Coffee Organization* (ICO, 2023) reportó una producción de 178 millones de sacos de 60 kg, lo que equivale a 10.7 millones de megagramos (Mg) de café verde. Del total mundial, el 57.3% corresponde a la variedad arábica y el 42.7% a robusta. Sudamérica aportó cerca del 48.3% de la producción global, con Brasil como país líder. En tanto, la región de Centroamérica, el Caribe y México alcanzó una participación del 11.4%, con Honduras destacándose como el principal productor en esa área.

El café es uno de los cultivos más relevantes de Centroamérica, no solo por su aporte económico, sino también por su papel en la generación de medios de vida (Tabla 1). Se estima que la caficultura sostiene a aproximadamente 1.6 millones de personas, distribuidas en más de 323 familias productoras, y ocupa más de un millón de hectáreas, lo que equivale a cerca del 2.06% de la superficie regional. Según datos de la Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación (FAO, 2025), durante los últimos cinco ciclos productivos (2019-2024), la región ha generado un promedio superior a 908 mil Mg de café verde, de los cuales el 88.6% se destina a la exportación hacia mercados como Estados Unidos, la Unión Europea y Japón, generando ingresos que alcanzan los 3.89 mil millones de dólares y consolidando al café como el tercer producto de mayor ingreso por exportación en la región

A pesar de su relevancia económica y social, la cadena de valor del café conlleva importantes desafíos ambientales asociados a la generación de subproductos. El procesamiento húmedo del café produce grandes volúmenes de desechos sólidos y líquidos, estimados en alrededor de 40.7 millones de toneladas anuales a nivel global (ICO, 2024). Estos subproductos comprenden cáscaras, pulpa, mucílago, pergamino, piel plateada, aguas residuales y posos de café usados (Lestari et al., 2022), generados a lo largo de las distintas etapas productivas —desde la cosecha hasta la preparación de la bebida. La acumulación y disposición inadecuada de estos subproductos constituye una de las principales fuentes de contaminación orgánica en zonas cafetaleras, afectando la calidad del agua, los suelos y los ecosistemas acuáticos (Dadi et al., 2018).

TABLA I. Superficie, productores, producción y exportación de café verde en Centroamérica

América Central	Productores	Área (ha)	Producción de café verde (Mg)						Café exportado
			2019-20	2020-21	2021-22	2022-23	2023-24	Media	
Honduras	92,033	317,142	472,498	364,552	417,591	330,111	384,361	393,823	89.6%
Guatemala	125,000	376,019	216,400	246,000	226,700	225,500	225,327	227,985	88.3%
El Salvador	19,890	111,230	33,641	35,000	41,911	41,866	32,326	36,949	87.4%
Nicaragua	51,000	148,393	156,902	154,410	165,558	170,181	143,337	158,077	97.0%
Costa Rica	26,725	93,697	76,385	86,791	95,322	74,620	78,822	82,388	78.7%
Panamá	8,280	28,306	8,371	6,254	6,020	13,689	12,760	9,419	2.3%
Belice	nd.	73	89.4	89.5	89.6	89.5	89.6	89.5	nd.
Total	322,928	1,074,860	964,286	893,097	953,192	856,056	877,023	908,731	88.6%

Fuente: elaborado a partir de datos extraídos de la FAO (2025). nd.: no definido.

El enfoque de bioeconomía circular proporciona una alternativa a los subproductos del café, al mirarlos no como un problema, sino como una oportunidad para generar valor. Este enfoque busca transformar los subproductos en biocombustibles y bioproductos de alto valor mediante biorrefinerías, evitando los problemas ambientales, las emisiones peligrosas y los costos asociados con su eliminación (Mahmoud et al., 2022). Estos biocombustibles pueden convertirse en energía aprovechable dentro de los mismos beneficios de café y tostaderías, contribuyendo a la autosuficiencia energética y a la sostenibilidad del sector cafetalero, pues el café es uno de los productos más intensivos en energía (Ladha-Sabur et al., 2019). Sin embargo, la mayoría de los estudios realizados se han enfocado en casos locales o en rutas específicas de aprovechamiento, por lo que aún no existen estudios con una visión integral del potencial energético y económico de estos subproductos a nivel regional.

En este contexto, el presente estudio busca llenar este vacío de información al estimar el potencial energético de los subproductos del café en Centroamérica desde una mirada de bioeconomía circular. Para ello, se cuantifican los volúmenes de subproductos generados a partir de los datos de producción cafetalera en la región; posteriormente, se estima el potencial energético mediante la aplicación de diferentes rutas de valorización reportadas en la literatura científica, y finalmente, se calculan los posibles ahorros en combustibles fósiles asociados al aprovechamiento de los biocombustibles obtenidos. Con estos resultados, se pretende aportar evidencia científica sólida que oriente la

transición hacia una caficultura más circular y sostenible, ofreciendo información útil para productores, instituciones y responsables de políticas públicas que buscan aprovechar mejor los recursos y reducir el impacto ambiental de la cadena del café.

2. Revisión de literatura

2.1. Cadena de valor del café

La cadena de valor del café a nivel mundial es amplia y compleja, ya que involucra múltiples etapas de producción y a diversos actores a lo largo del proceso. Además, existe una marcada separación geográfica entre las fases iniciales de producción y las etapas finales de procesamiento (Marescotti & Belletti, 2016). En el primer eslabón participan los proveedores locales, quienes abastecen de insumos a los pequeños y medianos agricultores ubicados en las regiones tropicales de América Latina, Asia y África, donde las condiciones climáticas y de suelo son óptimas para el cultivo de café. El segundo eslabón corresponde a la producción propiamente dicha, en la que predominan pequeños productores responsables de aproximadamente el 70% de la producción mundial de café (ICO, 2019). Estos agricultores no solo realizan las actividades productivas básicas, como la siembra, el mantenimiento de las plantas y la cosecha, sino que en algunos casos también participan en las labores iniciales del beneficiado húmedo, incluyendo el despulpado, la fermentación, el lavado y el oreado del café (Ruiz-Nájera et al., 2021).

El procesamiento postcosecha del café representa el tercer eslabón de la cadena de valor. En esta etapa, las cerezas recién cosechadas se despulpan, secan y descascarillan para convertirse en granos de café verde listos para el tostado y la preparación final (Kleinwächter et al., 2015). Tradicionalmente, se aplican los métodos de procesamiento húmedo y seco, los cuales no solo influyen en las características sensoriales y organolépticas del café (Hameed et al., 2018), sino también en la cantidad y tipo de subproductos generados durante el proceso. En este eslabón participan distintos actores, que incluyen productores, cooperativas cafetaleras, empresas privadas con centrales de beneficiado y exportadores. La forma en que se organiza esta participación varía según el país y la región. Por ejemplo, en Honduras los agricultores suelen vender café pergamino a intermediarios, quienes luego lo trasladan a los exportadores. En contraste, en Costa Rica los productores venden directamente las cerezas a las estaciones de lavado (beneficios), que se encargan de procesarlas antes de enviarlas a los exportadores (Boudreau et al., 2023). A nivel global, se estima que cerca del 90% del café producido se comercializa como café verde (ICO, 2020b).

El cuarto eslabón corresponde a la torrefacción o tostado de los granos. Esta etapa es clave para desarrollar las propiedades químicas, físicas y sensoriales que distinguen a los cafés tostados (Wang & Lim, 2015). Durante el tostado ocurren reacciones complejas, como la reacción de *Maillard*, que genera los compuestos responsables de los aromas, y la pirólisis, que produce diversos compuestos volátiles y no volátiles que contribuyen al sabor y al aroma característicos del café (Kocadağlı et al., 2012). Este eslabón está dominado principalmente por países desarrollados como Estados Unidos, Japón y los miembros de la Unión Europea, que cuentan con la infraestructura industrial necesaria para reexportar café verde, descafeinado, tostado y soluble a gran escala (Samper et al., 2017). Por su parte, los países productores enfrentan importantes desafíos para agregar valor al café verde, incluyendo barreras arancelarias, la fuerte competencia con marcas consolidadas y los retos técnicos propios del procesamiento, además de quedarse con la mayor carga ambiental asociadas a los subproductos generados (ICO, 2020a).

El quinto eslabón está relacionado con su comercialización, un proceso que involucra a empresas multinacionales, minoristas como supermercados, cafeterías, servicios de alimentos y plataformas de comercio electrónico. El café se comercializa en diversas presentaciones, siendo el café tostado y molido el que concentra alrededor del 75% del consumo mundial. Por su parte, el café soluble o instantáneo tiene una fuerte presencia en mercados de Europa Oriental, Asia Oriental y el Sudeste Asiático, mientras que el café descafeinado mantiene una participación menor, principalmente en los mercados europeos (Bozzola et al., 2021). En términos de participación en el mercado, grandes compañías como Neumann Kaffee Gruppe, Louis Dreyfus Company, ECOM, ED&F Man Commodities y OLAM controlan aproximadamente la mitad de la comercialización global de café (Panhuysen & Pierrot, 2020).

El último eslabón lo constituyen los consumidores, siendo la Unión Europea, Estados Unidos, Brasil, Alemania y Japón responsables de cerca del 70% del consumo total a nivel mundial. Estudios han mostrado que indicadores como el Índice de Desarrollo Humano (IDH) y el Producto Interno Bruto (PIB) de los países presentan una alta correlación con el consumo per cápita de café (Quadra et al., 2020). En las últimas décadas, el consumo global de café ha crecido alrededor de un 67.9%, impulsado principalmente por un aumento cercano al 30% en los países productores (Torga & Spers, 2020). Las decisiones de consumo dependen de múltiples factores, incluyendo preferencias personales, características económicas y sensoriales del producto, el contexto de consumo, variables sociodemográficas y la consideración de prácticas sostenibles durante la producción (Samoggia & Riedel, 2018).

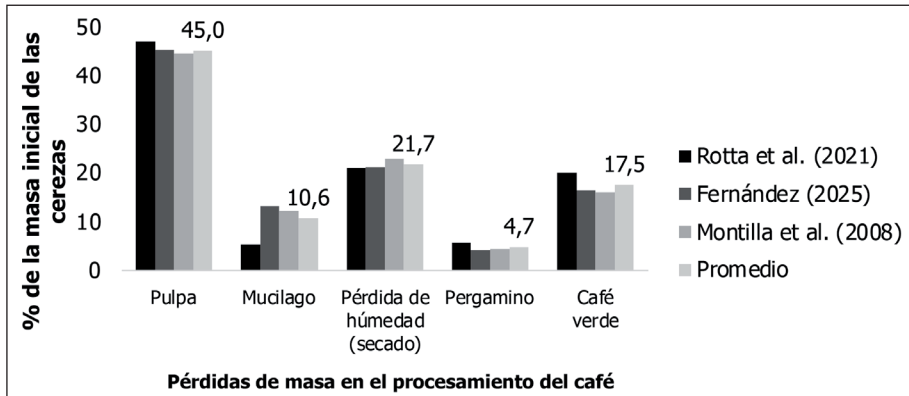
2.2. Subproductos del procesamiento del café

Los subproductos que se generan al transformar las cerezas de café en café verde dependen del método de procesamiento utilizado (Lee et al., 2023; Serna-Jiménez et al., 2022). En el caso del procesamiento natural o seco, las cerezas se secan al sol durante 2 a 4 semanas o se utilizan secadores mecánicos hasta alcanzar un contenido de humedad inferior al 12% (Franca & Oliveira, 2009; Iriondo-DeHond et al., 2020). Luego, se lleva a cabo el descascarillado mecánico para extraer los granos de café verde, generando como subproducto la cascarilla de café, una mezcla de piel, pulpa, mucílago y pergamino (Alves et al., 2017). Este residuo representa entre el 45% y el 50% del peso seco de la cereza fresca (del Castillo et al., 2019).

En el procesamiento húmedo del café, las cerezas se despulpan para retirar la piel y la pulpa, generando en promedio alrededor del 45% de pulpa en relación con el peso inicial del fruto (Fernandez Perez, 2025; Montilla-Pérez et al., 2008; Rotta et al., 2021). A continuación, los granos pasan por un proceso de fermentación y lavado que dura entre 24 y 72 horas, durante el cual se produce aproximadamente un 10% de mucílago y se generan entre 40 y 45 litros de aguas residuales por cada kilogramo de café procesado (Oller et al., 2011). Finalmente, los granos cubiertos por pergamino se lavan y secan hasta alcanzar un contenido de humedad cercano al 12%, momento en el que se retira el pergamino, generando entre un 4 y 6% de este subproducto en estado seco (Figura 1).

En los países productores, los subproductos como la pulpa, el mucílago y el pergamino se generan durante la obtención del grano verde, que posteriormente se exporta a los países consumidores, donde se almacena hasta ser tostado (Mussatto et al., 2011). Durante el tostado, que se realiza a temperaturas entre 200 °C y 300 °C durante 12 a 21 minutos con agitación constante, se desprende una fina capa conocida como piel plateada, que constituye el único subproducto de esta etapa (Alves et al., 2017; Narita & Inouye, 2014). Tras el tostado, los granos se muelen para preparar la bebida, generando los posos de café, que contienen los compuestos no extraídos por el agua caliente. Se estima que, por cada 100 kg de café verde, se producen aproximadamente 2.1 kg de piel plateada (Iriondo-DeHond et al., 2020) y 65 kg de posos de café (Murthy & Madhava Naidu, 2012).

FIGURA I. Comparación de estudios en Centroamérica sobre la pérdida de masa en cuatro etapas del procesamiento postcosecha del café (despulpado, fermentación, secado y trillado) y proporción final de café verde



2.3. Rutas de valorización energética en el marco de la bioeconomía circular del café

La bioeconomía circular surge de la integración de los principios de la economía circular en la bioeconomía. Este enfoque busca disminuir la dependencia de los recursos fósiles, transformar los procesos productivos y fomentar la generación de productos sostenibles provenientes de la agricultura, la pesca y la acuicultura, promoviendo al mismo tiempo la producción de bioproductos y bioenergía, nuevas oportunidades de empleo y el desarrollo de industrias innovadoras (Commission European, 2018).

La valorización energética de los subproductos del café abre diversas oportunidades para avanzar hacia una bioeconomía circular. Una de las más prometedoras es la producción de bioetanol, que se obtiene a partir de la fermentación de los azúcares presentes en la pulpa del café, ricos en carbohidratos y celulosa (Serna-Jiménez et al., 2022). Diferentes estudios han mostrado que esta materia prima puede convertirse en etanol mediante fermentación alcohólica usando cepas de *Saccharomyces cerevisiae* y otras levaduras, alcanzando rendimientos significativos en condiciones de laboratorio (Harsono et al., 2015; Mussatto et al., 2012). No obstante, la eficiencia del proceso depende de la liberación de azúcares fermentables a partir de la lignocelulosa, lo que hace necesario optimizar las etapas de hidrólisis y explorar nuevos microorganismos

capaces de mejorar la conversión (Hansen et al., 2015). Con estos avances, el bioetanol podría consolidarse como un biocombustible complementario al diésel y la gasolina, contribuyendo a reducir la huella de carbono de la cadena de valor del café (Serna-Jiménez et al., 2022).

Otra opción prometedora es la producción de biogás a través de la digestión anaerobia, un proceso biotecnológico que transforma la fracción biodegradable de los subproductos en metano (Li et al., 2018). Los subproductos de café, gracias a su alto contenido de materia orgánica, resultan especialmente adecuados para este tipo de aprovechamiento, aunque la presencia de compuestos inhibitorios como lignina o polifenoles puede reducir la eficiencia del proceso (Kivaisi, 2004). Para mejorar los rendimientos, se recomiendan tratamientos previos, ya sean térmicos, enzimáticos o biológicos, así como la co-digestión con otros sustratos agroindustriales (Echeverría & Nuti, 2017). Más allá de la energía que se genera, la digestión anaerobia produce un digestato que puede emplearse como abono orgánico, contribuyendo a cerrar los ciclos de nutrientes y a disminuir la contaminación derivada del manejo inadecuado de subproductos (Arango-Osorio et al., 2019).

Además, se han investigado otras formas de aprovechar los subproductos del café, como la producción de hidrógeno y biodiésel. El hidrógeno puede obtenerse mediante fermentación oscura, utilizando microorganismos del género *Clostridium*, que transforman los azúcares y polisacáridos presentes en los subproductos en un gas rico en hidrógeno (Renaudie et al., 2024; Villa Montoya et al., 2020). Este proceso, que requiere poca energía, se considera una alternativa limpia y prometedora para generar biohidrógeno. Por su parte, el aceite extraído de la cascarilla de café puede convertirse en biodiésel mediante transesterificación, ofreciendo un combustible con características similares al diésel convencional, pero con menores emisiones contaminantes (Nayab et al., 2022). Más allá de los biocombustibles líquidos y gaseosos, la biomasa residual también puede transformarse en biocarbón y briquetas con alto poder calorífico mediante procesos de pirólisis (Setiawan et al., 2025), ampliando así las opciones para un aprovechamiento energético sostenible de los subproductos del café.

Estas alternativas amplían las posibilidades de aprovechamiento de los subproductos del café y consolidan su papel en la transición hacia sistemas productivos más sostenibles y con menor impacto ambiental. Sin embargo, todavía no existen estudios a nivel regional que evalúen de manera integral el potencial energético de los subproductos del café en Centroamérica, considerando sus distintas rutas de valorización, los rendimientos energéticos y su posible contribución a la matriz energética. Esta falta de información limita la capacidad de diseñar políticas y estrategias que fomenten el uso eficiente de estos subproductos dentro de un enfoque de bioeconomía circular.

3. Metodología

3.1. Sitio de estudio

Este estudio se basa en información secundaria sobre la producción cafetalera y los flujos de masa asociados al procesamiento del café en Centroamérica, con el propósito de estimar la cantidad de subproductos generados y su potencial energético y económico mediante diversas rutas de valorización. La región fue seleccionada debido a su papel destacado en la producción mundial de café (ICO, 2023), los retos que impone el cambio climático (Harvey et al., 2018) y la necesidad de implementar soluciones sostenibles frente a la gestión inadecuada de estos subproductos. El análisis se centra en el procesamiento húmedo del café, dado que es el método predominante en la región (Rotta et al., 2021).

3.2. Estimación de subproductos generados

El primer paso para estimar la generación de subproductos del café consistió en recopilar datos sobre la producción cafetalera en los países de Centroamérica. Para ello, se emplearon las estadísticas oficiales reportadas por la FAO correspondientes a los ciclos 2019-2024 (Tabla 1). Dado que dicha información se presenta en toneladas de café verde, fue necesario convertirla a su equivalente en café cereza siguiendo la metodología propuesta por Fernandez Perez (2025). Esta conversión se realizó a partir de las relaciones de masa documentadas en Centroamérica por Fernandez Perez (2025), Rotta et al. (2021) y Montilla-Pérez et al. (2008), quienes cuantificaron los flujos de masa en las distintas etapas del procesamiento húmedo del café (Figura 1). La ecuación 1 muestra el procedimiento aplicado:

$$P_{\text{café_cereza}} = \frac{P_{\text{café_verde}}}{R_{\text{café_verde}} (\%)} \quad (1)$$

donde corresponde a la producción de café en cereza, representa la producción de café verde y indica el rendimiento de café verde obtenido por cada 100 unidades de masa de café cereza procesado. Posteriormente, se calculó la cantidad total y específica de cada tipo de subproducto generado mediante la ecuación 2:

$$SP_i = P_{\text{café_cereza}} * \frac{\%SP_i}{100\%} \quad (2)$$

donde expresa la cantidad total de cada tipo de subproducto y el porcentaje que representa cada uno con respecto al café cereza procesado. Finalmente, para ilustrar la distribución y transformación de la biomasa a lo largo del proceso poscosecha, se elaboró un diagrama de Sankey utilizando el software SankeyMATIC (Bogart, 2014).

3.3. *Potencial energético de los subproductos de café*

La estimación del potencial energético de los subproductos generados durante el procesamiento del café se realizó aplicando el método de transferencia de beneficios. Este enfoque permite aprovechar información existente proveniente de otros estudios o regiones, y adaptarla a un nuevo contexto de análisis (Rosenberger & Loomis, 2017). Su uso es común en evaluaciones ambientales efectuadas por organismos como la EPA (Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos), especialmente cuando la recopilación de datos primarios no es viable por limitaciones de tiempo o recursos (Iovanna & Griffiths, 2006).

Para el cálculo, se aplicó el enfoque de transferencia de valores unitarios, descrito por Richardson et al. (2015). Este procedimiento se basa en revisar literatura científica que haya cuantificado la valorización de subproductos y utilizar los promedios de esos valores unitarios como referencia para el área de estudio. De esta forma, fue posible estimar el potencial económico, expresado como ahorros en combustibles. No se incorporaron costos de producción o transformación debido a la ausencia de datos homogéneos y comparables en la región. Los rendimientos promedio de cada ruta de valorización, expresados por tonelada de residuo de café y obtenidos de diversas fuentes bibliográficas, se resumen en la Tabla 2.

TABLA 2. Rendimientos de biocombustibles a partir de subproductos del procesamiento del café

Sustrato	Combustible	Rendimiento	Unidad	Fuente
Pulpa de café	Metano	321.0	L CH ₄ -kg ⁻¹ VS	Fischer et al. (2010), Baier & Schleiss (2005), Chala et al. (2018), Kivaisi & Rubindamayugi (1996), Widjaja et al. (2019) y Lhaj Lahcen et al. (2018).
	Bioetanol	0.4312	g·g ⁻¹ de azúcar reductor	Rodríguez-Valencia (2013), Menezes et al. (2013), Bonilla-Hermosa et al. (2014), Shenoy et al. (2011) y Phuong et al. (2019).
	Hidrógeno	32.6	L·H ₂ ·Kg ⁻¹ DQO _{inicial}	Miñón-Fuentes & Aguilar-Juárez (2019) y Villa Montoya et al. (2020).
	Briquetas	34.3	%	Tesfaye et al. (2022), Setter et al. (2020), Setter & Oliveira (2022), Merete et al. (2014) y Setiawan et al. (2025).
Mucilago de café	Bioetanol	0.4307	g·g ⁻¹ de azúcar reductor	Orrego et al. (2018), Navia et al. (2011), Pardo et al. (2022), Woldesenbet et al. (2016), Harsono et al. (2015) y Pérez-Sariñana et al. (2015).
	Metano	286.8	L·CH ₄ ·kg ⁻¹ DQO _{removido}	Fischer et al. (2010), Kivaisi & Rubindamayugi (1996), Selvamurugan et al. (2010), Albarracín et al. (2024), Villa-Montoya et al. (2017) y Jung et al. (2012).
	Hidrogeno	133.4	L·H ₂ ·Kg ⁻¹ DQO _{inicial}	Cárdenas et al. (2018), Hernández et al. (2014), Rangel et al. (2021) y Jung et al. (2012).

Nota: L CH₄·kg⁻¹ VS: Litros de metano por cada kilogramo de sólidos volátiles. g·g⁻¹ de azúcar reductor: gramos de bioetanol por cada gramo de azúcar reductor. L·H₂·Kg⁻¹ DQO_{inicial}: Litros de hidrogeno por cada kilogramo de demanda química de oxígeno inicial.

Estos datos sirvieron como base para estimar el potencial total de generación de bioproductos en la región, considerando la masa total de subproductos producidos. El cálculo se efectuó mediante la ecuación 3:

$$BP_i = BPY_i * SP_i \quad (3)$$

donde representa la producción potencial del biocombustible i (en Mg o m³), corresponde al rendimiento específico del biocombustible por cada megagramo de subproducto, y indica la cantidad total del subproducto i generado en la región. Posteriormente, se realizó una conversión a diésel equivalente con base en su poder calorífico inferior (PCI), y posteriormente se multiplicó por el precio local del diésel, a fin de estimar su potencial económico., de acuerdo con la ecuación 4:

$$PE_i = BP_i * P_i \quad (4)$$

donde expresa el potencial económico estimado del biocombustible i , y corresponde a su precio unitario de mercado.

3.4. Análisis de datos

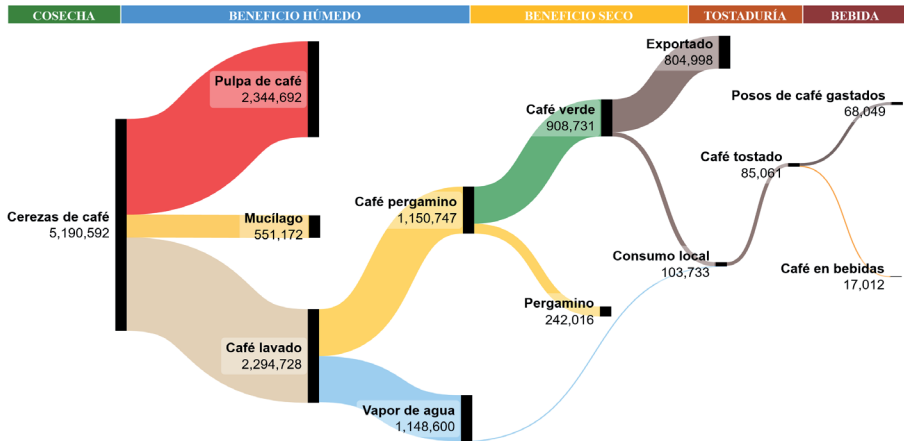
El procesamiento y análisis de los datos se realizaron utilizando el software Stata (StataCorp, 2025), que permitió organizar, limpiar y sistematizar la información proveniente de las distintas fuentes secundarias. Con esta herramienta se efectuaron cálculos descriptivos, conversiones de unidades y estimaciones agregadas de producción y potencial económico de los subproductos, asegurando coherencia y consistencia entre los distintos conjuntos de datos.

4. Resultados y Discusión

4.1. Generación de subproductos de café en Centroamérica

El análisis de los flujos de masa en el procesamiento húmedo del café en Centroamérica muestra que, de las aproximadamente 5.2 millones de toneladas de cerezas procesadas —equivalentes a 113.1 millones de sacos de 46 kg— se generan alrededor de 3.2 millones de toneladas de subproductos, incluyendo pulpa, mucílago, pergamino y posos gastados, lo que representa más del 60% de la masa inicial de las cerezas (Figura 2). La etapa de beneficio húmedo, en la que las cerezas se transforman en granos de café pergamino seco, concentra la mayor parte de estos subproductos: 2.3 millones de toneladas de pulpa y 0.5 millones de toneladas de mucílago. Estudios previos en el Corredor Seco Centroamericano han señalado que parte de la pulpa se utiliza para elaborar fertilizantes orgánicos, pero en muchos casos se deposita directamente en las fincas sin tratamiento, mientras que el mucílago puede terminar contaminando ríos y arroyos al liberarse como aguas mieles sin control, afectando la calidad del agua y los ecosistemas locales (Fernandez Perez, 2025).

FIGURA 2. Diagrama de Sankey de los flujos de masa durante el procesamiento del café por método húmedo en Centroamérica



Nota: Los valores están expresados en Megagramos por año (Mg año⁻¹). Diagrama elaborado en SankeyMATIC (Bogart, 2014).

En la fase de beneficio seco, el trillado genera unas 242 mil toneladas de pergamino, que en su mayoría se aprovechan como combustible para secadoras mecánicas (Rotta et al., 2021). Por su parte, los posos de café, que se producen cuando se prepara la bebida, representan apenas el 2.1% de los subproductos totales. Estos hallazgos indican que, aunque todos los subproductos podrían aprovecharse de alguna manera, los mayores beneficios ambientales y económicos se obtendrían enfocándose en la pulpa y el mucílago, pues representan más del 90% de los subproductos generados. Aprovechar estos subproductos no solo ayudaría a reducir la contaminación y el impacto ambiental asociado a su manejo inadecuado, sino que también podría generar nuevas oportunidades para las comunidades productoras, impulsar la producción de bioenergía y bioproductos, y fortalecer la sostenibilidad de toda la cadena cafetalera en la región.

4.2. Potencial energético de los subproductos de café

La Tabla 3 presenta el potencial energético derivado de la valorización de los subproductos del café en Centroamérica. La pulpa de café destaca por su elevado potencial de conversión a metano (CH₄) mediante digestión anaeróbica, alcanzando

rendimientos de hasta 62.1 m³ CH₄ por tonelada de residuo. Si el 100% de la pulpa producida en la región se aprovechara, se podrían generar aproximadamente 145.7 millones de m³ de metano. De forma complementaria, el mucílago fresco podría producir hasta 48.8 m³ CH₄ por tonelada, lo que representa un potencial total de 26.9 millones de m³ CH₄, asumiendo un aprovechamiento completo del residuo disponible.

TABLA 3. Potencial energético y ahorro en combustibles a partir de la valorización de la pulpa y el mucílago del café generados anualmente en Centroamérica

Sustrato	Biomasa ¹ (Mg-año ⁻¹)	Combustible	Rendimiento (m ³ ·Mg ⁻¹ de sustrato)	Producción (m ³ ·año ⁻¹)	Potencial energético ³ (MWh-año ⁻¹)	Diésel equivalente ⁴ (m ³)	Ahorros en combustibles ⁵ (M USD-año ⁻¹)
Pulpa	2,344,692	Metano	62.1	145,712,309	1,448,380	144,838	118.8
		Etanol	0.020	46,515	274,439	27,444	22.5
		Hidrogeno	2.8	6,489,793	19,469	1,947	1.6
		Briquetas ²	75.5	176,930	1,307,516	130,752	107.2
Mucílago	551,172	Metano	48.8	26,872,934	267,117	26,712	21.9
		Etanol	0.025	13,553	79,962	7,996	6.6
		Hidrogeno	26.7	14,705,265	44,116	4,412	3.6

Nota: ¹La biomasa de los subproductos esta expresada en materia fresca (base húmeda). ²El rendimiento de briquetas esta expresada en kilogramos, mientras que la producción anual esta expresada en megagramos (Mg-año⁻¹). ³El potencial energético se calculó a partir del poder calorífico inferior (PCI) de 9.94 kWh·m⁻³ para el metano; 5.9 kWh·L⁻¹ del etanol, 3.0 kWh·m⁻³ del hidrogeno y 7.4 kWh·kg⁻¹ para las briquetas. ⁴El diésel equivalente se calculó a partir de un PCI de 10 kWh·L⁻¹. ⁵El precio del diésel se estimó en 0.82 USD·L⁻¹ con base en el precio minorista actual en Centroamérica.

Mediante un sistema de cogeneración de electricidad y calor (CHP, por sus siglas en inglés), el metano proveniente de la pulpa y el mucílago podría transformarse en alrededor de 1.71 millones de megavatios hora (MWh) de energía al año, suficientes para cubrir el consumo anual de aproximadamente 1.3 millones de personas en Centroamérica. Esta energía podría emplearse en distintas etapas del beneficio del café, como la operación de despulpadoras, el bombeo de agua durante el procesamiento, o el secado mecánico del grano, generando un ahorro estimado de 140.7 millones de dólares en combustibles fósiles.

Otra ruta de valorización con alto potencial es la producción de briquetas de carbón a partir de la pulpa. Mediante pirólisis de biomasa densificada a 400 °C, se pueden obtener hasta 75.5 kg de briquetas por tonelada de pulpa. Si se aprovechara toda la pulpa generada, esto equivaldría a la producción de aproximadamente 177 mil toneladas de carbón, capaces de generar 1.3 millones de MWh anuales mediante sistemas CHP. Este volumen de energía es comparable al contenido energético de 130.7 millones de litros de diésel, lo que representaría un ahorro potencial de hasta 107 millones de dólares en combustibles. En contraste, las rutas de valorización basadas en fermentación alcohólica para la producción de etanol o en fermentación oscura para la obtención de hidrógeno presentan menores eficiencias energéticas, por lo que su aprovechamiento sería complementario a las opciones anteriores.

Estos resultados muestran un enorme potencial energético, pero traducirlo en beneficios reales requiere superar varios desafíos. La implementación de tecnologías de digestión anaeróbica, pirólisis y otras rutas de valorización demanda infraestructura especializada, condiciones técnicas adecuadas y conocimientos avanzados, que en muchos casos son limitados en los países productores (Barragán-Ocaña et al., 2023). La variabilidad de los subproductos, su baja pureza, la necesidad de proximidad entre los generadores de subproductos y las plantas de procesamiento, y la falta de mercados consolidados para los productos energéticos dificultan la adopción de estrategias de valorización a gran escala (Alibardi et al., 2020).

Para aprovechar plenamente este potencial, se necesitan estudios más detallados que definan estrategias de gestión de subproductos adaptadas a las condiciones locales, considerando la viabilidad técnica y económica de cada alternativa. A la par, es esencial fomentar inversiones que fortalezcan la infraestructura, la tecnología disponible y el acceso a financiamiento, así como programas de capacitación y asistencia técnica que cierren las brechas de conocimiento y fomenten una cultura emprendedora orientada a la bioeconomía circular. Desde la perspectiva de políticas públicas, la creación y aplicación de marcos regulatorios claros y leyes ambientales que promuevan la valorización de subproductos es clave para establecer sistemas centralizados de procesamiento y valorización. Complementariamente, incentivos económicos como subsidios, créditos verdes o pagos por servicios ambientales podrían estimular la participación de productores y empresas, facilitando la adopción de prácticas sostenibles y maximizando el valor energético y económico de los subproductos del café en la región.

5. Conclusión

Este estudio examinó por primera vez la cantidad de subproductos de café generados en Centroamérica y su potencial energético a través de diferentes rutas de valorización. Los resultados evidencian que estos subproductos constituyen un recurso energético considerable que, hasta ahora, ha sido poco aprovechado. La pulpa y el mucílago destacan por su alto volumen y por su capacidad de convertirse en metano mediante digestión anaeróbica, mientras que la pulpa también puede transformarse en briquetas de carbón con un elevado poder calorífico. Estas opciones de valorización podrían generar cantidades significativas de energía renovable, suficientes para cubrir parte del consumo regional, sustituir combustibles fósiles, generar importantes ahorros económicos y reducir el impacto ambiental del sector. No obstante, para hacer realidad este potencial es necesario superar diversos desafíos técnicos, económicos e infraestructura. Se requiere diseñar estrategias locales de gestión de residuos, fortalecer las capacidades técnicas, fomentar la inversión y desarrollar políticas públicas que impulsen la adopción de tecnologías de valorización. La implementación de estas acciones no solo permitiría aprovechar los subproductos del café, sino también avanzar hacia sistemas productivos más sostenibles, promoviendo una transición hacia una bioeconomía circular que combine eficiencia energética, valorización de residuos y generación de empleo en la región.

6. Referencias

- ALBARRACIN, L. T., MAS, I. R., FUSS, L. T., RODRIGUEZ, R. P., VOLPI, M. P. C., & DE SOUZA MORAES, B. (2024). The Bioenergetic Potential from Coffee Processing Residues: Towards an Industrial Symbiosis. *Resources*, 13(2), 21. <https://doi.org/10.3390/resources13020021>
- ALIBARDI, L., ASTRUP, T. F., ASUNIS, F., CLARKE, W. P., DE GIOANNIS, G., DESSI, P., LENS, P. N. L., LAVAGNOLO, M. C., LOMBARDI, L., MUNTONI, A., PIVATO, A., POLETTINI, A., POMI, R., ROSSI, A., SPAGNI, A., & SPIGA, D. (2020). Organic waste biorefineries: Looking towards implementation. *Waste Management*, 114, 274–286. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2020.07.010>
- ALVES, R. C., RODRIGUES, F., ANTÓNIA NUNES, M., VINHA, A. F., & OLIVEIRA, M. B. P. P. (2017). State of the art in coffee processing by-products. *Handbook of Coffee Processing By-Products: Sustainable Applications*, 1–26. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-811290-8.00001-3>

ARANGO-OSORIO, S., VASCO-ECHEVERRI, O., LÓPEZ-JIMÉNEZ, G., GONZÁLEZ-SANCHEZ, J., & ISAAC-MILLÁN, I. (2019). Methodology for the design and economic assessment of anaerobic digestion plants to produce energy and biofertilizer from livestock waste. *Science of The Total Environment*, 685, 1169–1180. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.06.015>

BAIER, U., & SCHLEISS, K. (2005, August 31). Greenhouse gas emission reduction through anaerobic digestion of coffee pulp. *4th International Symposium Anaerobic Digestion of Solid Waste*.

BARRAGÁN-OCAÑA, A., MERRITT, H., SÁNCHEZ-ESTRADA, O. E., MÉNDEZ-BECERRIL, J. L., & LONGAR-BLANCO, M. DEL P. (2023). Biorefinery and sustainability for the production of biofuels and value-added products: A trends analysis based on network and patent analysis. *PLOS ONE*, 18(1), e0279659. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0279659>

BOGART, S. (2014). *SankeyMATIC* (1.2.0). <https://sankeymatic.com/build/>

BONILLA-HERMOSA, V. A., DUARTE, W. F., & SCHWAN, R. F. (2014). Utilization of coffee by-products obtained from semi-washed process for production of value-added compounds. *Bioresource Technology*, 166, 142–150. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2014.05.031>

BOSSO, H., BARBALHO, S. M., DE ALVARES GOULART, R., & OTOBONI, A. M. M. B. (2023). Green coffee: economic relevance and a systematic review of the effects on human health. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 63(3), 394–410. <https://doi.org/10.1080/10408398.2021.1948817>

BOUDREAU, L., CAJAL-GROSSI, J., & MACCHIAVELLO, R. (2023). Global Value Chains in Developing Countries: A Relational Perspective from Coffee and Garments. *Journal of Economic Perspectives*, 37(3), 59–86. <https://doi.org/10.1257/jep.37.3.59>

BOZZOLA, M., CHARLES, S., FERRETTI, T., GERAKARI, E., MANSON, H., ROSSER, N., & VON DER GOLTZ, P. (2021). *The Coffee Guide* (Fourth Edition). International Trade Centre. <https://www.intracen.org/file/itccoffee4threport20210930webpagespdf>

CÁRDENAS, E. L. M., ZAPATA-ZAPATA, A. D., & KIM, D. (2018). Hydrogen Production from Coffee Mucilage in Dark Fermentation with Organic Wastes. *Energies*, 12(1), 71. <https://doi.org/10.3390/en12010071>

CHALA, B., OECHSNER, H., LATIF, S., & MÜLLER, J. (2018). Biogas Potential of Coffee Processing Waste in Ethiopia. *Sustainability*, 10(8). <https://doi.org/10.3390/su10082678>

COMMISSION EUROPEAN. (2018). *A sustainable bioeconomy for Europe – Strengthening the connection between economy, society and the environment – Updated bioeconomy strategy*. Publications Office of the European Union. <https://doi.org/10.2777/792130>

DADI, D., MENGISTIE, E., TEREFE, G., GETAHUN, T., HADDIS, A., BIRKE, W., BEYENE, A., LUIS, P., & VAN DER BRUGGEN, B. (2018). Assessment of the effluent quality of wet coffee processing wastewater and its influence on downstream water quality. *Ecology & Hydrobiology*, 18(2), 201–211. <https://doi.org/10.1016/j.ecohyd.2017.10.007>

DEL CASTILLO, M. D., FERNANDEZ-GOMEZ, B., MARTINEZ-SAEZ, N., IRIONDO-DEHOND, A., & MESA, M. D. (2019). Coffee By-products. In A. Farah (Ed.), *Coffee: Production, Quality and Chemistry* (pp. 309–334). Royal Society of Chemistry. <https://doi.org/10.1039/9781782622437-00309>

ECHVERRIA, M. C., & NUTI, M. (2017). Valorisation of the Residues of Coffee Agro-industry: Perspectives and Limitations. *The Open Waste Management Journal*, 10(1), 13–22. <https://doi.org/10.2174/1876400201710010013>

FAO. (2025). *FAOSTAT: Crops and livestock products*. <https://www.fao.org/faostat/en/#data/QCL/visualize>

FERNÁNDEZ PÉREZ, S. E. (2025). *Análisis de la producción y uso potencial de residuos de café para la elaboración de bioproductos en biofábricas de la Región Trifinio* [Tesis de Maestría, Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza]. <https://repositorio.catie.ac.cr/handle/11554/14176>

FISCHER, E., SCHMIDT, T., HÖRA, S., GIERSDORF, J., STINNER, W., & SCHOLWIN, F. (2010). *Agro-Industrial Biogas in Kenya: Potentials, Estimates for Tariffs, Policy and Business Recommendations*. https://energypedia.info/images/9/9d/Agri-Industrial_Biogas_in_Kenya.pdf

FRANCA, A. S., & OLIVEIRA, L. S. (2009). Coffee Processing Solid Wastes: Current Uses and Future Perspectives. In G. S. Ashworth & P. Azevedo (Eds.), *Agricultural Wastes* (pp. 155–189). Nova Publishers.

HAMEED, A., HUSSAIN, S. A., IJAZ, M. U., ULLAH, S., PASHA, I., & SULERIA, H. A. R. (2018). Farm to Consumer: Factors Affecting the Organoleptic Characteristics of Coffee. II: Postharvest Processing Factors. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, 17(5), 1184–1237. <https://doi.org/10.1111/1541-4337.12365>

HANSEN, G. H., LÜBECK, M., FRISVAD, J. C., LÜBECK, P. S., & ANDERSEN, B. (2015). Production of cellulolytic enzymes from ascomycetes: Comparison of solid state and submerged fermentation. *Process Biochemistry*, 50(9), 1327–1341. <https://doi.org/10.1016/j.procbio.2015.05.017>

HARSONO, S. S., SALAHUDDIN, FAUZI, M., PURWONO, G. S., SOEMARNO, D., & KISSINGER. (2015). Second Generation Bioethanol from Arabica Coffee Waste Processing at Smallholder Plantation in Ijen Plateau Region of East Java. *Procedia Chemistry*, 14, 408–413. <https://doi.org/10.1016/j.proche.2015.03.055>

HARVEY, C. A., SABORIO-RODRÍGUEZ, M., MARTINEZ-RODRÍGUEZ, M. R., VIGUERA, B., CHAIN-GUADARRAMA, A., VIGNOLA, R., & ALPIZAR, F. (2018). Climate change impacts and adaptation among smallholder farmers in Central America. *Agriculture & Food Security*, 7(1), 57. <https://doi.org/10.1186/s40066-018-0209-x>

HERNÁNDEZ, M. A., RODRÍGUEZ SUSANA, M., & ANDRES, Y. (2014). Use of coffee mucilage as a new substrate for hydrogen production in anaerobic co-digestion with swine manure. *Bioresource Technology*, 168, 112–118. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2014.02.101>

ICO. (2019). *Coffee Development Report 2019 Growing for Prosperity: Economic viability as the catalyst for a sustainable coffee sector*. <https://www.ico.org/documents/cy2018-19/ed-2318e-overview-flagship-report.pdf>

ICO. (2020a). *Obstacles to consumption: Tariff and non-tariff measures and their impact on the coffee sector*. <https://www.ico.org/documents/cy2019-20/icc-126-2e-obstacles-consumption.pdf>

ICO. (2020b). *The Value of Coffee: Sustainability, Inclusiveness, and Resilience of the Coffee Global Value Chain*. <https://www.icocoffee.org/wp-content/uploads/2022/11/CDR2020.pdf>

ICO. (2023). *Coffee report and outlook*. https://icocoffee.org/documents/cy2023-24/Coffee_Report_and_Outlook_December_2023_ICO.pdf

ICO. (2024). *Beyond coffee: Towards a circular coffee economy*. <https://ico.org/coffee-development-report-2/>

IOVANNA, R., & GRIFFITHS, C. (2006). Clean water, ecological benefits, and benefits transfer: A work in progress at the U.S. EPA. *Ecological Economics*, 60(2), 473–482. <https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2006.06.012>

- IRIONDO-DEHOND, A., IRIONDO-DEHOND, M., & DEL CASTILLO, M. D. (2020). Applications of Compounds from Coffee Processing By-Products. *Biomolecules*, 10(9). <https://doi.org/10.3390/biom10091219>
- JUNG, K.-W., KIM, D.-H., LEE, M.-Y., & SHIN, H.-S. (2012). Two-stage UASB reactor converting coffee drink manufacturing wastewater to hydrogen and methane. *International Journal of Hydrogen Energy*, 37(9), 7473–7481. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2012.01.150>
- KIVAIISI, A. K. (2004). Pretreatment of robusta coffee hulls and co-digestion with cowdung for enhanced anaerobic digestion. *Tanzania Journal of Science*, 28(2). <https://doi.org/10.4314/tjs.v28i2.18349>
- KIVAIISI, A. K., & RUBINDAMAYUGI, M. S. T. (1996). The potential of agro-industrial residues for production of biogas and electricity in Tanzania. *Renewable Energy*, 9(1–4), 917–921. [https://doi.org/10.1016/0960-1481\(96\)88429-1](https://doi.org/10.1016/0960-1481(96)88429-1)
- KLEINWÄCHTER, M., BYTOF, G., & SELMAR, D. (2015). Coffee Beans and Processing. In V. R. Preedy (Ed.), *Coffee in Health and Disease Prevention* (pp. 73–81). Academic Press. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-409517-5.00009-7>
- KOCADAĞLI, T., GÖNCÜOĞLU, N., HAMZALIOĞLU, A., & GÖKMEN, V. (2012). In depth study of acrylamide formation in coffee during roasting: role of sucrose decomposition and lipid oxidation. *Food & Function*, 3(9), 970. <https://doi.org/10.1039/c2fo30038a>
- LADHA-SABUR, A., BAKALIS, S., FRYER, P. J., & LOPEZ-QUIROGA, E. (2019). Mapping energy consumption in food manufacturing. *Trends in Food Science & Technology*, 86, 270–280. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2019.02.034>
- LEE, Y.-G., CHO, E.-J., MASKEY, S., NGUYEN, D.-T., & BAE, H.-J. (2023). Value-Added Products from Coffee Waste: A Review. *Molecules*, 28(8), 3562. <https://doi.org/10.3390/molecules28083562>
- LESTARI, W., HASBALLAH, K., LISTIAWAN, M. Y., & SOFIA, S. (2022). Coffee by-products as the source of antioxidants: a systematic review. *F1000Research*, 11(220), 1–13. <https://doi.org/10.12688/f1000research.107811.1>
- LHAJ LAHCEN, S. A., AHMED, S. I., JOUTE, Y., & BARI, H. EL. (2018). Characterization and evaluation of methanogenic potential of coffee waste. *Journal of Materials and Environmental Sciences*, 9(2), 655–661. https://www.jmaterenvironsci.com/Document/vol9/vol9_N2/72-JMES-2659-Ait%20Lhaj.pdf

LI, L., PENG, X., WANG, X., & WU, D. (2018). Anaerobic digestion of food waste: A review focusing on process stability. *Bioresource Technology*, 248, 20–28. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2017.07.012>

MAHMOUD, E., ATABANI, A. E., & BADRUDDIN, I. A. (2022). Valorization of spent coffee grounds for biogas production: A circular bioeconomy approach for a biorefinery. *Fuel*, 328, 125296. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2022.125296>

MARESCOTTI, A., & BELLETTI, G. (2016). Differentiation strategies in coffee global value chains through reference to territorial origin in Latin American countries. *Culture & History Digital Journal*, 5(1), e007. <https://doi.org/10.3989/chdj.2016.007>

MENEZES, E. G. T., DO CARMO, J. R., MENEZES, A. G. T., ALVES, J. G. L. F., PIMENTA, C. J., & QUEIROZ, F. (2013). Use of Different Extracts of Coffee Pulp for the Production of Bioethanol. *Applied Biochemistry and Biotechnology*, 169(2), 673–687. <https://doi.org/10.1007/s12010-012-0030-0>

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. <https://www.ajol.info/index.php/eajsci/article/view/119352>

MIÑÓN-FUENTES, R., & AGUILAR-JUÁREZ, O. (2019). Hydrogen production from coffee pulp by dark fermentation. *Water Science and Technology*, 80(9), 1692–1701. <https://doi.org/10.2166/wst.2019.416>

MONTILLA-PÉREZ, J., ARCILA-PULGARÍN, J., ARISTIZÁBAL-LOAIZA, M., MONTOYA-RESTREPO, E. C., PUERTA-QUINTERO, G. I., OLIVEROS-TASCÓN, C. E., & CADENA-GÓMEZ, G. (2008). Caracterización de algunas propiedades físicas y factores de conversión del café durante el proceso de beneficio húmedo tradicional. *Cenicafé*, 59(2), 120–142. <http://hdl.handle.net/10778/59>

MURTHY, P. S., & MADHAVA NAIDU, M. (2012). Sustainable management of coffee industry by-products and value addition—A review. *Resources, Conservation and Recycling*, 66, 45–58. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2012.06.005>

MUSSATTO, S. I., MACHADO, E. M. S., CARNEIRO, L. M., & TEIXEIRA, J. A. (2012). Sugars metabolism and ethanol production by different yeast strains from coffee industry wastes hydrolysates. *Applied Energy*, 92, 763–768. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2011.08.020>

MUSSATTO, S. I., MACHADO, E. M. S., MARTINS, S., & TEIXEIRA, J. A. (2011). Production, composition, and application of coffee and its industrial residues. *Food and Bioprocess Technology*, 4(5), 661–672. <https://doi.org/10.1007/s11947-011-0565-z>

NARITA, Y., & INOUE, K. (2014). Review on utilization and composition of coffee silverskin. *Food Research International*, 61, 16–22. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2014.01.023>

NAVIA, D. P., VELASCO, R. J., & HOYOS, J. (2011). Production and evaluation of ethanol from coffee processing by-products. *VITAE, Revista de La Facultad de Química Farmacéutica*, 18(3), 287–294.

NAYAB, R., IMRAN, M., RAMZAN, M., TARIQ, M., TAJ, M. B., AKHTAR, M. N., & IQBAL, H. M. N. (2022). Sustainable biodiesel production via catalytic and non-catalytic transesterification of feedstock materials – A review. *Fuel*, 328, 125254. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2022.125254>

OLLER, I., MALATO, S., & SÁNCHEZ-PÉREZ, J. A. (2011). Combination of Advanced Oxidation Processes and biological treatments for wastewater decontamination—A review. *Science of The Total Environment*, 409(20), 4141–4166. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2010.08.061>

ORREGO, D., ZAPATA-ZAPATA, A., & KIM, D. (2018). Optimization and Scale-Up of Coffee Mucilage Fermentation for Ethanol Production. *Energies*, 11(4), 786. <https://doi.org/10.3390/en11040786>

PANHUYSSEN, S., & PIERROT, J. (2020). *Coffee Barometer 2020*. <https://hivos.org/document/coffee-barometer-2020/>

PARDO, L. M. F., CASTILLO, N. V., DURÁN, Y. M. V., ROSERO, J. A. J., & LOZANO MORENO, J. A. (2022). Comprehensive analysis of ethanol production from coffee mucilage under sustainability indicators. *Chemical Engineering and Processing - Process Intensification*, 182, 109183. <https://doi.org/10.1016/j.cep.2022.109183>

PÉREZ-SARIÑANA, B. Y., SALDAÑA-TRINIDAD, S., GUERRERO-FAJARDO, C. A., SANTIS-ESPINOSA, L. F., & PATHIYAMATTOM-JOSEPH, S. (2015). A Simple Method to Determine Bioethanol Production from Coffee Mucilage, Verified by HPLC. *BioResources*, 10(2), 2691–2698. <https://doi.org/10.15376/biores.10.2.2691-2698>

PHUONG, D. V., TAN QUOC, L. P., VAN TAN, P., & DOAN DUY, L. N. (2019). Production of

bioethanol from Robusta coffee pulp (*Coffea robusta* L.) in Vietnam. *Foods and Raw Materials*, 10–17. <https://doi.org/10.21603/2308-4057-2019-1-10-17>

QUADRA, G. R., PARANAÍBA, J. R., VILAS-BOAS, J., ROLAND, F., AMADO, A. M., BARROS, N., DIAS, R. J. P., & CARDOSO, S. J. (2020). A global trend of caffeine consumption over time and related-environmental impacts. *Environmental Pollution*, 256, 113343. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2019.113343>

RANGEL, C. J., HERNÁNDEZ, M. A., MOSQUERA, J. D., CASTRO, Y., CABEZA, I. O., & ACEVEDO, P. A. (2021). Hydrogen production by dark fermentation process from pig manure, cocoa mucilage, and coffee mucilage. *Biomass Conversion and Biorefinery*, 11(2), 241–250. <https://doi.org/10.1007/s13399-020-00618-z>

RENAUDIE, M., DUMAS, C., VUILLEUMIER, S., & ERNST, B. (2024). Spontaneous dark fermentation in a pre-seeded liquid-gas membrane bioreactor: Impact of wine and coffee biowaste microflora on continuous biohydrogen production. *Journal of Cleaner Production*, 437, 140759. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2024.140759>

RICHARDSON, L., LOOMIS, J., KROEGER, T., & CASEY, F. (2015). The role of benefit transfer in ecosystem service valuation. *Ecological Economics*, 115, 51–58. <https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2014.02.018>

RODRÍGUEZ-VALENCIA, N. (2013). Producción de alcohol a partir de la pulpa de café. *Cenicafé*, 64(2), 78–93. <http://hdl.handle.net/10778/541>

ROSENBERGER, R. S., & LOOMIS, J. B. (2017). Benefit Transfer. In K. J. and B. T. C. Champ Patricia A. and Boyle (Ed.), *A Primer on Nonmarket Valuation* (pp. 431–462). Springer Netherlands. https://doi.org/10.1007/978-94-007-7104-8_11

ROTTA, N. M., CURRY, S., HAN, J., RECONCO, R., SPANG, E., RISTENPART, W., & DONIS-GONZÁLEZ, I. R. (2021). A comprehensive analysis of operations and mass flows in postharvest processing of washed coffee. *Resources, Conservation and Recycling*, 170, 105554. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2021.105554>

RUIZ-NÁJERA, R. E., MEDINA-MELÉNDEZ, J. A., CARMONA-DE LA TORRE, J., RINCÓN-ENRIQUEZ, G., SÁNCHEZ-YÁÑEZ, J. M., & RAJ-ARYAL, D. (2021). Efecto de la disposición de los residuos resultantes del beneficiado húmedo del café sobre las características físicas y química del agua de corriente natural. *Revista Terra Latinoamericana*, 39, e884. <https://doi.org/10.28940/terra.v39i0.884>

- SAMOGGIA, A., & RIEDEL, B. (2018). Coffee consumption and purchasing behavior review: Insights for further research. *Appetite*, 129, 70–81. <https://doi.org/10.1016/j.appet.2018.07.002>
- SAMPER, L. F., GIOVANNUCCI, D., & MARQUES VIEIRA, L. (2017). *The powerful role of intangibles in the coffee value chain* (Working Paper No. 39; Economic Research). <https://www.wipo.int/publications/en/details.jsp?id=4229&plang=EN>
- SELVAMURUGAN, M., DORAISAMY, P., & MAHESWARI, M. (2010). An integrated treatment system for coffee processing wastewater using anaerobic and aerobic process. *Ecological Engineering*, 36(12), 1686–1690. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2010.07.013>
- SERNA-JIMÉNEZ, J. A., SILES, J. A., DE LOS ÁNGELES MARTÍN, M., & CHICA, A. F. (2022). A review on the applications of coffee waste derived from primary processing: Strategies for revalorization. *Processes*, 10(11). <https://doi.org/10.3390/pr10112436>
- SETIAWAN, A., FAISAL, F., ANSHAR, K., HASIBUAN, R., RISKINA, S., & ALCHAILI. (2025). Techno-economic assessment of densified Arabica coffee pulp pyrolysis in a pilot-scale reactor. *Biomass Conversion and Biorefinery*, 15(6), 9299–9309. <https://doi.org/10.1007/s13399-024-05932-4>
- SETTER, C., & OLIVEIRA, T. J. P. (2022). Evaluation of the physical-mechanical and energy properties of coffee husk briquettes with kraft lignin during slow pyrolysis. *Renewable Energy*, 189, 1007–1019. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2022.03.077>
- SETTER, C., SILVA, F. T. M., ASSIS, M. R., ATAÍDE, C. H., TRUGILHO, P. F., & OLIVEIRA, T. J. P. (2020). Slow pyrolysis of coffee husk briquettes: Characterization of the solid and liquid fractions. *Fuel*, 261, 116420. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2019.116420>
- SHENOY, D., PAI, A., VIKAS, R. K., NEERAJA, H. S., DEEKSHA, J. S., NAYAK, C., & RAO, C. V. (2011). A study on bioethanol production from cashew apple pulp and coffee pulp waste. *Biomass and Bioenergy*, 35(10), 4107–4111. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2011.05.016>
- STATA CORP. (2025). *Stata Statistical Software* (Release 19). StataCorp LLC.
- SURMA, S., & OPARIL, S. (2021). Coffee and Arterial Hypertension. *Current Hypertension Reports*, 23(7), 38. <https://doi.org/10.1007/s11906-021-01156-3>

TESFAYE, A., WORKIE, F., & KUMAR, V. S. (2022). Production and Characterization of Coffee Husk Fuel Briquettes as an Alternative Energy Source. *Advances in Materials Science and Engineering*, 2022(1), 9139766. <https://doi.org/10.1155/2022/9139766>

TORGA, G. N., & SPERS, E. E. (2020). Perspectives of global coffee demand. In L. Florêncio de Almeida & E. E. Spers (Eds.), *Coffee Consumption and Industry Strategies in Brazil* (pp. 21–49). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-814721-4.00002-0>

VILLA MONTOYA, A. C., DA SILVA MAZARELI, R. C., DELFORNO, T. P., CENTURION, V. B., DE OLIVEIRA, V. M., SILVA, E. L., & VARESCHE, M. B. A. (2020). Optimization of key factors affecting hydrogen production from coffee waste using factorial design and metagenomic analysis of the microbial community. *International Journal of Hydrogen Energy*, 45(7), 4205–4222. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2019.12.062>

VILLA-MONTOYA, A. C., FERRO, M. I. T., & DE OLIVEIRA, R. A. (2017). Removal of phenols and methane production with coffee processing wastewater supplemented with phosphorous. *International Journal of Environmental Science and Technology*, 14(1), 61–74. <https://doi.org/10.1007/s13762-016-1124-y>

WANG, X., & LIM, L.-T. (2015). Physicochemical Characteristics of Roasted Coffee. In V. R. Preedy (Ed.), *Coffee in Health and Disease Prevention* (pp. 247–254). Academic Press. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-409517-5.00027-9>

WIDJAJA, T., NURKHAMIDAH, S., ALTWAY, A., ISWANTO, T., GUSDYARTO, B., & ILHAM, F. F. (2019). Performance of biogas production from coffee pulp waste using semi-continuous anaerobic reactor. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 673(1), 012003. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/673/1/012003>

WOLDESENBET, A. G., WOLDEYES, B., & CHANDRAVANSHI, B. S. (2016). Bio-ethanol production from wet coffee processing waste in Ethiopia. *SpringerPlus*, 5(1), 1903. <https://doi.org/10.1186/s40064-016-3600-8>