

# Aprovechamiento de los polisacáridos de la pulpa de café residual para la obtención de bioetanol como estrategia hacia la bioeconomía

*Use of Polysaccharides from Residual Coffee Pulp to Obtain Bioethanol as a Strategy towards the Bioeconomy*

M.-Alejandra Acevedo, Isabella Peñaloza-Quintero, Diana Morales-Fonseca<sup>a\*</sup>

## RESUMEN

La caficultura es la actividad agrícola que incluye la producción y comercialización del café como producto tropical de gran importancia en la economía mundial. Por años, la Organización Internacional del Café ha clasificado este fruto en el segundo lugar de productos básicos con mayor valor comercial, por tanto, conlleva grandes producciones en los países cafeteros y representa un impacto económico y ambiental en estos. Este último aspecto genera la necesidad de aprovechar los residuos producidos en esta industria mediante estrategias de sostenibilidad, puesto que en cantidades elevadas estos se convierten en fuentes contaminantes para los recursos naturales. Por ejemplo, la pulpa de café es el principal residuo generado en la caficultura, que de ser aprovechada correctamente aportaría un valor agregado en la industria, debido a que contiene pectina, celulosa, hemicelulosa, polifenoles, cafeína, proteínas, taninos, entre otras sustancias que pueden ser empleadas en la elaboración de bioproductos en diversas industrias. El objetivo de la presente revisión fue evaluar la extracción de polisacáridos de la pulpa de café residual, para la obtención de bioetanol. En su desarrollo se realizó un breve acercamiento a la industria cafetera; seguido de la caracterización química de la pulpa de café residual mediante una revisión bibliográfica, donde los datos obtenidos se compararon con diferentes autores; posteriormente se evaluaron las técnicas de obtención de azúcares, y finalmente se reportan los estudios fundamentados en la obtención de bioetanol con los hidrolizados de la pulpa de café residual.

**PALABRAS CLAVE:** caficultura; pulpa de café; polisacáridos; hidrolizados; bioetanol.

## ABSTRACT

Coffee growing defines the agricultural activity that includes the production and commercialization of coffee as a relevant tropic crop for the world economy. For years, the International Coffee Organization has ranked this fruit in the second place of commodities with the highest commercial value. Therefore, it entails large productions in coffee-growing countries and represents an economic and environmental impact in them. This last aspect generates the need to take advantage of the waste produced in this industry through sustainability strategies because high amounts of waste become a contaminating source for natural resources. For example, the coffee pulp is the leading residue generated in the coffee industry. If properly used, it would provide added value to the industry since it contains pectin, cellulose, hemicellulose, polyphenols, caffeine, proteins, tannins, and other useful substances in the elaboration of bioproducts in various industries. The objective of this review was to evaluate the extraction of polysaccharides from residual coffee pulp to obtain bioethanol. On its pages, a brief approach to the coffee industry was made, followed by the chemical characterization of the residual coffee pulp through a bibliography, comparing the obtained data to different authors. Subsequently, the techniques for obtaining sugars were evaluated. Finally, the studies based on the extraction of bioethanol from the hydrolyzed residual coffee pulp are reported.

**KEYWORDS:** coffee growing; coffee pulp; polysaccharides; hydrolyzates; bioethanol.

<sup>a</sup> Fundación Universidad de América, Departamento de Ingeniería Química y Ambiental, Bogotá, Colombia. ORCID Acevedo, M.-A.: 0000-0001-6751-7950; ORCID Peñaloza-Quintero, I.: 0000-0001-9225-3432; ORCID Morales-Fonseca, D.: 0000-0002-5355-2891

\* Autor de correspondencia: [diana.morales@profesores.uamerica.edu.co](mailto:diana.morales@profesores.uamerica.edu.co)

## Introducción

El café es una de las bebidas más populares y ocupa el segundo lugar como producto básico más importante en el mundo (Pérez, 2013). Por ende, la caficultura representa un papel económico fundamental para muchos países, pero al ser un proceso lineal consistente en extraer, producir, consumir y tirar (Cerdá y Khalilova, 2016) se desaprovecha la mayor parte de la biomasa generada y se convierte en residuo agroindustrial y, al mismo tiempo, en una problemática ambiental. Por tal razón, es importante implementar en esta industria una economía circular, cuyo objetivo sea imitar a la naturaleza y conectarse con ella, para disminuir el impacto sobre el ambiente, generado por la actividad humana (Acevedo y Peñaloza, 2021).

Según la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (2018) en muchos países, la mayor fuente de contaminación del agua es la agricultura. Por ejemplo, en el mundo, los contaminantes químicos más comunes en los acuíferos subterráneos son los nitratos procedentes de esta actividad, por lo que en la actualidad las agroindustrias no solo se valoran por su desempeño productivo y económico, sino también por su relación con el medioambiente, pues el desarrollo creciente de una conciencia social obliga a detener la producción a costa del planeta, y virar hacia la sostenibilidad (Cury et al., 2017).

Así mismo, la producción de los desechos de la caficultura se ha acelerado debido a que la demanda de café y su industrialización han aumentado; el proceso más utilizado en esta industria se conoce como beneficio del café y es una de las actividades más contaminantes, puesto que produce residuos sólidos (mucílago, cáscara, pulpa, pergamino piel, entre otros) y descarga grandes cantidades de aguas residuales a las vertientes de los ríos, lo que provoca una sobrecarga de materia orgánica que afecta la flora y la fauna local (Urquijo, 2016) y escasez de agua apta para el consumo humano en las zonas cafeteras y sus alrededores.

La valorización de los residuos agrícolas es uno de los propósitos del desarrollo sostenible, no solo por la resolución de problemas ambientales, sino también por la diversificación de productos de una misma materia prima, lo cual puede contribuir al

mejoramiento de la competitividad de las naciones con economías basadas en la agricultura (Zabaniotou y Kamaterou, 2019). Las corrientes residuales de la caficultura son ricas en ácidos grasos, aminoácidos, polifenoles, minerales y polisacáridos. Debido a su heterogeneidad estructural, estos últimos presentan un enorme potencial: desde industrias de alimentos hasta biocombustibles gracias a su contenido calórico, efectos terapéuticos y toxicidad relativamente baja (Shi, 2016).

Por lo anterior, es necesario aprovechar correctamente estos residuos, de modo que se manejen como subproductos, y originen un valor agregado en la caficultura, en especial en la pulpa de café residual, que es el subproducto con mayor proporción, y que por su alta demanda bioquímica de oxígeno y rápida fermentación ocasiona la contaminación más severa (Corro et al., 2014; Setyobudi et al., 2019). Además, los métodos comunes para deshacerse de la pulpa se limitan a descargas en cuerpos de agua o amontonamiento en terrenos agrícolas cercanos, lo que ocasiona daño ambiental, dado que por cada dos toneladas de café se produce alrededor de una tonelada de pulpa (Blinová et al., 2017; Fierro-Cabrales et al., 2018). Por tanto, en estos tiempos, cuando la reducción de los precios del café es drástica sería beneficioso para los caficultores y la industria del café vender este subproducto, que en su mayoría se desperdicia (Klingel et al., 2020).

Desde otra perspectiva, en la actualidad el sistema energético se basa principalmente en la energía fósil, energía que produce cantidades ingentes de gases contaminantes (Cardona, 2009), lo que genera un desequilibrio entre la oferta y la demanda energética, puesto que las reservas fósiles han disminuido notablemente en los últimos años, la densidad poblacional está en continuo aumento, y el consumo de energía impulsado por Estados Unidos y el crecimiento económico de China alcanzan tasas cada vez más altas (Cardona, 2009). Por lo tanto, se necesitan alternativas más amigables con el medioambiente (Velásquez et al., 2012), aprovechar subproductos o materiales residuales de procesos agroindustriales que tengan gran potencial para la producción de bioalcoholes o biocombustibles, además de una amplia disponibilidad y bajo costo.

Asimismo, las investigaciones dirigidas a la producción de biocombustibles como el bioetanol han tomado importancia debido a que se considera un recurso energético sostenible, una fuente inagotable de energía, de alta viabilidad, que ofrece ventajas medioambientales y económicas a largo plazo, y, al tener en cuenta que la pulpa residual contiene componentes facilitadores para su transformación en alcohol a través de procesos biológicos, la producción de bioetanol con pulpa de café residual como materia prima se puede considerar una alternativa que ayude a suplir la demanda energética actual, que contribuya a la seguridad energética de los países y de este modo reduzca la dependencia de las fuentes convencionales de energía.

Por consiguiente, la presente revisión se enfoca en presentar la pulpa de café como una materia prima sostenible, con efectos económicos y sociales importantes, cuyo objetivo es resaltar de forma breve los aspectos generales de la industria de café, revisar la composición química de la pulpa de café, subproducto de interés, resaltar el contenido de azúcares, establecer las técnicas de obtención de estos y revisar bibliográficamente las investigaciones basadas en la obtención de bioetanol con pulpa de café.

## Industria del café

### Caficultura

La caficultura se basa en el cultivo y la producción de café, producto de gran valor comercial. Según Hejna (2021) y el portal alemán de estadística Statista (2016), la producción del café se centra principalmente en América del Sur, Asia, América Central y África; los mayores productores en el mundo de mayor a menor son Brasil, Vietnam, Colombia, Indonesia y Etiopía (International Coffee Organization [ICO], 2021; Murthy y Naidu, 2012). De acuerdo con la ICO, en el 2020 la producción total fue de 175 347 millones de sacos de 60 kg (ICO, 2021d).

En cuanto a las exportaciones de café, la ICO reporta 31,59 millones de sacos de 60 kg en los tres primeros meses del año cafetero 2020/2021: un 6,1 % más elevadas que las efectuadas entre octubre y diciembre de 2019 (ICO, 2021a); la tercera parte de las exportaciones corresponden a Brasil, Vietnam y

Colombia. Por otro lado, Norteamérica y la Unión Europea han aumentado el volumen de sus importaciones de café en las últimas décadas, por lo que el puesto de mayor importador es de Estados Unidos seguido de Alemania, Italia, Japón y Francia (ICO, 2021b).

**Tabla 1.** Producción mundial de café en los últimos años según la ICO

Año	Producción total en millones de sacos de 60 kg
2015/2016	156 126
2016/2017	162 320
2017/2018	163 693
2018/2019	172 461
2019/2020	165 053

*Nota.* La tabla muestra las cantidades para cada año desde 2015. Fuente: ICO (2020).

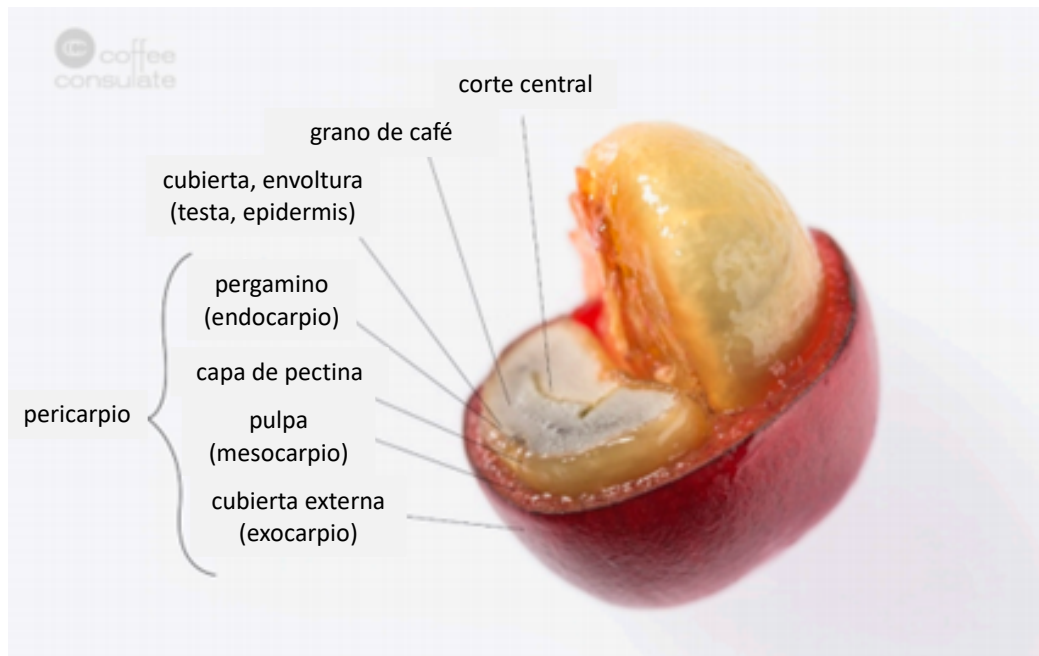
### El café

Los granos de café son los frutos crudos de la planta *Coffea* o las semillas de las cerezas de café, cada uno contiene una variedad de aromas y sabores. Considerado un importante cultivo de plantación perteneciente a la familia *Rubiaceae*, existen alrededor de 70 especies diferentes de esta planta, pero solo dos se cultivan comercialmente, la *Coffea canephora* y la *Coffea arabica*; ambas representan entre el 98 % y el 99 % del mercado internacional de café (Alves et al., 2017; Suárez, 2012).

Según la ICO (2021c), la especie *Coffea arábica* representa más del 60 % de la producción mundial; por ello el interés para la presente revisión. El fruto (Figura 1) presenta semillas (endospermo) llamadas granos de café, que están cubiertas por la piel plateada (tegumento), que a su vez está protegida por el endocarpio, el cual está cubierto por una capa de pectinas; esta capa se adhiere al mesocarpio y termina rodeada en su totalidad por la piel del fruto (exocarpio) (Acevedo y Peñaloza, 2021; Belitz et al., 2008).

### El beneficio del café

Para la transformación del grano de café en pergamino seco existen diferentes métodos, el más utilizado es el beneficio por vía húmeda para la especie



**Figura 1.** Partes del fruto del café

*Nota.* El fruto de esta especie es ovalado y alargado, con un diámetro de 15 a 20 mm, y la muestra su estructura desde el interior hacia el exterior. Fuente: Klingel et al., 2020 © Creative Commons Attribution License.

*Coffea arabica*. En el beneficio húmedo para “el procesamiento de 100 kg de frutos de café maduros se genera 20 % de café trillado o semilla, y el 80 % restante está formado por subproductos, como pulpa fresca (40 %), mucílago (20 %), agua (17 %), y pergamino y película plateada (3 %)” (Noriega et al., 2009, p. 136). Con respecto al componente de interés, la pulpa de café, se puede confirmar la cifra mencionada anteriormente —que representa el porcentaje en base húmeda— con otras investigaciones donde la cifra varía en un rango entre 39 % y 44 % (Fierro-Cabral et al., 2018; Flórez y Rosales, 2018; Janissen y Huynh, 2018; Restrepo y Villa, 2020; Rodríguez y Zambrano, 2010; Torres, 2020); mientras que en base seca representa el 29 % (Braham y Bresani, 1978; Janissen y Huynh, 2018; Klingel et al., 2020; Murthy y Naidu, 2012; Noriega et al., 2009).

El beneficio húmedo consiste en remover las envolturas —como la pulpa y el mucílago— de los granos de café, y este procesamiento consta de las siguientes etapas: selección de frutos, despulpado, remoción del mucílago, lavado, secado y descascarado (Alves et al., 2017; Subedi, 2011). En el beneficio húmedo del café, de la biomasa generada solo se aprovecha una mínima parte en la elaboración de

la bebida, dado que únicamente se utiliza el 9,5 % del fruto fresco, y el 90,5 % permanece en forma de residuos (Rodríguez, 1999; Suárez, 2012). Todo este material vegetal se convierte en una fuente de contaminación para los recursos naturales presentes en la zona cafetera; por ejemplo, la pulpa de café es el residuo con mayor porcentaje generado en esta industria, y luego del proceso de obtención de la semilla se arroja a las fuentes hídricas o se abandona a cielo abierto sin tratamiento alguno.

## La bioeconomía como una política pública en Colombia

Para 2011 en el marco de una estrategia de transformación productiva, el Consejo Nacional de Política Económica y Social, Conpes, publicó la Política Nacional para el Desarrollo Comercial de la Biotecnología a Partir del Uso Sostenible de la Biodiversidad (Conpes 3697) (Departamento Nacional de Planeación, 2011), con cuatro ejes estratégicos que buscan, además de la generación de conocimiento, la gestión, valoración y aprovechamiento comercial sostenible del capital natural (recursos bióticos y abióticos). Sin embargo, para lograr una verdadera

articulación entre la biotecnología y el desarrollo de la bioeconomía con el fin de potencializar aquel factor diferenciador con el que cuenta Colombia al ser considerado el segundo país con mayor diversidad en el planeta, aún es necesaria la transformación de varios sectores; en correspondencia, en 2018 se aprobó la Política Pública de Crecimiento Verde (Conpes 3934) (Departamento Nacional de Planeación, 2018).

Dicha política está diseñada para conectar el sector público y privado en pro de la transformación de la infraestructura tecnológica, los sistemas productivos, la transición energética y la formación de capital humano que permitan crear una economía basada en el conocimiento y el aprovechamiento sostenible de los recursos biológicos. De este modo, iniciativas encaminadas al aprovechamiento de la biomasa tendrán eco y apoyo no solo en entidades de carácter público; por el contrario, se deberán adaptar a una red de varias cadenas de valor interrelacionadas, que, como en esta revisión, buscan la agregación de valor y diversificación de los procesos productivos tradicionales.

### **Perspectivas del uso de la pulpa de café residual como materia prima**

La pulpa, material fibroso y mucilaginoso, es el primer subproducto que se obtiene del procesamiento húmedo del grano y a su vez es el más voluminoso, dado que por cada dos toneladas de café se genera alrededor de una tonelada de pulpa (Fierro-Cabral et al., 2018; Janissen y Huynh, 2018; Rousos et al., 1995). Mediante una revisión bibliográfica se encontró que los compuestos presentes en la pulpa de café son azúcares, cafeína, proteína, fibra, ácido clorogénico, taninos, fenoles, lignina, lípidos, cenizas, materias orgánicas, entre otros. Estos componentes convierten la pulpa en un subproducto de interés para el desarrollo e investigación de numerosos usos, por ejemplo: biogás (Corro et al., 2014), alimentos para animales (Orozco et al., 2008), ácido glutámico (Bolaños y Lagos, 2013), carbón activado (Irawaty et al., 2004), ácido láctico (Pleissner et al., 2016), fertilizante (Hachicha et al., 2012), antocianinas (Murthy et al., 2012), entre otras aplicaciones.

### **Contenido de polisacáridos**

Los polisacáridos toman importancia en la presente investigación, puesto que son los compuestos que aportan los azúcares con los que se le dará un valor agregado a la pulpa de café residual. Son biomoléculas formadas por la unión de diez o más monosacáridos, por medio de enlaces glucosídicos con pérdida de una molécula de agua por cada enlace; cumplen estas funciones relacionadas con las reservas energéticas y estructurales, y pueden incluirse dentro del grupo de los hidratos de carbono, cuya fórmula general es  $C_n(H_2O)_n$ . Cumplen dos funciones, constituye la estructura celular y confiere rigidez a los tejidos; la segunda representa la reserva energética de animales y vegetales.

La Tabla 2 informa que en los datos reportados por cada componente existe cierta discrepancia; se deduce que esto se presenta por las condiciones de la pulpa en el momento de la caracterización y extracción de los azúcares y la lignina; por ejemplo, durante el cultivo, el tiempo previo a la caracterización, el secado y el tipo de extracción. Asimismo, se resalta que entre los polisacáridos presentes en la pulpa de café residual la celulosa presenta la mayor composición.

### **Perspectivas de la pulpa de café como materia prima hacia el concepto de biorrefinería**

El concepto *biorrefinería* hace referencia a la transformación sostenible de la biomasa y se define como “una plataforma sostenible en la que se transforman las materias primas, constituidas por biomasa, en energía y un espectro más amplio de productos básicos de uso cotidiano, de una manera económica y respetuosa con el medioambiente” (Arévalo-Gallegos et al., 2017, p. 309). Las biorrefinerías operan de forma similar a las refinerías de petróleo, puesto que tienen como objetivo la obtención de los mismos productos, pero se diferencian en que la biorrefinería utiliza la biomasa, un recurso renovable, mientras que las refinerías se basan en la utilización del petróleo, un recurso no renovable (Aristizábal, 2019). Dentro de los productos de una biorrefinería se destacan biogás, bioetanol, biomasa

**Tabla 2.** Recopilación de información del contenido de pectina, celulosa, hemicelulosa y lignina en la pulpa de café

Autores	% de pectina	% de celulosa	% de hemicelulosa	% de lignina
Arriola y García, 1985	13,1	-	-	-
Braham y Bressani, 1978	6,5	17,7	2,3	17,5
Calle, 1977	6,52	-	-	-
Corro et al., 2013	6,5	63	2,3	17
Corro et al., 2014	-	43,98	27,80	6,88
Díaz, 2009	-	29,51	4,63	16,85
Dias et al., 2015	-	20,7	3,6	14,3
Gurram et al., 2015	-	23	20	22
Hendroko et al., 2018	-	25,84	4,37	12,46
Murthy y Naidu, 2012	6,51	63	2,3	17,5
Rodríguez, 2011	-	17,7	-	-
Rodríguez et al., 2020	20,5	35,6	9,2	-
Rubio y Pineda, 1973	-	29,51	4,63	16,85
Serrat et al., 2018	5,5 - 6,5	-	-	-
Widjaja et al., 2017	-	58,36	-	-

*Nota.* Aquí se presenta la recopilación de diferentes investigaciones que hacen referencia al contenido de los polisacáridos (pectina, celulosa y hemicelulosa) presentes en la pulpa de café residual. Adicionalmente se reporta el contenido de lignina, debido a que está ligada a los polisacáridos y es un compuesto difícil de separar dada su composición y caracterización estructural (Chávez-Sifontes y Dómine, 2013). Fuente: tabla de elaboración propia.

microbiana, metano, hidrógeno, productos químicos, etc. (Das et al., 2007).

Implementar este concepto en una industria como la del café permitiría reducir la producción de residuos no deseados y del mismo modo hacer uso eficiente de los subproductos o materias primas, y alcanzar así mayores producciones de forma sostenible y rentable, donde se genere un espectro amplio de bioproductos con interés comercial mediante el aprovechamiento de los hidrolizados de la pulpa de café residual.

La diversidad de productos en esta biorrefinería depende principalmente de la disponibilidad y características de la pulpa de café, como la composición química (azúcares, cafeína, pectina, polifenoles, proteínas, lípidos, etc.), precio de obtención y tecnologías utilizadas para su transformación y aprovechamiento.

Sin embargo, parte de las barreras de la implementación del concepto obedecen a la inestabilidad de algunas tecnologías, falta de articulación entre diferentes sectores, incertidumbre en la viabilidad económica, entre otras. Como estrategia para enfrentar este tipo de limitaciones, las biorrefinerías

de pequeña escala pueden jugar a favor, pues presentan requerimientos de capital más accesibles; promueven el reciclado de nutrientes, manteniendo la fertilidad de los suelos; impulsan el desarrollo regional, al requerir tecnologías no muy sofisticadas y con alta automatización; y facilitan que productores rurales se conviertan también en procesadores y no solo actúen como proveedores de biomasa (Ait Sair, 2021). Por ejemplo, la ubicación más favorable para biorrefinerías de pulpa de café se extiende a las zonas aledañas a los establecimientos que cosechan café y realizan el beneficio de este, con el fin de transformarlas en lugares atractivos y económicamente viables (Acevedo y Peñaloza, 2021), teniendo en cuenta la facilidad en la adquisición de la biomasa, su transporte desde la fuente hasta la planta de procesamiento, vías de acceso, entre otros factores socioeconómicos (Aristizábal, 2019). Entre los beneficios del aprovechamiento de la pulpa de café residual se resalta la disminución del impacto ambiental, el acercamiento a una economía circular y la generación de valor agregado a este subproducto junto con nuevos ingresos económicos para los países productores de café.

## Iniciativas del uso de la pulpa de café como materia prima en Colombia

Colombia ha generado cierto interés en el aprovechamiento integral de los residuos del café en los últimos años, debido al gran valor económico que representa este producto en el país, por lo que las investigaciones se centran en transformar aquello considerado como residuo en materias primas que puedan ser utilizadas en la elaboración de bioproductos que aporten un valor agregado a la caficultura, bajo el enfoque de biorrefinería, disminuyendo los efectos negativos sobre el medioambiente y mejorando la rentabilidad de esta agrocadena (Serna-Jiménez et al., 2018). Estos bioproductos podrían aportar mejoras en industrias tales como la cosmética, farmacéutica, alimentaria, energética, entre otras.

En consecuencia, las investigaciones al respecto han aumentado, y una revisión bibliográfica de la última década encontró algunos de estos estudios: “Los subproductos del café: Fuente de energía renovable” (Rodríguez y Zambrano, 2010); “Producción de alcohol a partir del mucílago de café” (Rodríguez-Valencia y Zambrano-Franco, 2011); “Aprovechamiento de los residuos sólidos provenientes del beneficio del café, en el municipio de Betania, Antioquia: Usos y aplicaciones” (Suárez, 2012); “Producción de alcohol a partir de la pulpa de café” (Rodríguez, 2013); “Obtención de antioxidantes a partir del epicarpio del café (*Coffea arabica* L.) empleando fluidos presurizados, una alternativa de aprovechamiento para este residuo agroindustrial” (Herrera, 2016); “Aprovechamiento de residuos agroindustriales en Colombia” (Peñaranda et al., 2017); “Aprovechamiento de la pulpa de café como alternativa de valorización de subproductos” (Serna-Jiménez et al., 2018), “Estrategias y tendencias del aprovechamiento de la pulpa y mucílago del café en Colombia” (Castellanos, 2020).

Mediante los estudios reportados con anterioridad se puede observar que los residuos provenientes de la industria cafetera presentan potenciales significativos de aprovechamiento en un amplio campo de la industria, por lo que es necesario crear estrategias en las que se utilicen adecuadamente y no se desperdicie este potencial.

## Revisión de técnicas enfocadas en la obtención de azúcares con pulpa de café

La hidrólisis o degradación de los polisacáridos en azúcares fermentables es una reacción compleja, por lo que antes de hidrolizar es necesario someter la biomasa a pretratamientos que faciliten el proceso. Estos pretratamientos se clasifican en mecánicos, térmicos, fisicoquímicos y químicos (Serna-Jiménez et al., 2018); en este último se encuentra el tratamiento con disolventes, que es el más utilizado en los estudios. Luego del pretratamiento de la pulpa de café residual y la respectiva hidrólisis, se debe realizar el conteo de azúcares reductores. De estos métodos los más comunes son la cromatografía líquida de alta resolución (HPLC), el método 3,5 dinitrosalicílico (DNS), la cromatografía de gases y la electroforesis capilar (EC).

La concentración de azúcares fermentables en la pulpa de café hidrolizada la transforma en un sustrato provechoso para la producción de diversos bioproductos como el bioetanol. La hidrólisis se puede llevar a cabo de cinco formas distintas: ácida, alcalina, enzimática, en agua sub- y supercrítica e hidrotérmica.

La hidrólisis ácida es un proceso que se realiza mediante el uso de diferentes ácidos, por ejemplo, el ácido clorhídrico, sulfúrico, nítrico, fosfórico, etc., con el fin de romper las cadenas de polisacáridos presentes en la materia prima rápidamente hasta obtener los monosacáridos. En este proceso los ácidos se emplean a diferentes concentraciones y temperaturas; sin embargo, en esta hidrólisis se debe tener precaución con la degradación de los azúcares, ya que esto afectaría la fermentación posterior al formar productos que inhiben y disminuyen el rendimiento del proceso (Hernández, 2017). Es un proceso químicamente complejo, donde se forman compuestos inhibidores provenientes de la deshidratación de pentosas (furfural) y hexosas (hidroximetilfurfural), además de ácidos grasos provenientes de la desacetilación de la hemicelulosa, como el ácido fórmico o el acético, y del rompimiento del hidroximetilfurfural (ácido levulínico) (Acevedo y Peñaloza, 2021).

Según las investigaciones, en esta hidrólisis el ácido sulfúrico es el reactivo comúnmente utilizado y

los contenidos de azúcares reductores totales (ART) para la pulpa de café se encuentran reportados entre 0,65 y 21,81 g/L (Rodríguez et al., 2020; Urbaneja et al., 1997). Para otras biomásas similares se reportan valores de 39,14 (maíz amarillo duro) (Chauca et al., 2017); 3,84 (cáscara de banano) (Cortés et al., 2013); 31,77 (cáscara de naranja) (Cortés et al., 2013); 12,805 (hoja de caña de azúcar) (Bardales et al., 2015); 11,738 (cascarilla de arroz) (Bardales et al., 2015), y 20,978 (paja de avena) (Gómez, 2008).

La hidrólisis alcalina es una reacción química llevada a cabo a temperaturas elevadas y que utiliza la presión para crear calor y acelerar el proceso; en ella los compuestos alcalinos son usados como agentes activos de reacción, para descomponer material biológico. La hidrólisis básica facilita el proceder de las bacterias y enzimas, y permite eliminar y separar la lignina de los polisacáridos a los que está ligada mediante el rompimiento de su estructura (Hernández, 2017). Esta hidrólisis genera subproductos que inhiben ciertos procesos biológicos como la fermentación alcohólica y la metanogénesis, para formar compuestos inhibidores como furfural e hidroximetilfurfural (Gómez, 2008). De acuerdo con las investigaciones, los contenidos de azúcares reductores totales ART reportados que utilizan hidrólisis alcalina con diferentes biomásas son: 1,58 para maíz amarillo duro (Chauca et al., 2017), 1,356 para hoja de caña de azúcar y 1,273 para cascarilla de arroz (Bardales et al., 2015).

La hidrólisis enzimática tiene como función principal convertir la biomasa en azúcares fermentables, utilizando enzimas que actúan como catalizadores biológicos para acelerar la velocidad de las reacciones bioquímicas, y generar la ruptura de los polisacáridos. Con esta hidrólisis se obtienen rendimientos altos, puesto que los catalizadores son específicos para cada reacción, adicionalmente descarta el uso de agentes químicos y la producción de compuestos inhibidores de la fermentación (Hernández, 2017). Las investigaciones reportadas para esta hidrólisis son las de Camacho et al. (2015), en la que la pulpa de café con celulasas de *Trichoderma reesei* con pretratamientos ácido y alcalino obtuvo un rango de ART de entre 6,32 y 8,91 ; y la de Gómez (2008), donde otra biomasa como la paja de avena con una

preparación comercial de celulasas obtuvo un valor de ART de 18,839 .

La hidrólisis en agua sub- y supercrítica es una alternativa novedosa para la producción de azúcares fermentables con residuos lignocelulósicos para la producción de biocombustibles, puesto que es “considerada eficiente y respetuosa con el medio ambiente, debido a que ofrece varias ventajas, como la no generación de sustancias químicas tóxicas, cortos tiempo de reacción, bajos grados de corrosión y baja generación de residuos y subproductos” (Montealegre y Polanco, 2016, p.13). Las condiciones críticas del agua elevan su reactividad, lo que le permite actuar como un catalizador, desencadenando reacciones de hidrólisis aceleradas de las moléculas orgánicas, que conducen a un grupo de compuestos como los azúcares reductores (Montealegre y Polanco, 2016). Esta tecnología permite hidrolizar la celulosa y hemicelulosa de la biomasa de forma simultánea sin realizar pretratamientos y demuestra ser prometedora en términos económicos y ambientales (Cantero et al., 2015). Algunos estudios donde se aplica esta novedosa tecnología usan biomasa lignocelulósica como pasto kikuyo (Montealegre y Polanco, 2016), cáscara de arveja (González, 2016), y papel periódico (Bustos y Ramírez, 2018) para la obtención de azúcares reductores.

La hidrólisis hidrotérmica consiste en mezclar agua con la biomasa lignocelulósica y someter la mezcla a condiciones de temperatura y presión elevadas. Estas condiciones cambian el grado final de degradación de la materia al igual que la relación masa/volumen de agua empleada. Este tipo de hidrólisis presenta buenos rendimientos en el proceso, permite el aprovechamiento fraccionado de los componentes, genera bajas concentraciones de subproductos inhibidores de la fermentación y disminuye el impacto ambiental; sin embargo, origina elevados costos en el proceso (Rodríguez, 2016). La hidrólisis hidrotérmica produce dos fracciones valorizables, una líquida, rica en compuestos de interés y otra sólida, susceptible de una valorización posterior tanto material como energética (Martín y Pérez, 2019). Adicionalmente este tipo de hidrólisis generalmente se reporta en las investigaciones como un tratamiento previo a los demás tipos de hidrólisis.



De las clases de hidrólisis mencionadas, la ácida y la enzimática son las más reportadas en las investigaciones, puesto que en la fase experimental son las que presentan mejores rendimientos en la obtención de azúcares fermentables y alcoholes, adicionalmente la ácida presenta el menor tiempo de reacción y la enzimática no genera compuestos inhibidores.

## Bioetanol

El bioetanol o etanol carburante es un compuesto líquido orgánico con fórmula  $C_2H_5OH$ , inflamable, incoloro, volátil y con olor característico (Bolívar, 2020). “Posee la misma composición química que el etanol, pero se diferencian en su origen, es decir, el bioetanol se genera del procesamiento de biomasa, mientras que el etanol químico, de la industria petroquímica” (Acevedo y Peñaloza, 2021, p. 62)

Adicionalmente, el bioetanol es un recurso energético que ofrece ventajas medioambientales y económicas, potencialmente sostenible comparado con los combustibles fósiles (Rodríguez y Cárdenas, 2009) y su producción en los últimos años ha tomado relevancia, debido a que las reservas de petróleo disminuyen continuamente, generando así la necesidad mundial de diversificar energéticamente.

El bioetanol es un biocombustible y se clasifica como se menciona a continuación: de primera generación o convencionales que utilizan cultivos agrícolas destinados a la alimentación humana como materia prima y consisten en la conversión

bioquímica de los carbohidratos en alcohol (Cortés-Sánchez et al., 2019); de segunda generación, que se producen con biomasa lignocelulósica, e incluyen residuos agrícolas, forestales y desechos urbanos; por lo que no comprometen la seguridad alimentaria ni contribuyen a la destrucción de espacios naturales en su producción (Cortés-Sánchez et al., 2019), y de tercera generación que plantean su producción a base de algas micro- y macroscópicas, ya que estas son una fuente renovable poseedora de diversas ventajas actualmente en investigación (Cortés-Sánchez et al., 2019).

Según lo mencionado y dado que la pulpa de café residual es material lignocelulósico, cabe resaltar que la presente investigación hace referencia a la producción de bioetanol de segunda generación y presenta ventajas tales como reducción en las emisiones de  $CO_2$  y es una fuente de energía renovable.

La Tabla 3 evidencia que la pulpa de café residual es una materia prima potencial en la producción de bioetanol, dado que en las investigaciones ha presentado resultados favorables en el proceso en términos del rendimiento, y además genera diversos beneficios ambientales como la disminución en el consumo de energía no renovable, la reducción de las emisiones de gases de efecto invernadero y la disminución de la contaminación presente en la zona cafetera.

A pesar de lo mencionado, esta revisión expone que las investigaciones dirigidas a la producción de bioetanol con un subproducto como la pulpa de café

**Tabla 3.** Investigaciones para la producción de bioetanol

Autor	Tipo de hidrólisis	Rendimiento
Gurram et al., 2015	Enzimática	95 % para la pulpa de café, es decir 0,51 g etanol/g glucosa
Menezes et al., 2014	Enzimática	0,4 g de etanol/g de glucosa (para una concentración final de 13,66 g/L de etanol)
Rodríguez, 2013	Enzimática	95,76 % a 97,78 % para la pulpa de café
Rodríguez, 2013	Ácida	93,97 % para la pulpa de café
Rodríguez, 2013	Alcalina	95,59 % para la pulpa de café
Sadhukhan et al., 2019	Enzimática	48,6 US gal/ton de pulpa de café, es decir un rendimiento en masa de 14,5 %
Shenoy et al., 2011	Ácida	9,35 % pulpa de café seca y 40 % pulpa de café húmeda
Widjaja et al., 2016	Enzimática	0,065 g etanol/g glucosa y xilosa

*Nota.* Aquí se presenta la recopilación de datos reportados por diferentes autores dirigidos a la producción de bioetanol con los hidrolizados de la pulpa de café residual; se especifican el tipo de hidrólisis empleado y el rendimiento de la producción de etanol carburante, es importante también destacar que solo se consideraron las tres hidrólisis más utilizadas en los estudios, y que cada investigación presentaba sus propias condiciones. Fuente: tabla de elaboración propia.

son limitadas, puesto que en la industria cafetera no se le ha dado el valor correspondiente y sigue siendo una fuente de alta contaminación para la zona implicada.

## Conclusiones

La caficultura podría fomentar el desarrollo económico, social y ambiental de los países cafeteros mediante el aprovechamiento de los residuos sólidos generados en esta industria, debido a que poseen un alto potencial para ser utilizados en la elaboración de nuevos productos y aportar valor agregado a los ya existentes. Adicionalmente, con alternativas de uso de los subproductos se crearía una diversificación en las actividades relacionadas con el sector cafetero; se generaría una cadena de empleo más amplia, que mejoraría la calidad de vida de quienes dependen de esta industria, y se podrían recuperar las condiciones ambientales alteradas.

En la caficultura se resalta la pulpa de café como subproducto principal, puesto que constituye alrededor del 42 % del peso del fruto fresco que se obtiene del procesamiento o beneficio húmedo del grano de la especie *Coffea arabica*. Adicionalmente presenta valores significativos de polisacáridos, como celulosa, hemicelulosa y pectina, en donde la celulosa indica la mayor composición. Estos polisacáridos se pueden convertir en azúcares fermentables mediante los diferentes tipos de hidrólisis, con el fin de darles valor agregado y poder producir nuevos bioproductos. En el caso de la pulpa de café residual, las hidrólisis más adecuadas son la ácida y la enzimática. Sin embargo, este potencial se desaprovecha, visto que la pulpa sigue siendo una fuente contaminante y un desperdicio económico.

La obtención de bioetanol mediante el uso de pulpa de café como materia prima ofrecería ventajas medioambientales y económicas, considerando que es un recurso energético sostenible comparado con los combustibles fósiles usados masivamente en la actualidad. En el desarrollo de esta revisión se observó que las investigaciones relacionadas con la producción de bioetanol con pulpa de café son escasas, a pesar de que se destacan rendimientos favorables en los estudios realizados, lo que demuestra que existe un amplio campo por estudiar,

ya que esta metodología no ha sido implementada ni explotada.

En la industria de la caficultura se encuentran posibilidades para implementar biorrefinerías en su ciclo productivo, donde se aprovechen todos los subproductos como la pulpa de café, el mucílago, el pergamino y la película plateada, con el fin de utilizarlos como materias primas en otros procesos y convertirse en un ciclo 100 % productivo. La biorrefinería ofrecería beneficios como disminución del impacto ambiental, producciones sostenibles y rentables, el acercamiento a una economía circular y la obtención de nuevos ingresos económicos en los países productores de café. Cabe destacar que su construcción debe localizarse en zonas aledañas a los cultivos de café, donde se realice el beneficio, puesto que esto resulta un beneficio por la facilidad en la adquisición de la biomasa, su transporte desde la fuente hasta la planta de procesamiento, las vías de acceso, entre otros factores socioeconómicos.

## Agradecimientos

Los autores agradecen a su alma mater, la Fundación Universidad de América por nutrirlos de intelecto y conocimiento, y a la docente Diana Morales Fonseca por guiarlos y corregirlos durante toda la realización del documento, y por compartirles gran parte de su conocimiento.

## Referencias

- Acevedo, M., Peñaloza, I., 2021. Evaluación de la extracción de azúcares presentes en la pulpa de café residual para la obtención de bioproductos. Trabajo de grado. Universidad de América.
- Alves, R., Rodrigues, F., Nunes, M., Vinha, A., Oliveira, M., 2017. State of the art in coffee processing by-products. En: Galanakis, C. (Ed.), Handbook of coffee processing by-products: sustainable applications. Academic Press, Londres. pp. 1-26.
- Ait Sair, A., Kansau, K., Michaud, F., Cathala, B., 2021. Multicriteria definition of small-scale biorefineries based on a statistical classification. Sustainability 13(13), 7310. DOI: 10.3390/su13137310
- Arévalo-Gallegos, A., Ahmad, Z., Asgher, M., Parra-Saldivar, R., Iqbal, H., 2017. Lignocellulose: A sustainable material to produce value-added products with a zero-waste approach — A review. Int. J. Biol. Macromol. 99, 308-318. DOI: 10.1016/j.ijbiomac.2017.02.097

- Aristizábal, C., 2019. Aplicación del concepto de biorrefinería a la pulpa de café, mediante extracción fitoquímica y procesos termoquímicos, para la obtención de productos de alto valor agregado. Tesis de maestría. Instituto Tecnológico Metropolitano, Medellín, Colombia.
- Arriola, D., García, R., 1985. Caracterización química de la pectina obtenida de desechos del beneficiado de café. *Rev. Cient.* 3(2), 13-18.
- Bardales, C., Rojas, C., León, C., 2015. Evaluación de los principales residuos lignocelulósicos agroindustriales del departamento de La Libertad, Perú como potenciales materias primas para la obtención de bioetanol. *Arnaldoa* 22(1), 225-232.
- Belitz, H., Grosch, W., Schieberle, P., 2008. *Lehrbuch der Lebensmittelchemie*. Springer-Verlag, Berlín. DOI: 10.1007/978-3-540-73202-0
- Blinová, L., Sirotiak, M., Bartošová, A., Soldán, M. (2017). Review: Utilization of waste from coffee production. *Res. Pap. - North. Territ. Libr.* 25(40), 91-101. DOI: 10.1515/rput-2017-0011
- Bolaños, Y., Lagos, V., 2013. Obtención y purificación de ácido glutámico a partir de hidrolizados de pulpa de café y jugo de fique fermentables por la bacteria *Corynebacterium glutamicum* ATCC 13032. Trabajo de grado. Universidad de Nariño, Nariño, Colombia.
- Bolívar, G., 2020. Alcohol etílico: estructura, propiedades, usos, obtención. Lifeder, disponible: <https://www.lifeder.com/alcohol-etilico/>; consultado: septiembre de 2021.
- Braham, J., Bressani, R. (Eds.), 1978. La pulpa de café. Composición, tecnología y utilización. IDRC-108s. Instituto de Nutrición de Centro América y Panamá (INCAP), Guatemala.
- Bustos, L., Ramírez, A., 2018. Hidrólisis *batch* de residuos de papel periódico para la producción de azúcares reductores por medio de agua subcrítica. Trabajo de grado. Facultad de Ingeniería, Universidad de La Salle, Bogotá, DC.
- Calle, H., 1977. Pectinas. En: Subproductos del café. Bol. Tec. 6. Cenicafé, Manizales, Colombia. pp. 39-44.
- Camacho, É., Alarcón, E., García, J., Gutiérrez, B., 2015. Pretratamiento químico e hidrólisis enzimática de pulpa de café para obtención de azúcares reductores totales. En: Segunda Reunión Nacional de la Red Temática de Bioenergía; XI Reunión Nacional de la Rembio. Xalapa, Veracruz, México. DOI: 10.13140/RG.2.1.3510.7443
- Cantero, D., Vaquerizo, L., Mato, F., Bermejo, M., Co-cero, M., 2015. Energetic approach of biomass hydrolysis in supercritical water. *Bioresour. Technol.* 179, 136-143. DOI: 10.1016/j.biortech.2014.12.006
- Cardona, C., 2009. Perspectivas de la producción de biocombustibles en Colombia: Contextos latinoamericano y mundial. *Rev. Ing.* (29), 109-120.
- Castellanos, P., 2020. Estrategias y tendencias del aprovechamiento de la pulpa y mucílago del café en Colombia. Trabajo de grado. Escuela de Ciencias Agrícolas, Pecuarias y del Medio Ambiente, Universidad Nacional Abierta y a Distancia, La Plata, Colombia.
- Cerdá, E., Khalilova, A., 2016. Economía circular, estrategia y competitividad empresarial. *Econ. Ind.* 401, 11-20.
- Chauca, K., Grosso, C., Cabrera, J., León, C., Arellano, J., Rodríguez, C., Pretel, O., 2017. Extracción de azúcares reductores totales ART por métodos físicos y químicos de planta de *Zea mays* (Poaceae) "maíz amarillo duro". *Arnaldoa* 24(1), 289-300.
- Chávez-Sifontes, M., Dómine, M., 2013. Lignina, estructura y aplicaciones: métodos de despolimerización para la obtención de derivados aromáticos de interés industrial. *Av. Cienc. Ing.* 4(4), 15-46.
- Corro, G., Pal, U., Cebada, S., 2014. Enhanced biogas production from coffee pulp through deligninocellulosic photocatalytic pretreatment. *Energy Sci. Eng.* 2(4), 177-187.
- Corro, G., Paniagua, L., Pal, U., Bañuelos, F., Rosas, M., 2013. Generation of biogas from coffee-pulp and cowdung co-digestion: Infrared studies of postcombustion emissions. *Energy Convers. Manag.* 74, 471-48. DOI: 10.1016/j.enconman.2013.07.017
- Cortés-Sánchez, M., Gata-Montero, E., Pipió-Ternero, A., Rodríguez-Rivas, Á., Sánchez-Santos, J., 2019. Biocombustibles: tipos y estrategias de producción. *MoleQla: Rev. Cienc. Univ. Pablo Olavide* (35), 20-25.
- Cortés, W., Ibla, J., Calderón, L., Herrera, A., 2013. Cuantificación de azúcares reductores en las cáscaras de naranja y banano. *Rev. Tecnol.* 12(2), 72-76. DOI: 10.18270/rt.v12i2.772
- Cury, K., Aguas, Y., Martínez, A., Olivero, R., Chams, L., 2017. Residuos agroindustriales: Su impacto, manejo y aprovechamiento. *Rev. Colomb. Cienc. Animal* 9(Sup. 1), 122-132. DOI: 10.24188/recia.v9.nS.2017.530
- Das, K., García, J., García, M., 2007. Revisión del concepto de biorrefinería y oportunidades en el sector palmero. *Palmas* 28(especial), 61-69.
- Departamento Nacional de Planeación Colombia, 2011. Conpes 3697. Política para el Desarrollo Comercial de la Biotecnología a Partir del Uso Sostenible de la Biodiversidad. Bogotá, DC.
- Departamento Nacional de Planeación Colombia, 2018. Conpes 3934. Política de Crecimiento Verde. Bogotá, DC.
- Dias, M., Melo, M., Schwan, R., Silva, C., 2015. A new alternative use for coffee pulp from semi-dry process to  $\beta$ -glucosidase production by *Bacillus subtilis*. *Lett. Appl. Microbiol.* 61(6), 588-595. DOI: 10.1111/lam.12498

- Díaz, Ó., 2009. Productos Krofal. Trabajo de grado. Facultad de Arquitectura y Diseño, Pontificia Universidad Javeriana, Bogotá DC.
- Fierro-Cabral, N., Contreras-Oliva, A., González-Ríos, O., Rosas-Mendoza, E., Morales-Ramos, V., 2018. Chemical and nutritional characterization of coffee pulp (*Coffea arabica* L.). *Agroproductividad*, 11(4), 9-13.
- Flórez-Delgado, D., Rosales-Asensio, E., 2018. Uso del ensilaje de pulpa de café en alimentación animal. *Mundo FESC* 8(15), 73-82.
- Food and Agriculture Organization 2018. Los contaminantes agrícolas: una grave amenaza para el agua del planeta. <https://www.fao.org/news/story/es/item/1141818/icode/>
- Gómez, F., 2008. Métodos secuenciales de pretratamiento químico y enzimático de residuos agrícolas para la producción de metano. Trabajo de maestría. División de Ciencias Ambientales, Instituto Potosino de Investigación Científica y Tecnológica A. C., San Luis Potosí, México.
- González, I., 2016. Estudio experimental para la obtención de azúcares reductores a partir de la vaina de *Pisum sativum* L. (arveja) mediante hidrólisis en agua supercrítica. Trabajo de grado. Facultad de Ingeniería, Universidad de La Salle, Bogotá, DC.
- Gurram, R., Al-Shannag, M., Knapp, S., Das, T., Singas, E., Alkasrawi, M., 2016. Technical possibilities of bioethanol production from coffee pulp: A renewable feedstock. *Clean Technol. Environ. Policy* 18(1), 269-278. DOI: 10.1007/s10098-015-1015-9
- Hachicha, R., Rekik, O., Hachicha, S., Ferchichi, M., Wodward, S., Moncef, N., Cegarra, J., Mechichi, T., 2012. Co-composting of spent coffee ground with olive mill wastewater sludge and poultry manure and effect of *Trametes versicolor* inoculation on the compost maturity. *Chemosphere* 88(6), 677-682. DOI: 10.1016/j.chemosphere.2012.03.053
- Hejna, A., 2021. Potential applications of by-products from the coffee industry in polymer technology — Current state and perspectives. *Waste Manage.* 121, 296-330. DOI: 10.1016/j.wasman.2020.12.018
- Hendroko, R., Wahono, S., Adinurani, P., Wahyudi, A., Widodo, W., Mel, M., Nugroho, Y., Prabowo, B., Liwang, T., 2018. Characterisation of Arabica coffee pulp — hay from Kintamani — Bali as prospective biogas feedstocks. *Matec Web Conf.* 164(40), 01039. DOI: 10.1051/mateconf/201816401039
- Hernández, C., 2017. Obtención de bioetanol a partir de hidrolizados de residuos de fruta. Tesis de maestría. Universidad de Oviedo, Oviedo, España.
- Herrera, F., 2016. Obtención de antioxidantes a partir del epicarpio de café (*Coffea arabica* L.) empleando fluidos presurizados, una alternativa de aprovechamiento para este residuo agroindustrial. Trabajo de grado. Facultad de Ingeniería, Universidad Libre, Bogotá, DC.
- International Coffee Organization, 2020. Total production by all exporting countries. Disponible en: <http://www.ico.org/historical/1990%20onwards/PDF/1a-total-production.pdf>; consultado: agosto de 2021.
- International Coffee Organization, 2021a. Informe del mercado de café, enero 2021. Disponible en: <http://www.ico.org/documents/cy2020-21/cmr-0121-c.pdf> consultado: agosto de 2021.
- International Coffee Organization, 2021b. Imports by selected importing countries from all sources January 2021 to June 2021. Disponible en: <http://www.ico.org/prices/m5-imports.pdf>; consultado: agosto de 2021.
- International Coffee Organization, 2021c. Aspectos botánicos. [http://www.ico.org/es/botanical\\_c.asp](http://www.ico.org/es/botanical_c.asp); consultado: agosto de 2021.
- International Coffee Organization, 2021d. Crop year production by country. Disponible en: <https://www.google.com/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=&ved=2ahUKEwis-q8fv5KX0AhV7RTABHUJ9AsQQFn0E-CAIQAQ&url=https%3A%2F%2Fwww.ico.org%2Fprices%2Fpo-production.pdf&usg=AOvVaw1s7OKA9cKeGCPOEY6EKyku> ; consultado: agosto de 2021.
- Irawaty, W., Hindarso, H., Soetaredjo, F., Mulyono, Y., Kurniawan, H., 2004. Utilization of Indonesian coffee pulp to make an activated carbon. En: *Asian Pacific Confederation of Chemical Engineers Congress Program and Abstracts* 452. The Society of Chemical Engineers, Barton, Australia. DOI: 10.11491/APC-CHE.2004.0.452.0
- Janissen, B., Huynh, T., 2018. Chemical composition and value-adding applications of coffee industry byproducts: A review. *Resour. Conserv. Recycl.* 128, 110-117. DOI: 10.1016/j.resconrec.2017.10.001
- Klingel, T., Kremer, J., Gottstein, V., de Rezende, T., Schwarz, S., Lachenmeier, D., 2020. A review of coffee by-products including leaf, flower, cherry, husk, silver skin, and spent grounds as novel foods within the European Union. *Foods* 9(5), 665. DOI: 10.3390/foods9050665
- Martín, M., Pérez, A., 2019. Hidrólisis hidrotérmica de residuos vegetales de la agricultura y acondicionamiento de los hidrolizados para la obtención de compuestos de interés Trabajo de grado. Facultad de Ciencias, Universidad de Granada, Granada, España.
- Menezes, E., do Carmo, J., Ferreira, J., Menezes, A., Costa, I., Queiroz, F., Pimenta, C., 2014. Optimization of alkaline pretreatment of coffee pulp for production of bioethanol. *Biotechnol. Prog.* 30(2), 451-462. DOI: 10.1002/btpr.1856
- Montealegre, J., Polanco, Á., 2016. Obtención de azúcares reductores a partir de residuos de corte de césped

- de la ciudad de Bogotá, por medio de hidrólisis en agua sub- y supercrítica. Trabajo de grado. Facultad de Ingeniería, Universidad de La Salle, Bogotá, DC.
- Murthy, P., Manjunatha, M., Sulochannama, G., Naidu, M., 2012. Extraction, characterization and bioactivity of coffee anthocyanins. *Eur. J. Biol. Sci.* 4(1), 13-19.
- Murthy, P., Naidu, M., 2012. Sustainable management of coffee industry by-products and value addition — A review. *Resour. Conserv. Recycl.* 66, 45-58. DOI: 10.1016/j.resconrec.2012.06.005
- Noriega, A., Silva, R., García de Salcedo, M., 2009. Composición química de la pulpa de café a diferentes tiempos de ensilaje para su uso potencial en la alimentación animal. *Zootecnia Trop.* 27(2), 135-141.
- Orozco, A., Pérez, M., Guevara, O., Rodríguez, J., Hernández, M., González-Villa, F., Polvillo, O., Arias, M., 2008. Biotechnological enhancement of coffee pulp residues by solid-state fermentation with *Streptomyces*. Py-GC/MS analysis. *J. Anal. Appl. Pyrolysis* 81(2), 247-252. DOI: 10.1016/j.jaap.2007.12.002
- Peñaranda, L., Montenegro, S., Giraldo, P., 2017. Aprovechamiento de residuos agroindustriales en Colombia. *Rev. Investig. Agrar. Ambient.* 8(2), 141-150. DOI: 10.22490/21456453.2040
- Pérez, J., 2013. Economía cafetera y desarrollo económico en Colombia. Universidad de Bogotá Jorge Tadeo Lozano, Bogotá, DC.
- Pleissner, D., Neu, A.-K., Mehlmann, K., Schneider, R., Puerta-Quintero, G., Venus, J., 2016. Fermentative lactic acid production from coffee pulp hydrolysate using *Bacillus coagulans* at laboratory and pilot scales. *Bioresour. Technol.* 218, 167-173. DOI: 10.1016/j.biortech.2016.06.078
- Restrepo, L., Villa, G., 2020. Estrategias para el aprovechamiento de la pulpa de café en las fincas cafeteras del municipio de Andes, Antioquia. Trabajo de grado. Facultad de Ciencias Administrativas y Económicas, Tecnológico de Antioquia Institución Universitaria, Medellín, Colombia.
- Rodríguez, E., Cárdenas, V., 2009. Evaluación de la producción de bioetanol a partir de la degradación de la pulpa de café. Trabajo de grado. Facultad de Ingeniería Ambiental y Sanitaria, Universidad de La Salle, Bogotá, DC.
- Rodríguez, I., 2016. Pretratamiento de hidrólisis hidrotérmica para la degradación de los carbohidratos complejos de residuos de frutas para la obtención de bioetanol. Tesis de maestría. Universidad de Oviedo, Oviedo, España.
- Rodríguez, N., 1999. Manejo de residuos en la agroindustria cafetera. En: Seminario Internacional Gestión Integral de Residuos Sólidos y Peligrosos Siglo XXI. Universidad de Antioquia, Medellín, Colombia.
- Rodríguez, N., 2011. Experiencias recientes en el uso de los subproductos del café. *Diapositivas* Cenicafé, disponible en: [https://www.repic.ch/wp-content/uploads/2020/10/rk\\_kaffeeabfaelle\\_35\\_rodriguez.pdf](https://www.repic.ch/wp-content/uploads/2020/10/rk_kaffeeabfaelle_35_rodriguez.pdf); consultado: agosto de 2021.
- Rodríguez, N., 2013. Producción de alcohol a partir de la pulpa de café. *Rev. Cenicafé* 64(2), 78-93.
- Rodríguez, N., Zambrano, D., 2010. Los subproductos del café: Fuente de energía renovable. *Avances Técnicos Cenicafé* (393), 1-8.
- Rodríguez-Valencia, N., Zambrano-Franco, D., 2011. Producción de alcohol a partir del mucílago de café. *Rev. Cenicafé* 62(1), 56-69.
- Rodríguez, R., Laencina, J., Ros, J., 2020. Evaluation of coffee pulp as substrate for polygalacturonase production in solid state fermentation. *Emir. J. Food Agric.* 32(2), 117-124. DOI: 10.9755/efja.2020.v32.i2.2068
- Roussos, S., Aquíahuatl, M., Trejo-Hernández, M., Perraud, I., Favela, E., Ramakrishna, M., Raimbault, M., Viniegra-González, G., 1995. Biotechnological management of coffee pulp — isolation, screening, characterization, selection of caffeine-degrading fungi and natural microflora present in coffee pulp and husk. *Appl. Microbiol. Biotechnol.* 42(5), 756-762. DOI: 10.1007/BF00171958
- Rubio, J., Pineda, J., 1973. Composición química y digestibilidad in vitro de la pulpa de café. *Rev. Cenicafé* 24(3), 61-76.
- Sadhukhan, J., Martínez-Hernández, E., Amezcua-Allieri, M., Aburto, J., Honorato, J., 2019. Economic and environmental impact evaluation of various biomass feedstock for bioethanol production and correlations to lignocellulosic composition. *Bioresour. Technol. Rep.* 7, 100230. DOI: 10.1016/j.biteb.2019.100230
- Serna-Jiménez, J., Torres-Valenzuela, L., Martínez, K., Hernández, M., 2018. Aprovechamiento de la pulpa de café como alternativa de valorización de subproductos. *Rev. ION* 31(1), 37-42. DOI: 10.18273/revion.v31n1-2018006
- Serrat-Díaz, M., de la Fe-Isaac, Á., de la Fe-Isaac, J., Montero-Cabrales, C., 2018. Extracción y caracterización de pectina de pulpa de café de la variedad Robusta. *Rev. Cubana Quím.* 30(3), 522-538.
- Setyobudi, R., Zalizar, L., Wahono, S., Widodo, W., Wahyudi, A., Mel, M., Prabowo, B., Jani, Y., Nugroho, Y., Liwang, T., Zaebudinet, A., 2019. Prospect of Fe non-heme on coffee flour made from solid coffee waste: Mini review. *IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci.* 293. DOI: 10.1088/1755-1315/293/1/012035
- Shenoy, D., Pai, A., Vikas, R., Neeraja, H., Deeksha, J., Nayak, C., Rao, C., 2011. A study on bioethanol production from cashew apple pulp and coffee pulp waste. *Biomass Bioenergy* 35(10), 4107-4111. DOI: 10.1016/j.biombioe.2011.05.016
- Shi, L., 2016. Bioactivities, isolation and purification methods of polysaccharides from natural products:

- A review. Int. J. Biol. Macromol. 92, 32-48. DOI: 10.1016/j.ijbiomac.2016.06.100
- Statista, 2016. Global leading coffee consuming countries in 2015 (in liters per capita). Disponible en: <https://www.statista.com/statistics/277135/leadingcountries-by-coffee-consumption>; consultado: agosto de 2021.
- Suárez, J., 2012. Aprovechamiento de los residuos sólidos provenientes del beneficio del café, en el municipio de Betania, Antioquia: Usos y aplicaciones. Trabajo de grado para especialización. Facultad de Ingenierías, Corporación Universitaria Lasallista, Caldas, Colombia.
- Subedi, R., 2011. Comparative analysis of dry and wet processing of coffee with respect to quality and cost in Kavre district, Nepal: A case of Panchkhal village. Int. Res. J. Appl. Basic Sci. 2(5), 181-193.
- Torres, W., 2020. Efecto del extracto de pulpa y mucílago del café (*Coffea arabica* L.) durante el beneficio en la calidad física y sensorial del grano variedad Catimor. Tesis de doctorado. Escuela Universitaria de Posgrado, Universidad Nacional Federico Villarreal, Lima.
- Urbaneja, G., Ferrer, J., Páez, G., Arenas, L., Colina, G., Sandoval, L., 1997. Hidrólisis ácida y caracterización de carbohidratos de la pulpa de café. Rev. Fac. Agron. Univ. Zulia 14(2), 265-275.
- Urquijo, E., 2016. Identificación de impactos ambientales relacionados con el proceso de beneficio humedo del café en la vereda de Tres Esquinas - Huila - Colombia. Trabajo de grado para especialización. Especialización en Planeación Ambiental y Manejo Integral de los Recursos Naturales, Universidad Militar Nueva Granada, Bogotá, DC.
- Widjaja, T., Altway, A., Nurkhamidah, S., Edahwati, L., Lini, F., Oktafia, F., 2016. The effect of pretreatment and variety of microorganisms to the production of ethanol from coffee pulp. ARPN J. Eng. Appl. Sci. 11(2), 1056-1060.
- Widjaja, T., Iswanto, T., Altway, A., Shovitri, M., Julias-tuti, S., 2017. Methane production from coffee pulp by microorganism of rumen fluid and cow dung in co-digestion. Chem. Eng. Trans. 56, 1465-1470. DOI: 10.3303/CET1756245
- Zabaniotou, A., Kamaterou, P., 2019. Food waste valorization advocating Circular Bioeconomy: A critical review of potentialities and perspectives of spent coffee grounds biorefinery. J. Clean. Prod. 211, 1553-1566. DOI: 10.1016/j.jclepro.2018.11.230