

**EVALUACIÓN DE LA EXTRACCIÓN DE AZÚCARES PRESENTES EN LA PULPA
DE CAFÉ RESIDUAL PARA LA OBTENCIÓN DE BIOPRODUCTOS**

MARIA ALEJANDRA ACEVEDO GUTIERREZ

ISABELLA PEÑALOZA QUINTERO

**Proyecto Integral de Grado para optar el título de
Ingeniero Químico**

Orientador

Edgar Fernando Moreno

Ingeniero Químico

**FUNDACIÓN UNIVERSIDAD DE AMÉRICA
FACULTAD DE INGENIERÍAS
PROGRAMA DE INGENIERÍA QUÍMICA
BOGOTÁ D.C
2021**

NOTA DE ACEPTACIÓN

Diana Milena Morales Fonseca
Firma del director

Nombre
Firma del presidente jurado

Nombre
Firma del jurado

Nombre
Firma del jurado

Bogotá D.C. febrero 2021

DIRECTIVOS DE LA UNIVERSIDAD

Presidente de la Universidad y Rector del Claustro

Dr. Mario Posada García-Peña

Consejero Institucional

Dr. Luís Jaime Posada García-Peña

Vicerrectora Académica y de Investigaciones

Dra. María Claudia Aponte González

Vicerrector Administrativo y Financiero

Dr. Ricardo Alfonzo Peñaranda Castro

Secretaria General

Dra. Alexandra Mejía Guzmán

Decano de la Facultad de Ingenierías

Ing. Julio César Fuentes Arismendi

Director del Programa de Ingeniería Química

Ing. Nubia Liliana Becerra Ospina

DEDICATORIA

Por dedicar parte su vida en mi educación, por enseñarme a crear mis sueños y a esforzarme por hacerlos realidad, por pausar su vuelo para impulsar el mío, por querer por encima de todo mi bienestar, por guiar mi rumbo, por nunca dejarme rendir, por llenar mi vida de amor, porque sin ellos mi mundo no brillaría de la misma manera, por eso y mil razones más quiero dedicar este trabajo a mis padres Clara Gutiérrez y Jesús Acevedo que son mi mayor ejemplo y a quienes amo profundamente.

María Alejandra Acevedo Gutiérrez

DEDICATORIA

Mi trabajo de grado va dedicado a mis padres, Bibiana Catalina Quintero y Jaime Eduardo Peñaloza, quienes han estado en cada paso de mi vida, que me han convertido en la persona que soy hoy, los que siempre están ahí para levantarme cuando no tengo el mejor ánimo y me empujan a ir más alto cuando si lo tengo, que me ayudan y me apoyan para cumplir cada sueño, cada meta, cada propósito. El día de hoy estoy llena de felicidad y solo quiero decirles gracias porque sin ustedes mi vida no estaría completa y por ustedes me convierto en una ingeniera química, los amo con todo mi corazón y mucho más.

Isabella Peñaloza Quintero

AGRADECIMIENTOS

Queremos agradecer a todos aquellos que hicieron parte de nuestro proceso académico, para iniciar damos gracias a Dios que nos puso en este camino y nos dio las herramientas para culminar esta etapa, a nuestros padres por estar en cada paso y no dejarnos desistir, a nuestra directora de tesis por su acompañamiento durante la realización de la tesis y por tomarse el tiempo de guiarnos en el desarrollo de la misma, a nuestro asesor por tomarse el tiempo de leernos y aconsejarnos y finalmente, pero no menos importante agradecemos mutuamente, porque este trabajo salió adelante con el esfuerzo, constancia y dedicación de las dos.

Las directivas de la Universidad de América, los jurados calificadores y el cuerpo docente no son responsables por los criterios e ideas expuestas en el presente documento. Estos corresponden únicamente a los autores.

TABLA DE CONTENIDO

	pág.
RESUMEN	12
INTRODUCCIÓN	13
OBJETIVOS	15
1. ASPECTOS GENERALES DE LA INDUSTRIA DEL CAFE	16
1.1. La Caficultura	16
1.2. Especies y variedades de café	18
1.2.1. Típica	19
1.2.2. Borbón	19
1.2.3. Maragogipe	19
1.2.4. Tabi	19
1.2.5. Caturra	19
1.2.6. Colombia	20
1.3. El Fruto	20
1.4. El Beneficio del Cafe	21
1.4.1. Selección de frutos	22
1.4.2. Despulpado	23
1.4.3. Remoción del mucílago	23
1.4.4. Lavado	24
1.4.5. Secado	24
1.4.6. Descascarado	24
1.5. Residuos del beneficio de café	25
2. ANÁLISIS BIBLIOGRÁFICO DEL CONTENIDO DE POLISACÁRIDOS EN LA PULPA DE CAFÉ RESIDUAL	29
2.1. Aprovechamiento de los residuos del café	29
2.2. Pulpa de café residual	30
2.3. Composición química de la pulpa de café residual	33
2.4. Contenido de polisacáridos	35
2.4.1. Pectina	36
2.4.2. Celulosa	38
2.4.3. Hemicelulosa	40
2.4.4. Lignina	42
3. TÉCNICAS DE OBTENCIÓN DE AZÚCARES	44

3.1. Pretratamiento de biomasa	44
3.1.1 Pretratamiento mecánico	44
3.1.2. Pretratamiento térmico	44
3.1.3. Pretratamiento físico-químico	45
3.1.4. Pretratamiento químico	45
3.2. Hidrólisis	45
3.2.1. Hidrólisis ácida	46
3.2.2. Hidrólisis alcalina	47
3.2.3. Hidrólisis enzimática	47
3.2.4. Hidrólisis en agua sub y supercrítica	47
3.2.5. Hidrólisis hidrotérmica	48
3.3. Cuantificación de azúcares	48
3.3.1. Cromatografía líquida de alta resolución (HPLC)	48
3.3.2. Método con ácido 3,5 dinitrosalicílico (DNS)	49
3.3.3. Cromatografía de gases	49
3.3.4. Electroforesis capilar (EC)	49
3.4. Evaluación de técnicas para la obtención de azúcares a partir de la pulpa de café	50
3.4.1. Parámetros de selección	50
3.4.2. Matriz de selección	58
4. OBTENCIÓN DE BIOPRODUCTOS	60
4.1. Biomasa microbiana	60
4.2. Bioetanol	61
5. CONCLUSIONES	67
BIBLIOGRAFÍA	68

LISTA DE FIGURAS

	pág.
Figura 1: Exportaciones en millones de sacos de 60 kg de Brasil, Vietnam, Colombia, Indonesia y Etiopía	17
Figura 2: Importaciones en millones de sacos de 60 kg mes a mes en el 2020	18
Figura 3: Partes del fruto de los cafetos	21
Figura 4: Métodos del beneficio del café y sus subproductos	22
Figura 5: Diagrama de bloques del benéfico húmedo	25
Figura 6: Porcentaje de cada residuo producido después del beneficio de café de 1 kg de frutos	26
Figura 7: Producción anual de café en Colombia	27
Figura 8: Documentos publicados por año en la base de datos de Scopus para los residuos de café	29
Figura 9: Producción de pulpa de café residual en Colombia	31
Figura 10: Documentos publicados por año en la base de datos de Scopus para la pulpa de café	32
Figura 11: Estructura de la Pectina	36
Figura 12: Estructura de la Celulosa	38
Figura 13: Estructura de la Hemicelulosa	41
Figura 14: Precursores de la estructura de la Lignina	42
Figura 15: Productos a partir de la hidrólisis en residuos de frutas	46
Figura 16: Esquema general de un sistema de HPLC	49
Figura 17: Estructura del etanol	62

LISTA DE TABLAS

	pág.
Tabla 1: Norma Técnica NTC 2090	23
Tabla 2: Producción de residuos de la industria cafetera en Colombia	27
Tabla 3: Recopilación de datos para el motor de búsqueda “wastes AND coffee AND production” en Scopus	30
Tabla 4: Recopilación de datos para el motor de búsqueda “coffee pulp” en Scopus	33
Tabla 5: Composición química de la pulpa de café según diferentes autores	34
Tabla 6: Recopilación de datos del contenido de pectina en la pulpa de café	37
Tabla 7: Recopilación de datos del contenido de celulosa en la pulpa de café	39
Tabla 8: Recopilación de datos del contenido de hemicelulosa en la pulpa de café	41
Tabla 9: Recopilación de datos del contenido de lignina en la pulpa de café	43
Tabla 10: Recopilación de datos para el rendimiento	51
Tabla 11: Recopilación de datos para los compuestos inhibidores para la fermentación	53
Tabla 12: Recopilación de datos para la versatilidad	55
Tabla 13: Recopilación de datos según las condiciones de reacción	56
Tabla 14: Matriz de selección	59
Tabla 15: Investigaciones para la producción de biomasa microbiana	61
Tabla 16: Investigaciones para la producción de bioetanol	63

RESUMEN

El café ocupa el segundo lugar como producto básico más importante en el mundo, lo que representa grandes producciones en los países cafeteros, por tanto, su industria genera cantidades elevadas de residuos que se convierten en una fuente de contaminación para los recursos naturales presentes en la zona cafetera. El principal residuo de la caficultura es la pulpa de café, que de ser aprovechada podría aportar un valor agregado, debido a sus contenidos de 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 esta investigación fue evaluar la extracción de azúcares presentes en la pulpa de café residual para la obtención de bioproductos, para su desarrollo se realizó una caracterización química de la pulpa de café residual por medio de una revisión bibliográfica en la que se comparó los resultados obtenidos por diferentes autores, seguido se evaluaron las técnicas de obtención de azúcares mediante una matriz de selección con los parámetros más relevantes, finalmente según las técnicas seleccionadas se reportaron algunos estudios fundamentados en la obtención de bioproductos a partir de los hidrolizados de la pulpa de café residual.

PALABRAS CLAVE: Caficultura, pulpa de café, azúcares, hidrolizados, bioproductos.

INTRODUCCIÓN

En los últimos años se ha generado la necesidad de transformar la economía actual, que consiste en un proceso lineal de producir, consumir y desechar, debido a que el impacto ambiental está alcanzando un punto de no retorno. Al continuar con este tipo de economía en el futuro se verán escenarios tales como: escasez de energías, catástrofes climáticas, alta demanda de materias primas a causa de la sobrepoblación y una gran brecha económica entre las diferentes clases sociales, es por ello que se han estado desarrollando estrategias que contribuyan a llevar el mundo hacia un camino donde se logre una economía productiva, efectiva, sostenible y aplicable en todos los procesos industriales. Es importante resaltar que para lograr tener un mundo sostenible debe existir un equilibrio entre los tres pilares básicos: ecológico, económico y social que son la fuente de la sostenibilidad.

El desarrollo sostenible involucra directamente el concepto de Economía Circular cuyo objetivo es imitar y conectar con la naturaleza para disminuir el impacto sobre el medio ambiente generado por la actividad humana, de este modo se pretende reducir los desechos convirtiéndolos en productos reutilizables y con valor agregado permitiendo cerrar los ciclos de producción y mantener un flujo constante de los recursos naturales.

Actualmente, la generación de desechos agroindustriales se ha acelerado, puesto que la demanda de alimentos y la industrialización han aumentado a causa de la densidad poblacional, por ejemplo: una industria como la caficultura, actividad agrícola que tiene como objeto el cultivo y la producción de café, juega un papel importante económicamente para muchos países, pero aún sigue siendo un proceso de producción lineal donde se estima que de la biomasa generada solo una mínima parte se aprovecha en la elaboración de la bebida convirtiendo lo restante en residuos.

Como se mencionó anteriormente, en la industria cafetera más específicamente en el beneficio del café se producen residuos sólidos junto con grandes cantidades de aguas residuales, todo este material vegetal se convierte en una fuente de contaminación para los recursos naturales presentes en la zona cafetera, por lo que la acción ambiental más importante en la producción del café es el manejo y aprovechamiento de subproductos, en especial la pulpa de café residual, puesto que es el mayor subproducto generado en esta industria y que luego del proceso de obtención de la semilla es arrojada a las fuentes hídricas o abandonada a cielo abierto sin tratamiento alguno.

El presente escrito dividido en cuatro capítulos pretende evaluar la extracción de azúcares presentes en la pulpa de café residual, ya que en su composición posee porcentajes significativos

de polisacáridos que pueden ser aprovechados para la obtención de bioproductos con valor agregado y así aportar un adelanto para el logro de un proceso 100% productivo en la caficultura.

En el primer capítulo se presenta una descripción general del impacto económico y ambiental de la industria cafetera en el mundo, resaltando la importancia de la misma en Colombia. Para ello se exponen los países con mayor cantidad de exportaciones e importaciones del café, destacando a Colombia como el tercer productor a nivel mundial, además de las especies existentes, las condiciones óptimas de cultivo en el país y las partes del fruto, dando mayor enfoque a la especie *Coffea arábica* y al beneficio húmedo del café. Finalmente se enfatiza en la necesidad de aprovechar los residuos generados en la industria, como la pulpa de café, mediante estrategias de sostenibilidad.

En el segundo capítulo se realizan dos análisis bibliométricos, uno de forma general que hace referencia al aprovechamiento de los residuos de todo el ciclo productivo y el otro de forma específica que se refiere al aprovechamiento de la pulpa de café residual, dado que esta representa aproximadamente el 42% de la biomasa utilizada en la caficultura, por ello se exhibe la composición química de la pulpa establecida por diferentes autores para la especie *Coffea arábica*, dando prioridad a los polisacáridos como la pectina, la celulosa y la hemicelulosa.

En el tercer capítulo se abordan las técnicas de obtención de azúcares a partir de los polisacáridos presentes en la pulpa de café residual, dado que estos son los componentes de interés en la investigación que permiten dar a este subproducto un valor agregado mediante la producción de bioproductos y que está sin tratamiento alguno solo es un residuo contaminante en la zona cafetera.

En el cuarto y último capítulo se pretende destacar los bioproductos que se pueden obtener a partir de los hidrolizados de pulpa de café según la técnica escogida en el tercer capítulo, lo que permite generar el valor agregado a este subproducto y una nueva fuente de ingresos para los productores de café, asimismo dando un acercamiento del ciclo productivo del café hacia la economía circular.

OBJETIVOS

Objetivo general

Evaluar la extracción de azúcares presentes en la pulpa de café residual para la obtención de bioproductos.

Objetivos específicos

1. Caracterizar el contenido de polisacáridos en la pulpa de café residual de la especie *Coffea arábica* mediante una revisión bibliográfica.
2. Seleccionar las técnicas para la obtención de azúcares a partir de la pulpa de café.
3. Evaluar el potencial de los hidrolizados obtenidos para la producción de biomasa microbiana y etanol carburante.

1. ASPECTOS GENERALES DE LA INDUSTRIA DEL CAFÉ

En el presente capítulo se pretende mostrar una descripción general del impacto económico y ambiental de la industria cafetera en el mundo, resaltando la importancia de la misma en Colombia. Para ello se exponen los países con mayor cantidad de exportaciones e importaciones del café, destacando a Colombia como el tercer productor a nivel mundial, además de las especies existentes, las condiciones óptimas de cultivo en el país y las partes del fruto, dando mayor enfoque a la especie *Coffea arábica* y al beneficio húmedo del café. Finalmente se enfatiza en la necesidad de aprovechar los residuos generados en la industria, como la pulpa de café, mediante estrategias de sostenibilidad.

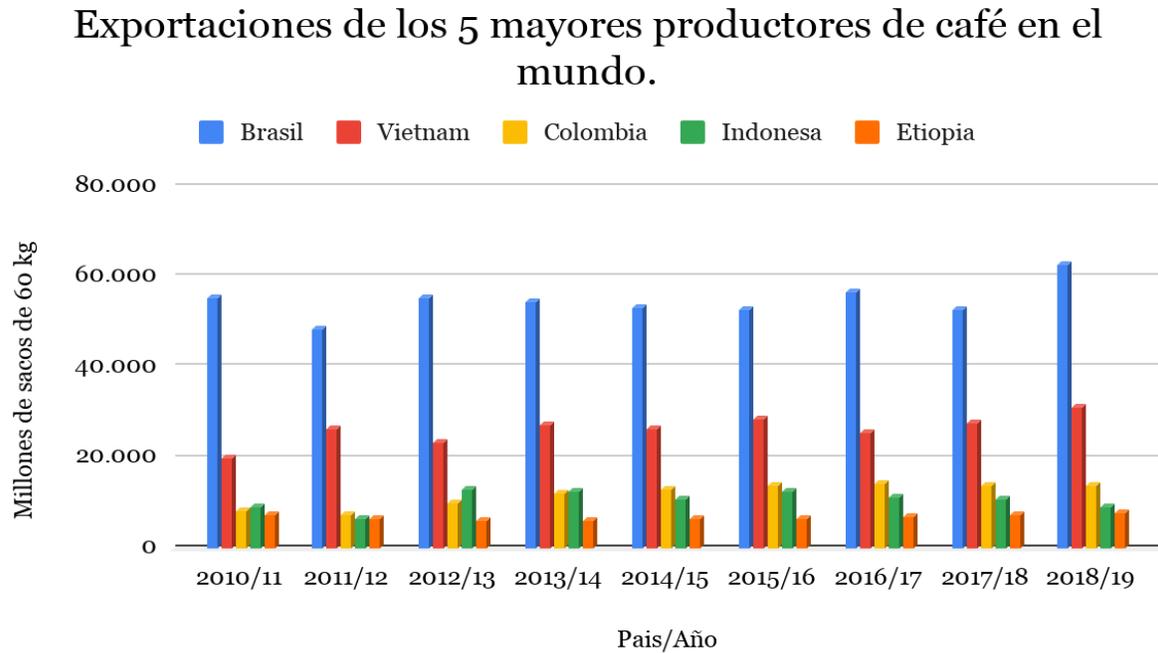
1.1. La caficultura

La caficultura es una actividad agrícola que tiene como objeto el cultivo y la producción de café y contribuye tanto a la economía de los países exportadores como de los importadores, esta industria “proporciona un medio de vida a más de 25 millones de agricultores y a sus familias y supone beneficios económicos para todos los que forman parte de la cadena de valor mundial”. [1]

El café es un producto tropical de gran valor comercial, dado que ocupa el segundo lugar como producto básico más importante en el mundo, siendo el petróleo el primero. Según los datos de la Organización Internacional de Café (ICO), en el 2018/19 la producción total del grano fue de 170,937 millones de sacos de 60 kilogramos [2], siendo los mayores productores de café en el mundo de mayor a menor: Brasil, Vietnam, Colombia, Indonesia y Etiopía. La siguiente figura se realizó a partir de los datos reportados por la ICO [2] para las exportaciones en millones de sacos en los últimos diez años de los mayores productores de café, en ella se observa que a partir del año 2014/15 se han mantenido los puestos de mayores exportadores según lo mencionado con anterioridad:

Figura 1.

Exportaciones en millones de sacos de 60 kg de Brasil, Vietnam, Colombia, Indonesia y Etiopía.

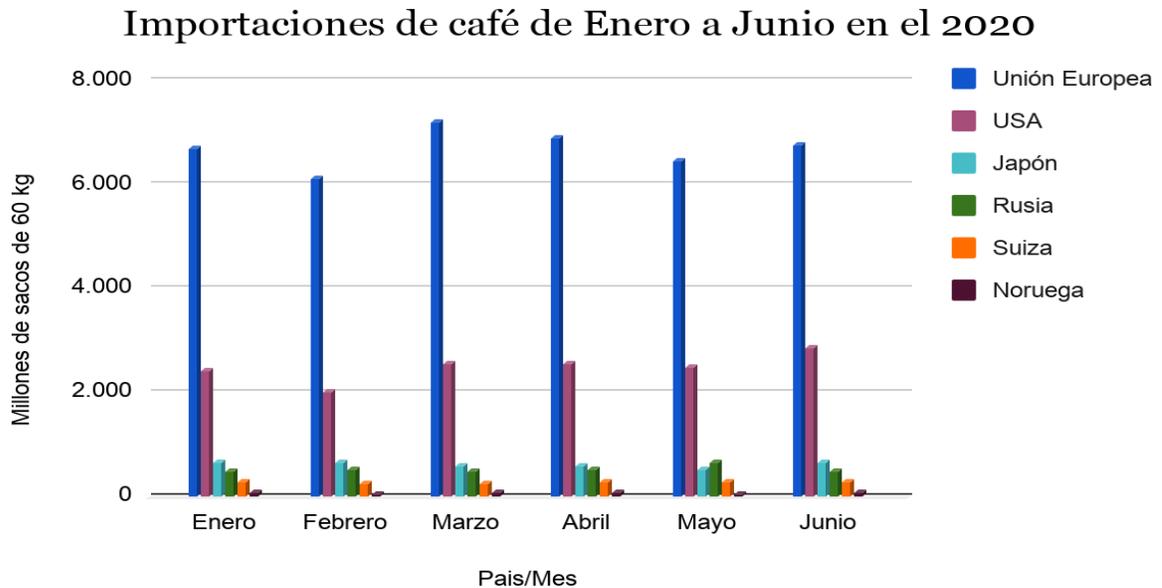


Nota: Gráfico de barras de las exportaciones en millones de sacos de 60 kg a partir de los datos reportados por la ICO para los 5 mayores productores de café en el mundo.

La ICO afirma que las exportaciones mundiales de café ascendieron a 11,11 millones de sacos en febrero de 2020, en comparación con los 10,83 millones en febrero de 2019 [3]. De estas exportaciones la tercera parte son representadas por los países: Brasil, Vietnam y Colombia [4]. Por otro lado, en las últimas décadas Norteamérica y la Unión Europea han aumentado el volumen respectivo de sus importaciones de café, por lo que Estados Unidos ocupa el puesto de mayor importador de café del mundo, seguido de Alemania, Italia, Japón y Francia. [5]. La Figura 2 [6] representa las importaciones del año en curso reportadas por la ICO, donde se evidencia que Estados Unidos ocupa el primer lugar como mayor importador del mundo, pese a que en la gráfica la barra azul representa la Unión Europea que incluye los países como Alemania, Italia y Francia:

Figura 2.

Importaciones en millones de sacos de 60 kg mes a mes en el 2020



Nota: Gráfico de barras de las importaciones en millones de sacos de 60 kg según la información reportada por la ICO.

Según la Federación Nacional de Cafeteros, en Colombia para el 2019 la producción de café fue de 14,8 millones de sacos de 60 kilogramos, un 9 por ciento más que en el 2018. [7] Colombia es el tercer productor de café en volumen de producción, pero sigue manteniendo el primer lugar a nivel mundial como productor de café arábico suave lavado, esta especie le da al país cierto reconocimiento por su exquisitez y calidad, factores que son posibles gracias a sus condiciones climáticas favorables y a su larga tradición en la producción de café.

1.2. Especies y variedades de café

La planta de café o cafeto fue descubierta en el continente africano, específicamente en Etiopía. Los cafetos se cultivan en regiones tropicales y subtropicales y pueden llegar a medir 10 metros de altura, sin embargo, en los cultivos comerciales suelen medir 3 metros. Es posible encontrar la planta de café en tierras altas y montañosas en estado salvaje, dado que requieren lugares muy húmedos con temperaturas estables. Existen varias especies de la planta de café que generan diferentes semillas y granos, pero no todas presentan importancia a nivel económico como las dos principales, la *Coffea canephora* y la *Coffea arábica* que actualmente corresponden al 98% del mercado internacional de café [8], siendo la *C. canephora* una planta que se encuentra en su

mayoría en la costa africana y la *C. arábica* una planta que se encuentra en mayor proporción en América.

En lo referente a la especie *Coffea canephora* (variedad robusta) sus semillas tienen alta resistencia y pueden crecer en una gran variedad de terrenos, lo que facilita su producción y recolección de frutos, esta variedad produce granos con porcentajes de cafeína de 2 a 4.5% [9], con olor y sabor poco agradables, por lo que entre estas dos especies es el tipo de café menos demandado. Por otra parte, la especie *Coffea arábica* fue la primera en ser cultivada y tiene mayor demanda a nivel mundial, dado que representa entre el 70% y el 80% de la producción total mundial del café, esta especie posee un porcentaje de cafeína de 1.1 a 1.7% [9], lo que representa un sabor y olor más agradable que la especie *Coffea canephora*.

En Colombia la especie que se cultiva es la *Coffea arábica*, razón por la que la presente investigación da un único enfoque en esta especie y las variedades de esta que se siembran son: Típica, Borbón, Maragogipe, Tabi, Caturra y Variedad Colombia, estas a su vez se dividen en variedades de porte alto y de porte bajo. En las de porte alto se encuentran la Típica, Borbón, Maragogipe y Tabi y en las de porte bajo la Caturra y la Variedad Colombia [10]. A continuación, se hará una breve descripción de las variedades mencionadas:

1.2.1. Típica

Tiene el cogollo de color bronceado o rojizo, sus hojas son alargadas, es susceptible a la roya, puede crecer hasta los 5 metros y se siembran hasta 2.500 árboles por hectárea.

1.2.2. Borbón

Esta variedad es similar a la Típica, pero tiene mayor número de ramas, sus cogollos son de color verde claro y sus hojas son redondeadas.

1.2.3. Maragogipe

Tiene el cogollo de color verde, es susceptible a la roya y se siembran hasta 2.500 árboles por hectárea.

1.2.4. Tabi

Es una variedad que nace del cruce entre las variedades Típica y Borbón. Es de grano grande, resistente a la roya, tiene las hojas en forma de lanza, es de excelente calidad, por lo que es ideal para la obtención de cafés especiales y se pueden sembrar hasta 3.000 árboles por hectárea.

1.2.5. Caturra

Tiene los cogollos de color verde más claro que el resto de variedades, sus hojas son más

redondas que las de Borbón, es susceptible a la roya, se comporta muy bien en cualquier zona cafetera, se pueden sembrar hasta 10.000 árboles en una hectárea y por su tamaño se facilita la cosecha.

1.2.6. Colombia

Esta variedad es muy similar a la Caturra, pero el cogollo de las plantas es bronceado y tiene resistencia a la roya.

En cuanto a la cosecha, en Colombia “los meses propicios para la siembra del café son aquellos al inicio del periodo de lluvias de la región, lo cual garantiza que el suelo tenga las condiciones de humedad adecuadas y con suficiente almacenamiento para asegurar el establecimiento de las plantas en el campo.” [11]. Los periodos de siembra y cosecha se dividen en las siguientes etapas: germinación, almácigo, plantación, floración, maduración, recolección, beneficio húmedo y secado. Los primeros frutos se obtienen hasta los 18 meses, aunque la cosecha inicial tiene una productividad baja, aumenta progresivamente hasta alcanzar una recolección óptima.

Las condiciones óptimas para el cultivo del café en Colombia son: temperaturas entre los 19 y 21,5 grados centígrados, altitudes entre 1.200 y 1.800 metros sobre el nivel del mar, lluvias entre 1.800 y 2.800 milímetros anuales, climas húmedos y con exposiciones al sol de entre 4,5 y 5,5 horas al día. Por otra parte, las condiciones del suelo también afectan el cultivo, por lo que se requieren suelos oscuros, texturas arenosas o arcillosas, profundidades de hasta 80 cm para las raíces, pH entre 5 y 5,5, además de los componentes nutritivos necesarios y materia orgánica. [12]

“Para obtener un café de alta calidad, el café es cosechado cuando las cerezas están completamente rojas (maduras). Si las cerezas están muy maduras, son difíciles de procesar y resulta un producto de baja calidad. Un período normal de cosecha abarca intervalos de 7 a 14 días.” [13]

1.3. El fruto

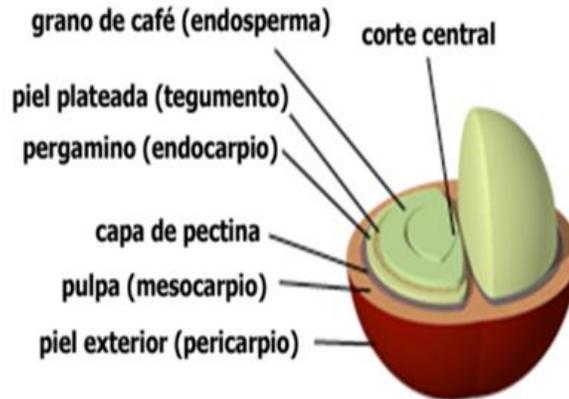
El fruto del café de la especie *Coffea arábica* es ovalado y alargado, con un diámetro de 15 a 20 mm, el cual durante la maduración cambia el color de verde a rojo. Cuando el fruto alcanza el estado de maduración se ve cubierto por una fina piel de color rojo, conocida como el pericarpio, que a su vez cubre al mesocarpio (pulpa de café), este último representa el principal subproducto del beneficio de café.

La descripción del fruto desde su interior hacia su exterior, Figura 3 [13], contiene semillas, conocidas como endosperma, que están cubiertas por una membrana llamada tegumento, este está

protegido por el pergamino o endocarpio que a su vez es cubierto por una capa de pectinas, esta capa está adherida al mesocarpio mucilaginoso y termina rodeado en su totalidad por la piel del fruto (pericarpio). El contenido del fruto del café en su interior es rico en polisacáridos, lípidos, azúcares reductores, polifenoles y cafeína.

Figura 3.

Partes del fruto de los cafetos



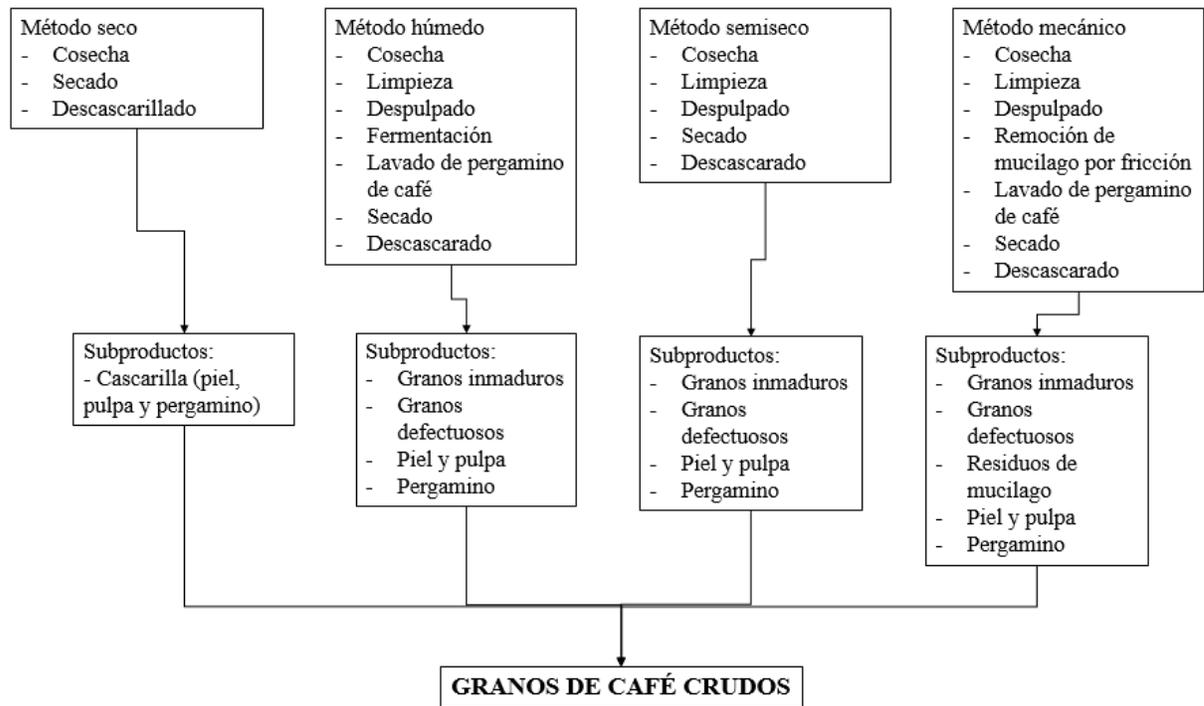
Nota: Descripción gráfica de las partes del fruto del café.

1.4. El beneficio del café

El beneficio del café consiste en la transformación del grano de café en pergamino seco, para su realización existen los siguientes métodos: el beneficio seco, el beneficio húmedo, el beneficio semiseco y el beneficio por vía mecánica. Todos los métodos tienen como etapa inicial la cosecha del grano en la que para garantizar una alta calidad de café lo ideal es recolectar los frutos que estén en su punto óptimo de maduración, sin embargo, no es posible, dado que, aunque la mayoría de los frutos se encuentran perfectamente madurados siempre están mezclados con otros excesivamente maduros o incluso algunos inmaduros. En la Figura 4 [8] se mencionan las etapas y los subproductos generados en cada uno de los diferentes métodos del beneficio del café:

Figura 4.

Métodos del beneficio del café y sus subproductos.



Nota: Etapas de los 4 métodos del beneficio del café y sus subproductos generados.

De los métodos mencionados para la especie *C. arábica* el más utilizado es el beneficio por vía húmeda, donde en “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%)” [14]. La vía húmeda del beneficio del café permite la obtención de café de mayor calidad con mayor valor económico y consiste en remover las envolturas que cubren los granos de café como la pulpa y el mucílago (mesocarpio), pero requiere de una alta demanda de agua y equipamiento técnico específico.

A continuación, se hará una descripción de cada etapa del beneficio húmedo del café, dado que es el procesamiento más beneficioso para la especie *C. arábica* que es la de interés para la investigación:

1.4.1. Selección de frutos

A diferencia de los otros métodos es indispensable realizar la selección de los frutos con la maduración óptima, esta selección puede ser manual o con tanques que funcionan bajo el principio de la gravedad, ya que un fruto maduro presenta una densidad ligeramente mayor que el agua y tiende a depositarse al fondo, mientras que los frutos no madurados o excesivamente madurados

tienden a flotar.

1.4.2. Despulpado

Esta etapa consiste en retirar la pulpa (mesocarpio) o cáscara de las cerezas después de la recolección del fruto mediante el uso de una máquina despulpadora que emplea mecanismos de presión y fricción. “La capa gelatinosa (mucílago) facilita el despulpado, puesto que reduce el número de semillas rotas y la fuerza a aplicar, pero su capacidad de retener agua y sus características resbaladizas pueden afectar las fases que siguen, por lo que debe eliminarse en el proceso de fermentación.” [8]

Existen dos tipos de despulpado, sin agua y recirculando el agua, en Colombia se utiliza el despulpado seco, sin agua, aprovechando la gravedad, esta práctica se implementó debido a que “estudios de Cenicafé, han comprobado que se puede despulpar el café sin agua, sin afectar la capacidad del proceso y la calidad de los granos” [15]. Esta práctica disminuye la contaminación en aguas y el tiempo de fermentación, conserva la pulpa en forma natural y debe cumplir con los requisitos establecidos en la norma técnica NTC 2090 que fija los criterios de calidad como se muestra en la Tabla 1 [16]

Tabla 1.

Norma Técnica NTC 2090

Criterio De Calidad	Valor Máximo
Pulpa en el café despulpado	Menor al 2%
Granos sin despulpar	Menor al 1%
Granos mordidos	Menor al 0,5%
Granos trillados	Menor al 0,5%

Nota: Criterios de calidad después del despulpado en el beneficio húmedo del café.

1.4.3. Remoción del mucílago

Este proceso tiene como fin desprender el mucílago del pergamino y se puede realizar por fermentación natural o remoción mecánica.

La fermentación es la vía biológica en la que las reacciones bioquímicas toman lugar y el mucílago se degrada por acción de los microorganismos, durante este proceso la temperatura aumenta y se favorece la acción enzimática de las pectinasas debido a que se fermentan los azúcares de la pulpa residual que no se extrajo en la etapa anterior. En este proceso existen factores

controlables y no controlables, siendo los primeros: el grado de madurez, el tiempo de fermentación (24 a 72 h), lavado del café, volumen a procesar y el diseño de los tanques, y los no controlables: la temperatura de la masa del café y la temperatura ambiente.

Por otro lado, la remoción mecánica hace el uso de un desmucilagador mecánico para desprender el mucílago por fricción, donde se conserva la calidad del café, se disminuye el espacio de infraestructura, se gana peso en materia seca del grano (1.5%) [15] y el residuo se obtiene en menor tiempo.

1.4.4. Lavado

Esta etapa consiste en remover las impurezas generadas tales como: pedazos de pulpa, pergamino solos, granos secos, entre otros. Para ello en canales de concreto o madera con compuertas y caudales se realiza una clasificación hídrica del grano. Sin embargo, existe otra forma de lavar y clasificar el café en la que se usan los tanques de fermentación y consiste en cubrir en su totalidad el café con mucílago fermentado con agua y revolver la masa. En esta etapa el consumo de agua es muy elevado, alrededor de 20 litros por kilogramo de café pergamino seco, debido a que el agua utilizada debe estar en perfectas condiciones de limpieza.

1.4.5. Secado

En esta etapa ingresa el café pergamino húmedo y se pretende evaporar el agua para reducir la humedad del café del 54% al 10-12% [16], se puede llevar a cabo en máquinas secadoras o en contacto directo con el sol y el viento. Esta etapa garantiza la calidad final del grano de café puesto que evita que los hongos y las bacterias ataquen el grano.

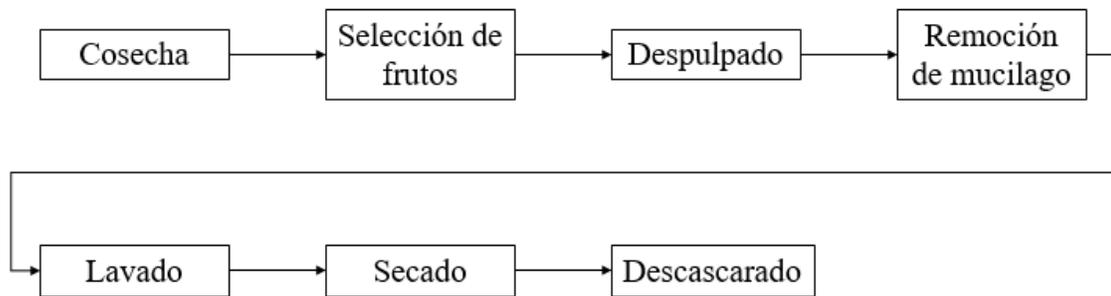
1.4.6. Descascarado

Esta etapa es opcional y tiene como fin eliminar la piel del pergamino seco del grano de café.

La Figura 5 representa el diagrama de bloques para el procesamiento del café por medio del beneficio húmedo:

Figura 5.

Diagrama de bloques del beneficio húmedo



Nota: Etapas del método más usado para la especie *C. arábica*.

1.5. Residuos del beneficio de café

En los últimos años se ha generado la necesidad de transformar la economía actual, que consiste en un proceso lineal de producir, consumir y desechar, debido a que el impacto ambiental está alcanzando un punto de no retorno, es por ello que se han estado desarrollando estrategias que contribuyan a llevar la economía mundial hacia la productividad, efectividad y sostenibilidad aplicable en los procesos industriales.

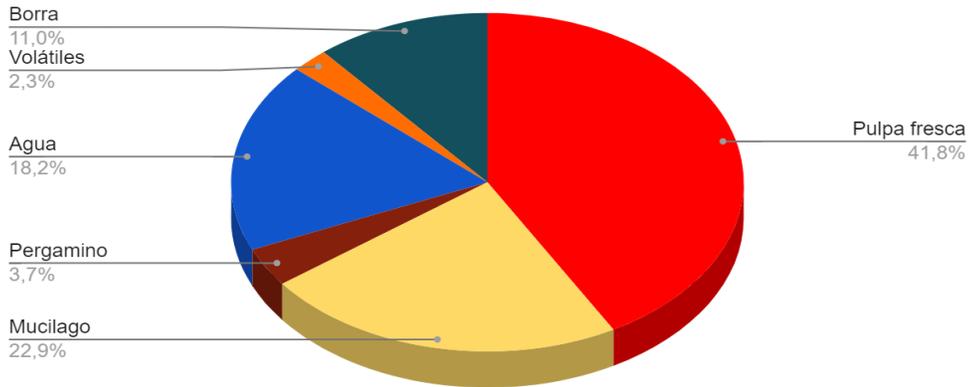
En la agroindustria se generan un sin fin de residuos que al ser desaprovechados se convierten en contaminación de los recursos naturales, en la industria cafetera se generan diversos residuos tales como: la pulpa, el mucílago, el pergamino y la borra, es por esto que se pretende reducir los desechos convirtiéndolos en productos reutilizables y con valor agregado permitiendo cerrar el ciclo de producción del café y mantener un flujo constante de los recursos naturales. Lo anterior implica generar conciencia global sobre el cuidado del medio ambiente en cada persona sin que esta sea influida por intereses netamente económicos.

En la industria cafetera la mayor parte de biomasa de la planta de café se considera desperdicio, dado que “solamente se utiliza el 9,5% del peso del fruto fresco en la preparación de la bebida, el 90,5% queda en forma de residuos” [17], estos se generan durante los diferentes procesos del beneficio de café de mayor a menor proporción de la siguiente forma: en el despulpado se obtiene la pulpa fresca, en el desmucilaginado el mucílago, en la trilla el pergamino, en el secado el agua, en la torrefacción los residuos volátiles y por último en la preparación de la bebida la borra. La Figura 6 [17] representa el porcentaje por residuo obtenido en los procesos que conforman el beneficio y la industrialización por cada kilogramo de frutos de café:

Figura 6.

Porcentaje de cada residuo producido después del beneficio de café de 1 kg de frutos.

Residuos generados en el beneficio del café de 1 kg de frutos.



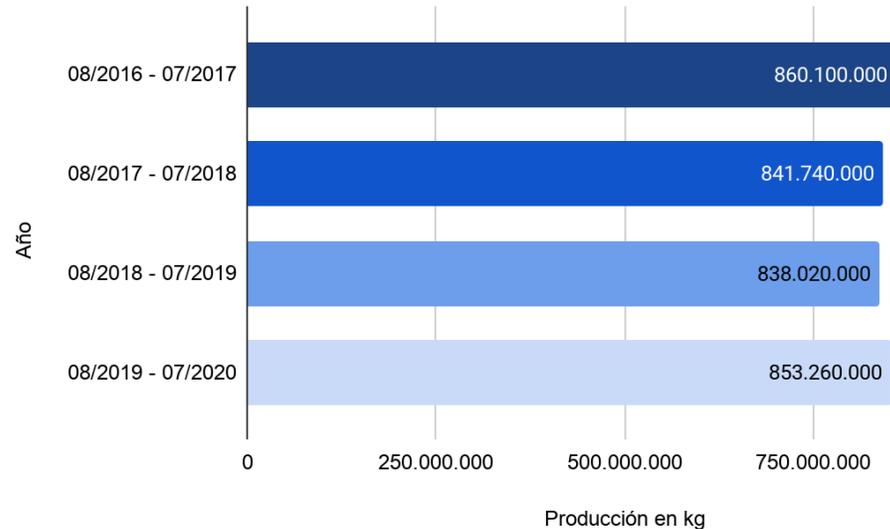
Nota: Gráfica circular de los residuos del proceso del beneficio e industrialización del café según datos reportados.

Partiendo de los datos reportados por la Federación Nacional de Cafeteros de Colombia se realizó la Figura 7 [18], que permite observar la producción anual en el país iniciando el primer año de agosto de 2016 a julio de 2017 y finalizando en agosto de 2019 a julio de 2020, cabe resaltar que los datos reportados están en miles de sacos de 60 kg y en la gráfica se establecen los kg totales.

Figura 7.

Producción anual de café en Colombia

Producción anual de café en Colombia



Nota: Gráfica de barras de la producción de café en kg de los últimos 4 años en Colombia según datos reportados por la Federación Nacional de Cafeteros de Colombia.

Con respecto a los porcentajes mencionados con anterioridad para la generación de residuos en el procesamiento de 1 kg de fruto de café, se supone que los valores establecidos en la gráfica de “Producción anual de café en Colombia” corresponden al 9,5% del fruto fresco destinado a la preparación de la bebida y el 90,5% [17] restante hace referencia a los residuos generados aproximadamente en el país con respecto a los mismos años como se especifica en la Tabla 2:

Tabla 2.

Producción de residuos de la industria cafetera en Colombia

Año	Residuos (kg)
08/2016 - 07/2017	8.193.584.210,53
08/2017 - 07/2018	8.018.681.052,63
08/2018 - 07/2019	7.983.243.157,89
08/2019 - 07/2020	8.128.424.210,53

Nota: Producción del total de residuos generados en los últimos 4 años en el país.

De acuerdo con los datos calculados en la Tabla 2 se evidencia que la cantidad de residuos generados en la caficultura es excesiva, por lo que se ha generado mayor interés en los últimos años por transformarlos en subproductos con valor agregado, dicho esto y según las investigaciones existentes estos residuos pueden contribuir en la producción de diversos productos tales como: compostaje, hongos comestibles y medicinales, alimentación animal, combustibles y biomasa microbiana.

“La utilización de los residuos del café está determinada por una serie de factores tales como: las cantidades producidas, su distribución temporal y regional, el contenido de humedad, el almacenamiento y la preservación, la importancia comercial de los productos obtenidos y la capacidad de competencia con otros materiales.” [17]

Para concluir este capítulo es conveniente mencionar que siendo el café un producto con gran importancia desde el punto de vista económico, aún la naturaleza cíclica del mercado constituye un reto para los agricultores y los países productores, por ende es importante realizar una investigación que genere un impacto directo en la caficultura y para ello se propone aprovechar el residuo sólido con mayor proporción que se produce en el beneficio del café, la pulpa, subproducto que genera una alta contaminación ambiental al ser arrojado a las fuentes hídricas o abandonado a cielo abierto sin tratamiento alguno. En el siguiente capítulo se hará énfasis en la composición química de la pulpa de café residual ya que su aprovechamiento contribuirá en el logro de los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) de las Naciones Unidas, destacando los objetivos 12, la producción y el consumo responsable y 13, la acción por el clima.

2. ANÁLISIS BIBLIOGRÁFICO DEL CONTENIDO DE POLISACÁRIDOS EN LA PULPA DE CAFÉ RESIDUAL

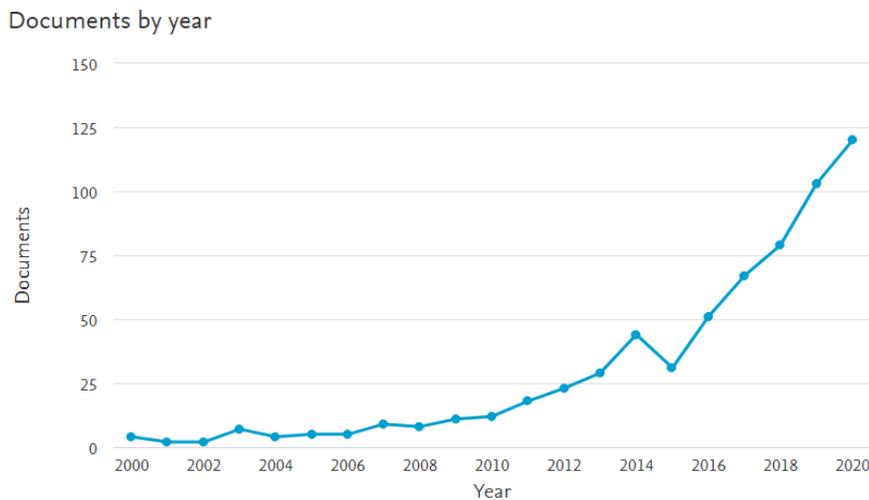
En vista de que la pulpa de café residual representa el mayor porcentaje entre los subproductos generados en el beneficio húmedo del café, aproximadamente el 42%, se decidió investigar el contenido de este subproducto con el fin de generar un valor agregado en la industria cafetera. Por consiguiente, en el presente capítulo se realizan dos análisis bibliométricos y se exhibe la composición química de la pulpa establecida por diferentes autores para la especie *Coffea arábica*, resaltando el contenido de polisacáridos como la pectina, la celulosa y la hemicelulosa.

2.1. Aprovechamiento de los residuos del café

A fin de cumplir el primer objetivo se optó por realizar un análisis bibliométrico general en el que se observa el número de publicaciones disponibles en la base de datos de Scopus y se analizó a partir del motor de búsqueda: “wastes AND coffee AND production”, la Figura 8 [19] representa los datos obtenidos para los últimos 20 años:

Figura 8.

Documentos publicados por año en la base de datos de Scopus para los residuos de café



Nota: Gráfica de dispersión generada por la base de datos de Scopus.

En la figura anterior se aprecia un mínimo interés en los residuos generados en la caficultura para el periodo de tiempo entre el 2000 al 2010, dado que el promedio anual no supera las 6 publicaciones, sin embargo, en la última década el interés creció exponencialmente, lo que es relevante para la presente investigación.

A partir del motor de búsqueda empleado anteriormente se obtuvo la cantidad de publicaciones por año en la última década y se realizaron dos análisis, en el primero se establecen las publicaciones que hacen referencia al aprovechamiento de los residuos de café en todo el ciclo de vida del producto, es decir desde la cosecha hasta el consumo de la bebida y en el segundo las publicaciones que se centran en el aprovechamiento de la pulpa de café, los resultados se muestran en la Tabla 3:

Tabla 3.

Recopilación de datos para el motor de búsqueda “wastes AND coffee AND production” en Scopus

Año	# Publicaciones con el motor de búsqueda	# Publicaciones de residuos de café	# Publicaciones de la pulpa de café residual
2011	18	9	2
2012	23	8	1
2013	29	16	0
2014	44	21	4
2015	31	17	1
2016	51	28	5
2017	67	38	3
2018	79	40	2
2019	103	56	11
2020	121	74	6
	566	307	35

Nota: Tabla elaborada a partir del conteo de las publicaciones por año del aprovechamiento de residuos y más específicamente de la pulpa en la base de datos Scopus.

De la tabla anterior se puede inferir que del total de publicaciones en la última década solo el 54,24 % se refiere al aprovechamiento de los residuos de la industria cafetera y solo el 6,18 % investiga la pulpa de café como producto de utilidad, adicionalmente cabe resaltar que el año 2019 presentó el mayor número de publicaciones con interés en la pulpa de café.

2.2. Pulpa de café residual

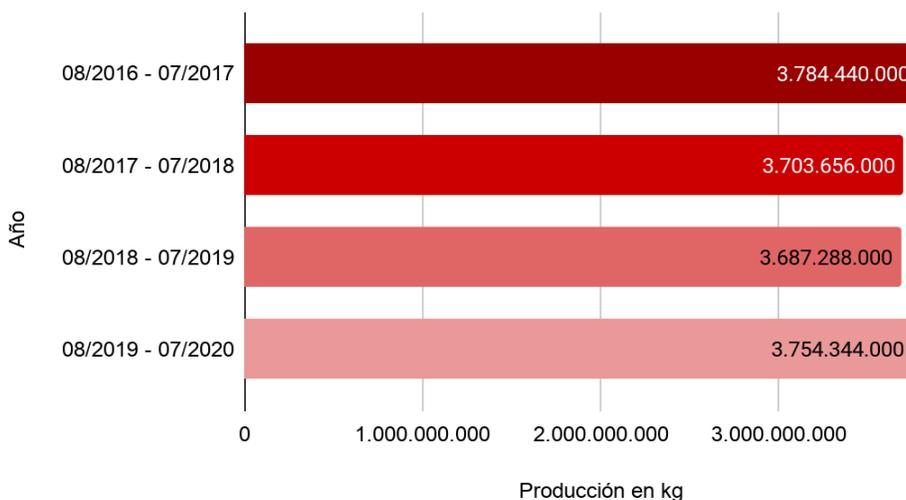
La pulpa es un material fibroso y mucilaginoso que se obtiene como primer subproducto del

procesamiento o beneficio húmedo del grano, constituye alrededor del 42% del peso del fruto fresco. Es el subproducto más voluminoso del beneficio, ya que por cada dos toneladas de café se produce alrededor de una tonelada de pulpa [20] y su inadecuada disposición genera la mayor fuente de contaminación ambiental en la zona cafetera. La Figura 9 hace referencia a la cantidad de pulpa de café residual generada anualmente en Colombia en los últimos 4 años, los datos se calcularon a partir de la producción anual de café en Colombia y en el porcentaje de cada residuo producido después del beneficio de café de 1 kg de frutos indicados en la Figura 6 y 7.

Figura 9.

Producción de pulpa de café residual en Colombia

Producción de pulpa de café residual en Colombia



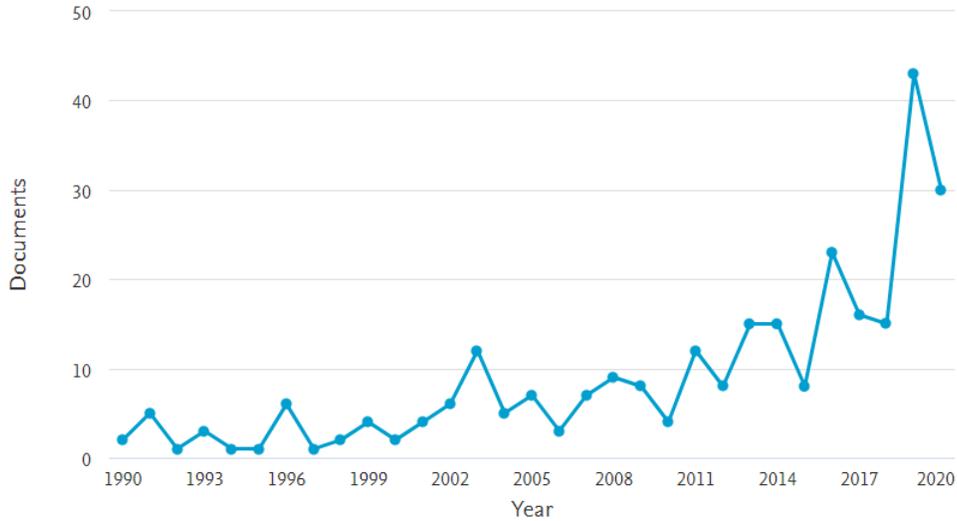
Nota: Gráfica de barras de la producción en kg de pulpa de café residual en Colombia en los últimos 4 años.

Por consiguiente, las investigaciones de la pulpa de café residual han cobrado gran importancia, puesto que se pretende generar aportes mediante la caficultura que contribuyan en el desarrollo de una economía circular y disminuyan el impacto ambiental, dando así un valor agregado a la pulpa de café a través de su alto potencial en las diversas aplicaciones.

Con el fin de dar un fundamento a la afirmación anterior se realizó un segundo análisis bibliométrico que se enfoca en las publicaciones disponibles en la base de datos de Scopus relacionados con el aprovechamiento de la pulpa de café residual que aporten a la investigación, para esto se consideraron diferentes motores de búsqueda, pero se eligió “coffee pulp”, dado que presentaba resultados más concretos, la Figura 10 [19] representa los datos obtenidos del número de publicaciones en el periodo de tiempo de 1990 al 2020:

Figura 10.

Documentos publicados por año en la base de datos de Scopus para la pulpa de café



Nota: Gráfica de dispersión generada por la base de datos de Scopus.

La figura anterior demuestra cierta variación en el interés por la pulpa de café como producto de utilidad a través de los años, siendo un promedio aproximado de 9 publicaciones anuales para el periodo de tiempo entre 1990 al 2020 en la base de datos empleada y da evidencia de que a pesar de que la pulpa es el principal subproducto en la industria cafetera aún no existe el suficiente interés en su estudio y queda un amplio campo por investigar.

La Tabla 4 representa el análisis de los datos recopilados para los últimos 10 años con el motor de búsqueda seleccionado con el fin de observar el número de publicaciones que tienen relación con el tema de interés para la investigación.

Tabla 4.

Recopilación de datos para el motor de búsqueda “coffee pulp” en Scopus

Año	# Publicaciones con el motor de búsqueda	# Publicaciones entorno a la obtención de bioproductos a partir de la pulpa
2011	12	6
2012	8	1
2013	15	6
2014	15	5
2015	8	1
2016	23	5
2017	16	3
2018	15	6
2019	43	15
2020	30	10
	185	58

Nota: Tabla elaborada a partir del conteo de las publicaciones por año que pueden aportar a la investigación en la base de datos Scopus.

De la tabla anterior se puede deducir que del total de publicaciones en los últimos 10 años solo el 31,35% investiga el potencial del aprovechamiento de la pulpa de café residual y cabe mencionar que en los dos últimos años se presenta el mayor número de publicaciones con relación al tema.

2.3. Composición química de la pulpa de café residual

Con el fin de comprender el potencial de los compuestos presentes en la pulpa de café para la generación de diferentes bioproductos se realizó una revisión bibliográfica sobre la composición química de la misma, donde se encontró que algunos de los compuestos presentes son: azúcares reductores y no reductores, taninos, sustancias pécticas, cafeína, ácido clorogénico, ácido cafeico, materias orgánicas, fenoles totales, fibras, proteína cruda, hemicelulosa, celulosa, lignina, entre otros.

A continuación, se presenta la Tabla 5 que tiene como propósito recopilar los datos reportados por diferentes autores y para esta se seleccionaron los compuestos presentados con mayor frecuencia en las publicaciones

Tabla 5.

Composición química de la pulpa de café según diferentes autores

Autores	Caracterización							
	Proteínas (%)	Taninos (%)	Sustancias pécticas (%)	Celulosa (%)	Hemicelulosa (%)	Lignina (%)	Cafeína (%)	Azúcares reductores (%)
J. Rubio y J. Pineda, 1973 [21]	11,25	-	-	29,51	4,63	16,85	-	-
J. Braham y R. Bressani, 1978 [22]	10,1	1,80 - 8,56	6,5	17,7	2,3	17,5	-	-
O. Días, 2009 [23]	-	3,7	-	29,51	4,63	16,85	0,60 - 0,75	4,63
P. Murthy y M. Madhava, 2011 [24]	11,5 ± 2,0	3,0 ± 5,0	6,5 ± 1,0	63,0 ± 2,5	2,3 ± 1,0	17,5 ± 2,2	1,5 ± 1,0	-
G. Corro, L. Paniagua, U. Pal, F. Bañuelos y M. Rosas, 2013 [25]	11,5	1,80 - 8,56	6,5	63	2,3	17	1,3	12,4
T. Widjaja, T. Iswantoa, A. Altwaya, M. Shovitrib y S. Rachmania, 2017 [26]	0,81	3,11	2,16	58,36	21,8	5,05	0,91	-
N. Fierro, A. Contreras, O. González, E. Rosas y V. Morales, 2018 [20]	10,63	-	-	-	-	-	2,262	45,67
R. Hendroko et al., 2018 [27]	11	-	-	25,84	4,37	12,46	-	-
R. Rodríguez, J. Laencina y J. García, 2020 [28]	9,4	-	20,5	35,6	9,2	-	1,4	5,4

Nota: Recopilación de diferentes parámetros de la composición química de la pulpa de café residual reportados por 9 publicaciones distintas.

En razón de lo expuesto en la Tabla 5 se observa que en los datos reportados en las 9 publicaciones recopiladas existe cierta discrepancia en los valores de cada parámetro considerado y se resalta que el porcentaje de azúcares presentes en la pulpa de café residual es significativo, como por ejemplo de polisacáridos (pectina, celulosa y hemicelulosa).

2.4. Contenido de polisacáridos

La presente investigación está basada en la pulpa de café residual y en sus posibles aplicaciones, en ella el término polisacárido toma importancia, dado que es el componente que aportará los azúcares que permiten dar a la pulpa un valor agregado y una solución viable en el desarrollo de bioproductos basados en el uso sostenible del capital natural.

Los polisacáridos 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, estos cumplen funciones relacionadas con las reservas energéticas y estructurales. Los polisacáridos pueden incluirse dentro del grupo de los hidratos de carbono, que también son conocidos como carbohidratos o glúcidos, por ende, contienen carbono, hidrógeno y oxígeno y tienen la fórmula general $C_x(H_2O)_y$. Entre sus características se puede resaltar que son macromoléculas que tienen un peso molecular elevado, no son dulces, no cristalizan, algunos son altamente solubles en agua y otros no, dependiendo de la presencia de ramificaciones en su estructura pueden ser insolubles o formar dispersiones coloidales, no poseen carácter reductor y se polimerizan en enlaces alfa y beta. [29]

Las biomoléculas o polisacáridos según su función biológica se dividen en dos grupos, el primero desempeña la función de almacenar azúcares, lo que representa la reserva energética de animales y vegetales (glucógeno, inulina y almidón) y el segundo cumple una función estructural, que son los que constituyen la estructura celular y les confieren rigidez a los tejidos (celulosa, pectinas y gomas). Adicionalmente estos compuestos se pueden clasificar de acuerdo a sus características estructurales, lineales o ramificados, y a su composición, homopolisacáridos o heteropolisacáridos.

Los homopolisacáridos están formados por un solo tipo de monosacáridos, es decir por unidades de azúcares idénticas. Se clasifican según el enlace químico presente, la primera clasificación es simple, lineal y los azúcares están unidos mediante el mismo tipo de enlace, mientras que la segunda clasificación es compleja, puede contener ramificaciones y tiene más de un tipo de enlace dentro de la cadena lineal.

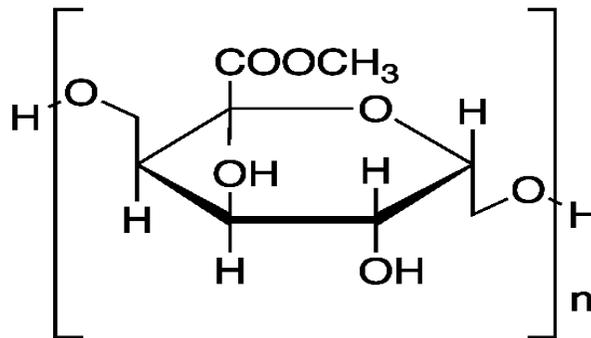
Los heteropolisacáridos son polímeros que están formados a partir de más de un tipo de monosacáridos, es decir que son heteropolímeros de azúcares distintos como, por ejemplo, la hemicelulosa, el agar-agar y las gomas. Los más sencillos se conforman por dos residuos de azúcares diferentes, que pueden estar en la misma cadena lineal o estar uno formando una cadena lineal principal y el otro constituyendo cadenas laterales o en cadenas altamente ramificadas.

2.4.1. Pectina

La pectina es un heteropolisacárido complejo, constituido principalmente por ácido poligalacturónico, parcialmente metilado con alcohol etílico y asociado con azúcares, hemicelulosa, calcio y magnesio. Las pectinas en presencia de agua forman geles y al suministrarles calor se disuelven en moléculas de agua luego de separarse de las paredes celulares, en su formación están involucradas tres estructuras que son: la estructura formada por homogalacturanos, la estructura formada por xilogalacturanos y la estructura formada por ramnogalacturonanos. En la Figura 11 [30] se puede observar la unidad básica de la pectina.

Figura 11.

Estructura de la Pectina



Nota: Descripción gráfica de la estructura de la pectina, se observa la unidad básica de la pectina: el ácido galacturónico esterificado a un grupo metilo.

La pectina se puede clasificar en base a su grado de metoxilación (DM), éste influencia las propiedades de la misma, en particular la solubilidad y las condiciones de gelatinización. Las pectinas de alto metoxilo (HM) son producida según un proceso de extracción normal, contienen más del 50% de los grupos metoxilos y pueden formar un gel en sistemas acuosos con elevado contenido de sólidos solubles y bajos valores de pH, mientras que las pectinas de bajo metoxilo

(LM) se forman cuando se realizan variaciones en el proceso productivo o se hace un tratamiento ácido prolongado, estas contienen menos del 50% de los grupos metoxilos y se caracterizan por la capacidad de formar un gel solo en presencia de una sal polivalente o en sistemas con valores bajos de sólidos solubles y un rango de pH muy amplio. [31]

Mediante una revisión bibliográfica se encontraron los contenidos de pectina en la pulpa de café residual, a continuación, en la Tabla 6 se presentan los resultados obtenidos por diferentes autores:

Tabla 6.

Recopilación de datos del contenido de pectina en la pulpa de café

Autores	Título de la publicación	Año	% de Pectina
H, Calle	Pectinas [32]	1977	6,52
J. Braham y R. Bressani	La pulpa de café: usos, composición y tecnología. [22]	1978	6,5
D. Arriola y R. Garcia	Caracterización química de la pectina obtenida de desechos del beneficiado de café [33]	1985	13,1
P. Murthy y M. Madhava	Sustainable management of coffee industry by-products and value addition a review [24]	2012	6,5±1
M. Serrat, A. De la Fé, J. De la Fé y C. Monteros	Extracción y caracterización de pectina de pulpa de café de la variedad Robusta [34]	2018	5,5 - 6,5
R. Rodríguez, J. Laencina y J. García	Evaluation of coffee pulp as substrate for polygalacturonase production in solid state fermentation [28]	2020	20,5

Nota: Tabla de los resultados reportados por diferentes autores del contenido de pectina en la pulpa de café para la especie *C. arábica*.

En razón a lo expuesto anteriormente se observa que el contenido de pectina presente en la pulpa de café reportado por diferentes autores a lo largo de los años no presenta una variación superior al $\pm 0,7\%$, sin embargo, en los años 1985 y 2020 se reportan valores de 13,1% y 20,5% respectivamente, es decir que difieren significativamente con respecto a los demás valores. Se

deduce que la divergencia de los datos para una misma especie se presenta por las condiciones de la pulpa en el momento de la caracterización y extracción de la pectina, por ejemplo, el cultivo, el tiempo previo a la caracterización, el secado y el tipo de extracción.

Acorde con lo anterior y conociendo que las mayores fuentes de pectinas industriales provienen de las manzanas y los cítricos que contienen 1,5% y 3% de sustancias pécticas respectivamente [32], se evidencia el potencial de la pulpa de café residual como fuente en la producción de estas sustancias, debido a que presenta un porcentaje superior a las fuentes industriales.

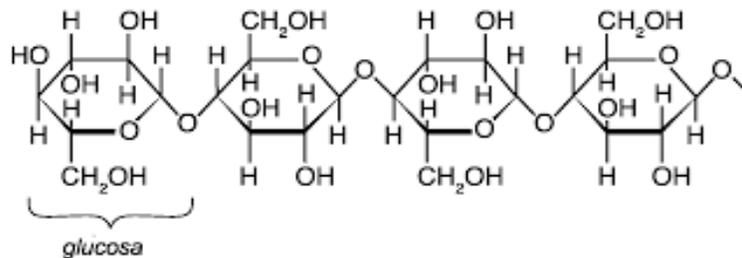
2.4.2. Celulosa

La celulosa es un biopolímero, es decir que tiene una cadena larga de hidratos de carbono, es un homopolisacárido simple compuesto exclusivamente por moléculas de sacáridos, específicamente de glucosas, unidas por enlaces β (1 \rightarrow 4) formando una cadena lineal sin ramificar larga y compacta, sus cadenas se unen por medio de puentes de hidrógeno para formar regiones cristalinas, fuertes y rígidas.

Es un polisacárido estructural de los vegetales y se encuentra formando la pared de las células, estas paredes están compuestas de muchas capas de microfibrillas, hebras largas y delgadas de celulosa conectadas, que a su vez están envueltas alrededor de un centro abierto llamado lumen, en la Figura 12 [35] se observa su estructura. La celulosa es la biomolécula más abundante del planeta, es insoluble en agua, alcohol y éter y se describe generalmente con la fórmula química $(C_6H_{10}O_5)_n$, donde n es el grado de polimerización de la glucosa.

Figura 12.

Estructura de la Celulosa



Nota: Descripción gráfica de la estructura de la celulosa y cómo se compone por varias moléculas de glucosa.

A partir de una revisión bibliográfica se obtuvo el contenido de celulosa en la pulpa de café registrado por diferentes autores como se muestra a continuación en la Tabla 7:

Tabla 7.

Recopilación de datos del contenido de celulosa en la pulpa de café

Autores	Título de la publicación	Año	% de Celulosa
J. Rubio y J. Pineda	Composición química y digestibilidad in vitro de la pulpa de café. [21]	1973	29,51
J. Braham y R. Bressani	La pulpa de café: usos, composición y tecnología [22]	1978	17,7
O. Días	“Productos Krofal” [23]	2009	29,51
N. Rodríguez	Experiencias recientes en el uso de los subproductos del café. [36]	2011	17,7
P. Murthy y M. Madhava	Sustainable management of coffee industry by-products and value addition a review [24]	2011	63 ± 2,5
T. Widjaja, T. Iswantoa, A. Altwaya, M. Shovitrib y S. Rachmania	Methane Production from Coffee Pulp by Microorganism of Rumen Fluid and Cow Dung in Co-digestion [26]	2017	58,36
R. Hendroko et al.	Characterisation of Arabica Coffee Pulp - Hay from Kintamani - Bali as Prospective Biogas Feedstock [27]	2018	25,84
R. Rodríguez, J. Laencina y J. García	Evaluation of coffee pulp as substrate for polygalacturonase production in solid state fermentation [28]	2020	35,6

Nota: Tabla de los resultados reportados por diferentes autores del contenido de celulosa en la pulpa de café para la especie *C. arábica*.

En la Tabla 7 se observa que los porcentajes de celulosa reportados no presentan similitud, puesto que se pueden encontrar valores dentro un amplio rango (17.7% - 35.6%) y estos difieren según las condiciones de la pulpa, por ejemplo J. Rubio y J. Pineda reportan valores de 29,51%, 29,66% y 33,42% para la pulpa fresca, ensilada y descompuesta respectivamente [21]. Adicionalmente en el año 2011 y 2017 el contenido de celulosa reportado fue de 63 ± 2,5% y

58,36% respectivamente, datos que comparados con los anteriores presentan una desviación elevada, esto puede ser consecuencia de que en la investigación se consideraron los porcentajes de celulosa alfa, beta y gamma en un solo valor, es decir que no solo se tuvo en cuenta la celulosa, sino se consideran también la celulosa degradada, los restos de hemicelulosa, la lignina y las cenizas.

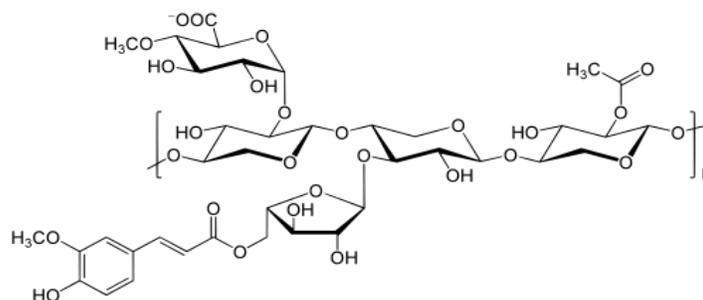
2.4.3. Hemicelulosa

La hemicelulosa es un heteropolisacárido que se constituye por cadenas cortas y ramificadas de azúcares, está compuesta principalmente de hexosas y pentosas, así como de ácidos urónicos y desoxi hexosas. Tiene como función dentro de la pared celular almacenar las sustancias de reserva y servir de interfase entre la lignina y la celulosa, además tiene funciones reguladoras, estructurales y de control en la expansión celular. La hemicelulosa está compuesta por esqueletos glucanos unidos por enlaces β -1,4 que pueden interactuar entre sí y con las fibras de celulosa a través de sus puentes de hidrógeno por medio de interacciones no covalentes. Se pueden clasificar según los monómeros de la cadena principal y sus ramificaciones, de estas últimas se determina su carácter amorfo y su facilidad de hidrolizar. Existen dos tipos principales de hemicelulosas: los xilanos y los glucomananos. [37]

“La hemicelulosa tiene diversas propiedades como: biodegradabilidad, biocompatibilidad, bioactividad, entre otras, por lo cual se emplea en diferentes áreas como la industria alimenticia, en la medicina, para la producción de energía, en la industria química, en materiales poliméricos, biosurfactantes, y como aditivo en la producción del papel, entre otros.” [38]. Actualmente está siendo investigada potencialmente para la producción de biocombustibles, puesto que la hemicelulosa representa aproximadamente más de un tercio del peso seco de las células vegetales. En la siguiente figura [39] se puede observar la estructura de la hemicelulosa:

Figura 13.

Estructura de la Hemicelulosa



Nota: Descripción gráfica de la estructura del Xilano, tipo de hemicelulosa.

Por medio de una revisión bibliográfica se verificaron las composiciones de hemicelulosa en la pulpa de café, según distintos autores como se muestra a continuación:

Tabla 8.

Recopilación de datos del contenido de hemicelulosa en la pulpa de café

Autores	Título de la publicación	Año	% de Hemicelulosa
J. Rubio y J. Pineda	Composición química y digestibilidad in vitro de la pulpa de café. [21]	1973	4,63
J. Braham y R. Bressani	La pulpa de café: usos, composición y tecnología [22]	1978	2,3
O. Días	“Productos Krofal” [23]	2009	4,63
P. Murthy y M. Madhava	Sustainable management of coffee industry by-products and value addition a review [24]	2011	2,3 ± 1,0
R. Hendroko et al.	Characterisation of Arabica Coffee Pulp - Hay from Kintamani - Bali as Prospective Biogas Feedstock [27]	2018	4,37
R. Rodríguez, J. Laencina y J. García	Evaluation of coffee pulp as substrate for polygalacturonase production in solid state fermentation [28]	2020	9,2

Nota: Tabla de los resultados reportados por diferentes autores del contenido de hemicelulosa en la pulpa de café para la especie *C. arábica*.

En la Tabla 8 se observa que los contenidos de hemicelulosa en la pulpa de café no presentan gran variación y se encuentran en un rango de 2,3% a 9,2%, sin embargo, como ya se mencionó existen ciertos parámetros que pueden afectar los resultados analizados en una misma especie, como ejemplo de lo anterior los autores J. Rubio y J. Pineda expusieron en su estudio valores de 4,63%, 1,75% y 6,80% para la pulpa fresca, ensilada y descompuesta respectivamente [21].

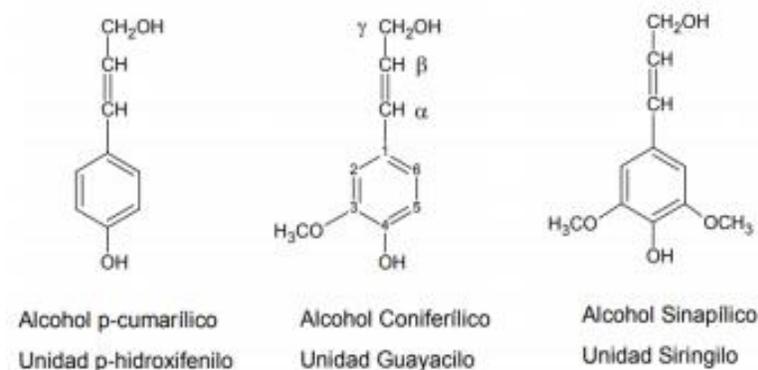
2.4.4. Lignina

La lignina es un polímero natural, amorfo y tridimensional de naturaleza aromática abundante en las plantas, puesto que conforma la pared celular de las mismas junto con la celulosa y la hemicelulosa, además les aporta rigidez a los tejidos vegetales, las protege de la radiación ultravioleta y de los microorganismos, les permite el transporte de agua, nutrientes y sales minerales. Es importante destacar que la lignina no es una fuente de azúcares, porque no es un polisacárido, pero está ligada a ellos y por sus propiedades químicas y estructurales es un compuesto difícil de romper y retirar.

De este polímero natural se pueden extraer compuestos aromáticos, por ejemplo “la hidrólisis y la oxidación de la lignina a altas presiones y temperaturas producen compuestos de bajo peso molecular, estos compuestos representan una variedad de productos químicos de alto valor añadido; siendo los más importantes un grupo de compuestos fenólicos, entre los que destacan: vainillina, resoles, catecoles, guayacol, etc.” [40]. A continuación, en la Figura 14 [41] se muestran algunos compuestos que se encargan de formar la lignina:

Figura 14.

Precursores de la estructura de la Lignina



Nota: Descripción gráfica de los precursores que forman la lignina.

Por medio de una revisión bibliográfica se verificó el contenido de lignina en la pulpa de café, según distintos autores como se muestra a continuación en la Tabla 9:

Tabla 9.

Recopilación de datos del contenido de lignina en la pulpa de café

Autores	Título de la publicación	Año	% de Lignina
J. Rubio y J. Pineda	Composición química y digestibilidad in vitro de la pulpa de café. [21]	1973	16,85
J. Braham y R. Bressani	La pulpa de café: usos, composición y tecnología [22]	1978	17,5
O. Días	“Productos Krofal” [23]	2009	16,85
P. Murthy y M. Madhava	Sustainable management of coffee industry by-products and value addition a review [24]	2011	17,5 ± 2,2
R. Hendroko et al.	Characterisation of Arabica Coffee Pulp - Hay from Kintamani - Bali as Prospective Biogas Feedstock [27]	2018	12,46

Nota: Tabla de los resultados reportados por diferentes autores del contenido de lignina en la pulpa de café para la especie *C. arábica*.

En la Tabla 9 se observa que los contenidos de lignina en la pulpa de café presentan variaciones mínimas, siendo que se encuentran en un rango de 12,46% a 17,5%, esto se debe al estado de la pulpa de café en el momento de la caracterización, por ejemplo, los autores J. Rubio y J. Pineda exponen contenidos de lignina de 16,85%, 13,96% y 28,27% para la pulpa fresca, ensilada y descompuesta respectivamente [21].

Finalmente, después de realizar la caracterización química bibliográficamente se observó que de la pulpa de café residual se pueden extraer azúcares, dado que contienen valores significativos de polisacáridos tales como: pectina, celulosa y hemicelulosa. Por lo anterior el siguiente capítulo pretende determinar las técnicas de obtención de estos azúcares mediante una búsqueda bibliográfica.

3. TÉCNICAS DE OBTENCIÓN DE AZÚCARES

La pulpa de café es el primer subproducto que se obtiene en el despulpado del procesamiento del fruto, pero este sin tratamiento alguno solo es un residuo contaminante, por esta razón se le deben aplicar métodos que permitan la obtención de los componentes que a su vez generen un valor agregado mediante la producción de bioproductos. La presente investigación tiene como principal interés la composición de polisacáridos en la pulpa, de manera que lo expuesto en este capítulo hace referencia a las técnicas de obtención de azúcares de las biomásas lignocelulósicas, puesto que la pulpa de café residual se incluye en esa clasificación de biomasa.

3.1. Pretratamientos de biomasa

La degradación de los polisacáridos en azúcares fermentables de la biomasa mediante la hidrólisis es un proceso complicado, por lo que es necesario someterla a pretratamientos que faciliten el proceso. A continuación, en los siguientes apartados se exponen los diferentes pretratamientos que pueden ser utilizados.

3.1.1. *Pretratamiento mecánico*

3.1.1.a. Trituración mecánica. Consiste en someter la biomasa a una molienda con el fin de aumentar la densidad aparente y la superficie específica y reducir la cristalinidad de la celulosa. [41]

3.1.1.b. Molienda comprimida. Es una molienda sometida a sobrepresión que permite obtener material más homogéneo y en menor tiempo que el pretratamiento anterior. [41]

3.1.1.c. Extrusión. La biomasa es sometida al paso por una extrusora para romper la estructura del material lignocelulósico, en la extrusora se calienta, se mezcla y se corta, generando así cambios físicos y químicos en el material. [41]

3.1.1.d. Radiación de alta energía. Este pretratamiento pretende romper los enlaces beta glucosídicos y los enlaces entre la celulosa y la lignina sometiendo la biomasa a radiaciones con alta energía. [41]

3.1.2. *Pretratamiento térmico*

3.1.2.a. Explosión por vapor. Este pretratamiento se basa en someter la biomasa a una inyección directa de vapor saturado a altas temperaturas y presiones, posteriormente se realizan descompresiones bruscas, esto con el fin de provocar la despolimerización y ruptura de las fibras y enlaces para que los polisacáridos sean más accesibles en la hidrólisis. [41]

3.1.2.b. Pretratamiento con agua caliente en fase líquida (PACL). Como su nombre lo indica,

la biomasa es tratada con agua caliente durante 45 minutos aproximadamente, esto genera la solubilización de parte de la hemicelulosa de la celulosa, lo que la hace más accesible al someterla posteriormente a una hidrólisis. [41]

3.1.2.c. Pretratamiento con microondas. La biomasa es pretratada a partir de la acción de microondas para provocar la liberación de los grupos acetilos de las hemicelulosas. [41]

3.1.2.d. Pirolisis. A partir de temperaturas extremadamente altas, es decir de 300°C a 900°C, y la ausencia de oxígeno en la reacción de pirolisis se produce la descomposición de la biomasa. [41]

3.1.3. Pretratamiento físico-químico

3.1.3.a. Explosión por vapor con amoniaco. Esta es similar al pretratamiento de explosión por vapor, pero antes de ser tratada la biomasa se impregna con amoniaco líquido, se expone a una temperatura de 90°C por un tiempo de 30 minutos aproximadamente y posterior se realiza una brusca descompresión. Este pretratamiento tiene una baja eficiencia en residuos orgánicos por lo que no son aplicables para esta investigación. [41]

3.1.3.b. Percolación reciclada de amoniaco. Consiste en hacer pasar a través de la biomasa una solución de amoniaco en agua entre 5 a 15% en peso, con el fin de romper los enlaces con los carbohidratos. Este pretratamiento tiene una baja eficiencia en residuos orgánicos por lo que no son aplicables para esta investigación. [41]

3.1.4. Pretratamiento químico

3.1.4.a. Oxidación húmeda. Consiste en someter la biomasa a la acción del agua con presencia de oxígeno a temperaturas entre 160 a 180°C, este método permite un grado alto de desestructuración de la celulosa y mayor solubilidad de la hemicelulosa, por lo que aumentan los rendimientos de la hidrólisis posterior. [41]

3.1.4.b. Ozonólisis. Es una reacción entre el ozono y los compuestos orgánicos disueltos en solventes, donde el ozono actúa como deslignificador provocando una afectación mínima en la hemicelulosa y la celulosa. [41]

3.1.4.c. Tratamiento con organosolventes. Mezcla de solventes orgánicos o acuosos junto con un catalizador para llevar a cabo el tratamiento. [41]

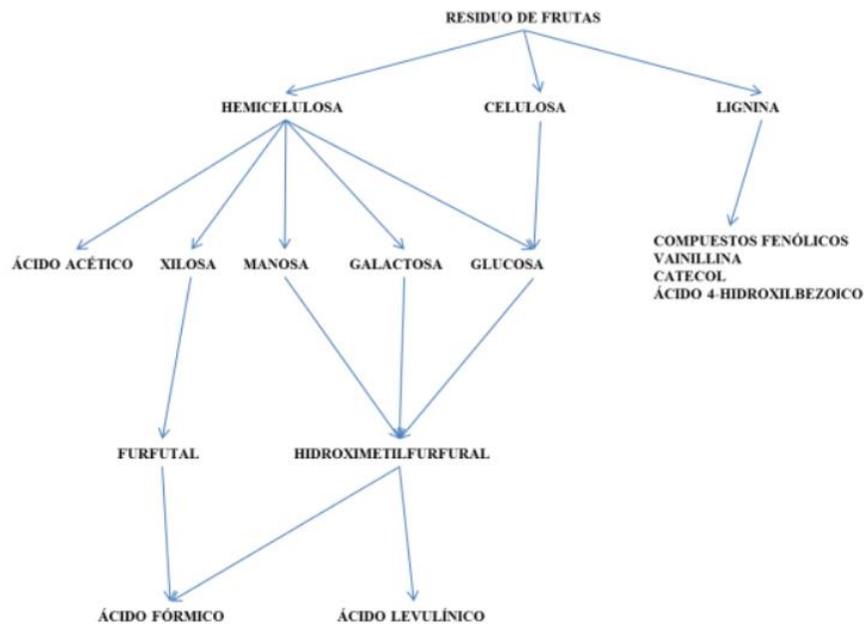
3.1.5.d. Tratamiento con disolventes. Se hace pasar la biomasa a través de distintos solventes, ácidos o básicos, con el fin de provocar la disrupción estructural de los polisacáridos y aumentar los rendimientos de la sacarificación. [42]

3.2. Hidrólisis

La extracción de azúcares se realiza a partir de una reacción química conocida como hidrólisis, en ella el agua se disocia para formar distintos enlaces con otras sustancias involucradas, en el caso de los polisacáridos se deben hidrolizar hasta formar moléculas semejantes mucho más simples que puedan ser aprovechadas, por ejemplo, la pectina se hidroliza en monosacáridos de ácido galacturónico, la celulosa en D-glucosa y la hemicelulosa en hexosas y pentosas (manosa, glucosa, xilosa, etc.). La Figura 15 [43] representa los productos obtenidos en la hidrólisis de los residuos de las frutas.

Figura 15.

Productos a partir de la hidrólisis en residuos de frutas



Nota: Descripción gráfica de los productos obtenidos después de la hidrólisis a partir de la biomasa lignocelulósica de los residuos de frutas.

La concentración de azúcares en la pulpa hidrolizada la transforma en un sustrato provechoso en la producción de alcoholes, ácidos, aldehídos, cetonas, etc., por medio de procesos de fermentación o en la producción de biomasa a partir de procesos aerobios. La hidrólisis se puede llevar a cabo de cinco formas distintas: ácida, alcalina, enzimática, en agua sub y supercrítica e hidrotérmica.

3.2.1. Hidrólisis ácida

La hidrólisis ácida es un proceso que hace uso de distintos ácidos, tales como clorhídrico, sulfúrico, nítrico, fosfórico, etc., con el propósito de romper rápidamente las cadenas de

polisacáridos presentes en la materia prima hasta obtener los monosacáridos. Los ácidos mencionados se pueden emplear a altas concentraciones con bajas temperaturas o diluidos a altas temperaturas y con tiempos de reacción menores, sin embargo, en la última 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. [41] Los ácidos más usados para esta hidrólisis son el ácido sulfúrico y clorhídrico.

3.2.2. Hidrólisis alcalina

Es una reacción química que se lleva a cabo a temperaturas elevadas y utiliza la presión para crear calor y acelerar el proceso, en ella se usan compuestos alcalinos como agentes activos de reacción para descomponer material biológico como proteínas, ácidos nucleicos, carbohidratos y lípidos. La hidrólisis básica facilita el proceder de las bacterias y enzimas, permite eliminar y separar la lignina de los polisacáridos a los que está ligada mediante el rompimiento de su estructura. [41]

3.2.3. Hidrólisis enzimática

La función principal de la hidrólisis enzimática es convertir la biomasa en azúcares fermentables mediante el uso de enzimas, estas actúan como catalizadores biológicos que aceleran la velocidad de las reacciones bioquímicas y en la hidrólisis tienen la finalidad de generar la ruptura de los polisacáridos. Este tipo de hidrólisis obtiene altos rendimientos, debido a que los catalizadores son específicos para cada reacción, adicionalmente no genera corrosión, no emplean agentes químicos y no produce compuestos inhibidores de la fermentación. [41]

3.2.4. Hidrólisis en agua sub y supercrítica

La hidrólisis en agua sub y supercrítica es una nueva alternativa para la producción de azúcares fermentables a partir de residuos lignocelulósicos para la producción de biocombustibles, 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” [44]. El punto crítico del agua es cuando su temperatura es 374°C y su presión es de 22,1 MPa [44], cuando se encuentra cercano a estas condiciones se hace referencia al fluido subcrítico, mientras que cuando se encuentran por encima de estas se hace referencia al fluido supercrítico.

Cuando el agua se encuentra en estas condiciones críticas su reactividad aumenta, 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. [44] Entre estas dos condiciones críticas (sub y super) la más usada es la hidrólisis con agua subcrítica, puesto que “ha demostrado ser una tecnología prometedora para hidrolizar celulosa y hemicelulosa de forma simultánea sin tratamientos previos y con mayores ventajas en términos ambientales y económicos” [44], entre estas ventajas se resalta: la velocidad en procesar cantidades significativas de biomasa en reactores pequeños, que no necesita reducir el contenido de agua en la materia prima evitando gastos de pérdidas de energía y la posibilidad de controlar la selectividad de la reacción, ajustando las condiciones del medio de reacción. [44]

3.2.5. Hidrólisis hidrotérmica

La hidrólisis hidrotérmica consiste en mezclar la biomasa lignocelulósica con agua, seguido de eso 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 empleado. Este tipo de hidrólisis con respecto a los otros tipos 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, genera elevados costos en el proceso. [43]

3.3. Cuantificación de azúcares reductores

Posterior al pretratamiento de la biomasa y la respectiva hidrólisis, se realiza el conteo de azúcares reductores, para ello existen diferentes métodos, pero en el documento solo se hará mención de los cuatro más comunes con su respectiva descripción.

3.3.1. Cromatografía líquida de alta resolución (HPLC)

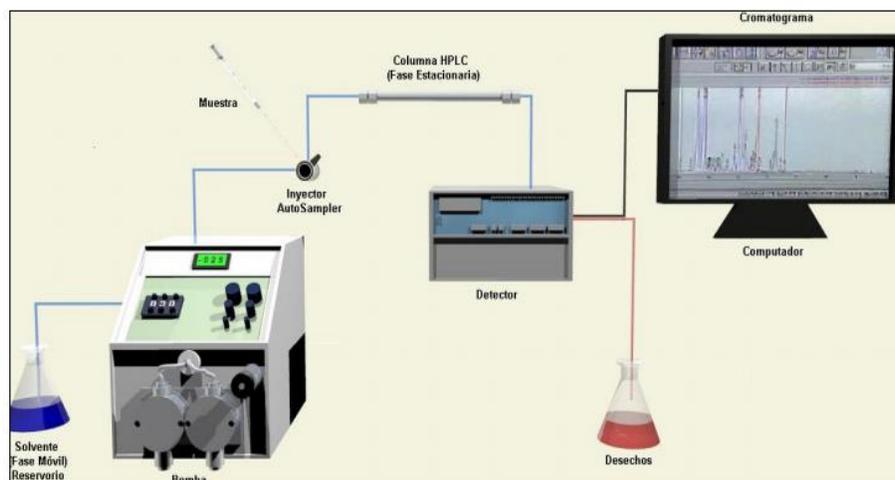
La cromatografía líquida de alto rendimiento se utiliza para separar y determinar los componentes en una mezcla, es una técnica analítica de separación ampliamente utilizada debido a su sensibilidad, su fácil adaptación a las determinaciones cuantitativas exactas, su idoneidad para la separación de especies y, sobre todo, su aplicabilidad a sustancias que son de primordial interés en la industria [45]. En cuanto a los azúcares esta técnica permite la separación, identificación y cuantificación de la fructosa, glucosa, sacarosa, maltosa, lactosa y por sumatoria se obtienen los azúcares totales que se encuentren presentes en muestras orgánicas.

Para el conteo de azúcares se debe realizar primero la extracción de los azúcares presentes en la muestra que se desea analizar, para la HPLC se utiliza comúnmente como fase móvil el acetonitrilo, líquido que fluye a través de una columna que contiene a la fase fija, y un detector IR

(HPLC-IR), en la Figura 16 [45] se presenta un esquema general de un sistema de HPLC.

Figura 16.

Esquema general de un sistema de HPLC



Nota: Descripción gráfica secuencial del funcionamiento de un HPLC.

3.3.2. Método con ácido 3,5 dinitrosalicílico (DNS)

Este método determina la presencia de los grupos carbonilos libres de los azúcares reductores, se basa en una reacción redox donde la oxidación de los azúcares ocurre por el uso del ácido 3,5 dinitrosalicílico y al mismo tiempo ocurre una reducción endotérmica de los azúcares. Para este método una mol de azúcar reacciona con una mol de ácido 3,5 dinitrosalicílico y permite conocer la cantidad de azúcares reductores en una muestra a partir de la estequiometría. La reacción es colorimétrica y después de realizarla se procede a la determinación mediante el uso de un espectrofotómetro a 540 nm. [46]

3.3.3. Cromatografía de gases

La cromatografía de gases es una técnica que se utiliza para confirmar la presencia o ausencia de un compuesto en una muestra determinada, en este método la muestra se volatiliza y se inyecta en una columna cromatográfica y se basa en la distribución del analito entre la fase móvil gaseosa y la fase líquida inmovilizada de modo de que los componentes individuales se separan en base a su solubilidad relativa en la fase líquida y a sus presiones de vapor relativas. [47]

3.3.4. Electroforesis capilar (EC)

En la EC los componentes de una solución pueden separarse mediante la acción de un campo eléctrico aplicado en el interior de un tubo capilar de sílice fundida, de acuerdo con sus movilidades. Esta técnica se divide en la electroforesis capilar zonal (ECZ) y la electroforesis

electrocinética micelar (MEKC), donde en la primera el medio de separación es un electrolito de corrida y en la segunda al electrolito de corrida se le agrega un tensoactivo a una concentración superior de la concentración micelar crítica. La separación de azúcares por EC se basa en la disociación de sus grupos semiacetales en medio fuertemente alcalino o en la formación de complejos con ácido bórico. [48]

3.4. Evaluación de técnicas para la obtención de azúcares a partir de la pulpa de café

Con el fin de cumplir el segundo objetivo específico se realizará una matriz de selección de la técnica más conveniente en la extracción de azúcares reductores totales (ART) tales como, glucosa, manosa, fructosa, arabinosa, xilosa y sacarosa. Para ello se evaluarán las tres hidrólisis más reportadas en las investigaciones que son: ácida, alcalina y enzimática, considerando los cuatro parámetros de selección que se encontraron con mayor frecuencia en las investigaciones, estos fueron el rendimiento, los compuestos inhibidores para la fermentación, la versatilidad y las condiciones de reacción. No obstante, existen otros parámetros a considerar como los costos, pero en esta matriz de selección no se tomó en cuenta, puesto que no se encontraron reportes específicos al respecto, sin embargo, según la revisión bibliográfica se puede concluir que la hidrólisis enzimática genera mayores costos, dado que requiere del uso de enzimas y estas con respecto a los reactivos empleados en la hidrólisis química son más costosas.

3.4.1. Parámetros de selección

A continuación, se presentan las tablas elaboradas para cada parámetro evaluado:

3.4.1.a. Rendimiento. La Tabla 10 se realizó a partir de la recopilación de datos reportados por diferentes autores de los rendimientos en términos de gramos/litro de ART para algunas biomásas entre las que se encuentra la pulpa de café residual.

Tabla 10.

Recopilación de datos para el rendimiento

Rendimiento			
Autor / Tipo de hidrólisis	Ácida	Alcalina	Enzimática
G. Urbaneja et al. [49]	Con H_2SO_4 se obtuvo un rango de ART de 0,65 a 21,81 g/L para la biomasa (pulpa de café seca)	No Reporta	No Reporta
E. Camacho, E. Alarcon, J García y B. Gutierrez. [50]	No Reporta	No Reporta	Con celulasas de <i>Trichoderma reesei</i> con pretratamientos ácido y alcalino se obtuvo un rango de ART de 6,32 a 8,91 g/L para la biomasa (pulpa de café seca)
R. Rodriguez, J. Laencina y J. Ros [51]	Con H_2SO_4 se obtuvo un valor de ART de 16 g/L para la biomasa (pulpa de café seca).	No reporta	No Reporta
K. Espinoza, et al. [52]	Con H_2SO_4 se obtuvo un valor de ART de 39,14 g/L para la biomasa (maiz amarillo duro)	Con $NaOH$ se obtuvo un valor de ART de 1,58 g/L para la biomasa (maiz amarillo duro)	No Reporta
W. Cortés, J. Ibla, L. Calderon y A. Herrera. [53]	Con H_2SO_4 se obtuvo un valor de ART de 33,84 g/L para la biomasa 1 (cascaras de banano) y 31,77 g/L para la biomasa 2 (cáscara de naranja)	No reporta	No Reporta

Tabla 10. Continuación

Rendimiento			
Autor / Tipo de hidrólisis	Ácida	Alcalina	Enzimática
C. Bardales, C. Rojas y C. León [54]	Con H_2SO_4 se obtuvo un valor de ART de 12,805 g/L para la biomasa 1 (hoja de caña de azúcar) y 11,738 g/L para la biomasa 2 (cascarilla de arroz)	Con $NaOH$ se obtuvo un valor de ART de 1,356 g/L para la biomasa (hoja de caña de azúcar) y 1,273 g/L para la biomasa 2 (cascarilla de arroz)	No reporta
F. Gomez [55]	Con HCl se obtuvo un valor de ART de 20,978 g/L para la biomasa (paja de avena)	No reporta	Con una preparación comercial de celulasas se obtuvo un valor de ART de 18,839 g/L para la biomasa (paja de avena)
Promedio	20,82 g/L	1,403 g/L	13,227 g/L

Nota: Tabla de los resultados reportados por diferentes autores del rendimiento.

3.4.1.b. Generación de compuestos inhibidores para la fermentación. La Tabla 11 se realizó a partir de la recopilación de datos reportados por diferentes autores acerca de los compuestos inhibidores para la fermentación generados en la hidrólisis, que a su vez tienen efectos tóxicos. Como se observa lo reportado coincide de forma unánime, razón por la que se decidió mencionar solo tres autores.

Tabla 11.

Recopilación de datos para los compuestos inhibidores para la fermentación

Compuestos inhibidores			
Autor / Tipo de hidrólisis	Ácida	Alcalina	Enzimática
C. Hernandez [41]	“Las condiciones ácidas y de alta temperatura facilitan la formación de productos de degradación de los azúcares, denominados furfural y el hidroximetilfurfural, afectando negativamente el proceso de fermentación ya que actúan como inhibidores y disminuyen el rendimiento del proceso.” [41]	No Reporta	Esta hidrólisis presenta ventajas frente a la hidrólisis ácida y básica, ya que no emplea agentes químicos y no produce compuestos inhibidores de la fermentación. [41]
I. Rodriguez [43]	“La principal reacción que se produce es la hidrólisis de la hemicelulosa, produciendo monómeros, como el furfural, hidroximetilfurfural (HMF), ácido acético, ácido fórmico y ácido levulínico”. [43]	“La principal reacción que se produce es la hidrólisis de la hemicelulosa, produciendo monómeros, como el furfural, hidroximetilfurfural (HMF), ácido acético, ácido fórmico y ácido levulínico”. [43]	Esta hidrólisis presenta la ventaja frente a la hidrólisis química de que no se producen compuestos inhibidores de la fermentación. [43]

Tabla 11. Continuación

Compuestos inhibidores			
Autor / Tipo de hidrólisis	Ácida	Alcalina	Enzimática
F. Gomez [55]	Es un proceso químicamente complejo, donde se forman compuestos inhibidores provenientes de la deshidratación de pentosas (furfural) y hexosas (HMF) además de ácidos grasos provenientes de la desacetilación de la hemicelulosa como son el ácido fórmico o el acético y del rompimiento del HMF (ácido levulínico). [55]	Propician la generación de subproductos que inhiben ciertos procesos biológicos como la fermentación alcohólica y la metanogénesis, se forman los mismos compuestos inhibidores que en la hidrólisis ácida. [55]	“En esta hidrólisis no ocurre la formación de compuestos inhibidores, debido a que la hidrólisis enzimática es muy selectiva, produciéndose únicamente azúcares, disacáridos y probablemente algunos oligosacáridos.” [55]

Nota: Tabla de los resultados reportados por diferentes autores de la generación de compuestos inhibidores en cuanto a la fermentación.

3.4.1.c. Versatilidad. La Tabla 12 se realizó a partir de la recopilación de datos reportados por diferentes autores para la versatilidad de las técnicas, es decir que se adecua a cualquier tipo de biomasa.

Tabla 12.

Recopilación de datos para la versatilidad

Versatilidad			
Autor / Tipo de hidrólisis	Ácida	Alcalina	Enzimática
C. Hernandez [41]	Residuos de fruta	Residuos de fruta	Residuos de fruta
I. Rodriguez [43]	Residuos de fruta	Residuos de fruta	Residuos de fruta
G. Urbaneja et al. [49]	Pulpa de café seca	No reporta	No reporta
E. Camacho, E. Alarcon, J García y B. Gutierrez. [50]	No reporta	No reporta	Pulpa de café seca
R. Rodriguez, J. Laencina y J. Ros [51]	Pulpa de café seca	No reporta	No Reporta
K. Espinoza, et al. [52]	Maíz amarillo duro	Maíz amarillo duro	No Reporta
W. Cortés, J. Ibla, L. Calderon y A. Herrera. [53]	Cáscara de banano y cáscara de naranja	No Reporta	No Reporta
C. Bardales, C. Rojas y C. León [54]	Hoja de caña de azúcar, cascarilla de arroz, entre otras.	Hoja de caña de azúcar, cascarilla de arroz, entre otras.	No Reporta
F. Gomez [55]	Paja de avena	No Reporta	Paja de avena

Nota: Tabla de los resultados reportados por diferentes autores de la versatilidad.

3.4.1.d. Condiciones de reacción. La Tabla 13 se realizó a partir de la recopilación de datos reportados por diferentes autores para las condiciones de reacción.

Tabla 13.

Recopilación de datos según las condiciones de reacción

Condiciones de reacción			
Autor / Tipo de hidrólisis	Ácida	Alcalina	Enzimática
I. Rodriguez [43]	Ácidos diluidos a temperaturas entre 190 y 240°C con tiempos de reacción entre 6 a 12 segundos.	Se sumerge el material lignocelulósico en bases diluidas a 60°C aproximadamente durante 24 horas.	En la hidrólisis enzimática se utilizan las celulasas y las amilasas, se lleva a cabo con condiciones de pH 4.5, de temperatura 50°C, agitación suave y requiere largos tiempos de reacción.
G. Urbaneja et al. [49]	Se realizó variando las concentraciones del ácido en un rango de 0.5 al 2.0% (p/v) y los tiempos de reacción de 30 a 240 minutos, manteniendo una temperatura de ebullición a reflujo. [49]	No reporta	No reporta
E. Camacho, E. Alarcon, J García y B. Gutierrez. [50]	No reporta	No reporta	“La biomasa fue sometida a pretratamiento químico, con H_2SO_4 y $NaOH$, a concentraciones de 0, 0.5, 1, 1.5 y 2%; y tiempos de reacción de 5, 15, 30 y 60 min. Los mejores tratamientos fueron sometidos a hidrólisis, con celulasas de <i>Trichoderma reesei</i> por 8 horas.” [50]
R. Rodriguez, J. Laencina y J. Ros [51]	Se realizó un pretratamiento con H_2SO_4 al 72% a una temperatura de 30°C por 1 hora, seguido de la hidrólisis ácida con H_2SO_4 1 M a una temperatura de 100°C por 3 horas.	No Reporta	No Reporta

Tabla 13. Continuación

Condiciones de reacción			
Autor / Tipo de hidrólisis	Ácida	Alcalina	Enzimática
K. Espinoza, et al [52]	La concentración del H_2SO_4 fue al 1,25% (v/v) por 30 minutos.	La concentración del $NaOH$ fue al 1,25% (p/v) por 30 minutos.	No Reporta
W. Cortés, J. Ibla, L. Calderon y A. Herrera. [53]	Se mantuvo un tiempo de reacción para tres muestras de banano y tres muestras de naranja, donde variaba la temperatura y las rpm.	No Reporta	No Reporta
F. Gomez [55]	Solución de HCl al 2%, con una temperatura de 90°C por 2 horas.	No Reporta	Concentración de enzima de 0.9 mg/mL a una temperatura de 45°C por 10 horas.

Nota: Tabla de los resultados reportados por diferentes autores según las condiciones de reacción.

3.4.2. Matriz de selección

Para la matriz de selección se evaluó cada parámetro y a partir de cada uno se otorgó una puntuación de 1 a 5 a cada tipo de hidrólisis, donde 1 califica como la menos conveniente y 5 califica como la más conveniente en la extracción de azúcares. A continuación, se explica cómo se determinó la puntuación para cada parámetro seleccionado:

3.4.2.a. Rendimiento. En la Tabla 10 se calculó el promedio de los valores reportados en términos de gramos/litro de ART para las diferentes biomásas y se observa que se obtuvieron valores de 20,82, 1,403 y 13,227 g/L de ART para la hidrólisis ácida, alcalina y enzimática respectivamente. A partir del rendimiento promedio más alto se otorgó una puntuación de 5, así mismo se otorgaron puntuaciones equivalentes para los dos valores restantes. Cabe resaltar que las técnicas de cuantificación de azúcares es un factor influyente en los valores de los rendimientos reportados.

3.4.2.b. Generación de compuestos inhibidores para la fermentación. Observando lo reportado en la Tabla 11 se le otorgó la mayor puntuación a la hidrólisis enzimática, dado que no genera compuestos inhibidores y la menor puntuación a la hidrólisis ácida y alcalina, puesto que si generan estos compuestos inhibidores.

3.4.2.c. Versatilidad. Este parámetro no se consideró como criterio de selección, debido a que como se observa en la Tabla 12 todas las hidrólisis son funcionales en los diferentes tipos de biomasa.

3.4.2.d. Condiciones de reacción. La puntuación de este parámetro se realizó a partir de los datos de la Tabla 13 y se otorgó sólo teniendo en cuenta los tiempos de reacción que pueden variar según otras condiciones como la temperatura, las concentraciones de los ácidos o bases y la enzima. Sin embargo, se conoce que la hidrólisis enzimática requiere largos tiempos de reacción por lo que se puntúa con 1, mientras que la hidrólisis ácida es considerada la más rápida y se puntúa con 5, dejando la hidrólisis alcalina en un nivel intermedio con una puntuación de 3.

A continuación, se presenta la matriz con las puntuaciones establecidas según lo explicado anteriormente:

Tabla 14.
Matriz de selección

Parámetro	Tipo de hidrólisis		
	Ácida	Alcalina	Enzimática
Rendimiento	5	1	3
Compuestos inhibidores para la fermentación	1	1	5
Condiciones de reacción	5	3	1
Total	11	5	9

Nota: Matriz de selección para la técnica de obtención de azúcares.

Finalmente, con los resultados obtenidos en la matriz de selección se eligió la hidrólisis ácida, ya que presentó la puntuación más alta, es decir que es la más conveniente a usar en los procesos de obtención de azúcares a partir de biomasa lignocelulósica, en segundo lugar, está la hidrólisis enzimática que no se descarta, dado que proporciona buenos resultados en términos de rendimiento y favorece el proceso fermentativo, puesto que no genera compuestos inhibidores. Sin embargo, el alto coste de producción de enzimas y su baja eficiencia limita su uso en las aplicaciones industriales, además al ser la celulosa el polisacárido con mayor contenido presente en la pulpa de café residual dificulta la extracción de azúcares por hidrólisis enzimática, debido a que este método utiliza una enzima que es una macromolécula, por lo que su acceso a la celulosa está restringido por factores que no afectan a la ácida, tales como la envoltura de lignina en torno a las fibras celulósicas y la resistencia estructural de la celulosa. [56]

En el siguiente capítulo se pretende evaluar el potencial de los hidrolizados obtenidos de las hidrólisis ácida y enzimática para la producción de biomasa microbiana y etanol carburante, debido a que actualmente son las que cuentan con el mayor número de estudios realizados.

4. OBTENCIÓN DE BIOPRODUCTOS

Como se ha hecho mención a lo largo de todo el documento, la pulpa de café representa aproximadamente el 42% de los subproductos generados en el beneficio húmedo del café, siendo este el de mayor proporción y el que genera la mayor contaminación en la industria cafetera, por esto el último capítulo tiene como fin ahondar en la investigación para la obtención de bioproductos aprovechando que posee un contenido significativo de polisacáridos, que pueden ser extraídos en forma de azúcares por medio de la reacción química conocida como hidrólisis.

De la pulpa de café residual se puede obtener una variedad de bioproductos entre los que se incluyen el bioetanol, el metano, el biogás, el hidrógeno, el ácido láctico, los fitoquímicos, el ácido clorogénico, los carbones activados, las enzimas, los compuestos bioactivos, los compuestos antioxidantes, entre otros. Sin embargo, el presente capítulo se centra únicamente en la generación de biomasa microbiana y etanol carburante a partir de los hidrolizados de la pulpa de café residual.

4.1. Biomasa microbiana

En los últimos años ha crecido el interés en la búsqueda de nuevos sustratos que puedan ser utilizados en procesos biotecnológicos a partir del uso de microorganismos que produzcan biomasa microbiana de valor agregado, sin que su uso ponga en riesgo la seguridad alimentaria.

La biomasa microbiana es el producto del crecimiento de bacterias, levaduras, algas y hongos por medio de procesos fermentativos en desechos orgánicos [57]. Por esta razón, el principal subproducto del procesamiento del café, pulpa de café residual, se presenta como un sustrato alternativo y atractivo para ser utilizado en el cultivo de microorganismos, debido a que contiene azúcares que permiten su uso en los procesos biotecnológicos y a su vez contribuyen a la reducción de la contaminación producida en las zonas cafeteras.

En este contexto, la composición química de la pulpa de café residual permite la conversión microbiana en productos tales como etanol, ácido láctico, ácido glutámico, ácido cítrico, ácido giberélico, ácido gálico, compuestos aromáticos volátiles, carotenoides, hongos comestibles, enzimas, lípidos y cultivos de microorganismos. [8]

En relación a lo expuesto anteriormente, se recopilaron los estudios dirigidos a la producción de biomasa microbiana a partir de hidrolizados de la pulpa de café residual, con el propósito de revisar el avance de las investigaciones referentes a este tema específico. La Tabla 15 presenta los resultados y en ella se especifica el producto obtenido, el microorganismo empleado, las

condiciones del proceso y los rendimientos obtenidos.

Tabla 15.

Investigaciones para la producción de biomasa microbiana

Autor	Bioproducto	Microorganismo	Condiciones	Rendimientos
Y. Bolaños y V. Lagos [58]	Ácido glutámico	<i>Corynebacterium glutamicum</i>	Hidrólisis ácida con ácido sulfúrico al 1%, en proceso fermentativo discontinuo con un tiempo de digestión de 6 horas.	Concentración de azúcares de 0.026 g/mL Ácido glutámico = 56.01 %
D. Pleissner, et al. [59]	Ácido láctico	<i>Bacillus coagulans</i>	Pretratamiento termoquímico a 121°C en presencia de 0.18 mol/L de ácido sulfúrico, seguido de hidrólisis enzimática con Accellerase 1500.	Ácido láctico = 0.78 g / g de azúcar

Nota: Recolección de investigaciones de producción de bioetanol a partir de la pulpa de café.

Como se observa en la tabla, actualmente solo se encuentran dos publicaciones enfocadas en la producción de biomasa microbiana por medio de hidrolizados de la pulpa de café, lo que demuestra la falta de interés en el aprovechamiento de los mismos, a pesar de que se ha confirmado a lo largo de la presente investigación que los azúcares presentes en la pulpa de café le confieren cierto potencial para su uso como sustrato en el cultivo de microorganismos para la producción de biomasa microbiana.

Debido a que la pulpa de café es una fuente significativa de azúcares, se propone aumentar el estudio de este residuo, puesto que al aprovecharlo correctamente podría ser una opción en la sustitución de las fuentes convencionales de carbono y contribuiría en la obtención de soluciones sostenibles en procesos alimenticios, en la disminución de la huella de carbono y en la reducción del impacto ambiental en la zona cafetera. Un ejemplo de lo mencionado puede ser el uso de la pulpa de café residual como sustrato en el cultivo de géneros como *Aspergillus* y *Saccharomyces*.

4.2. Bioetanol

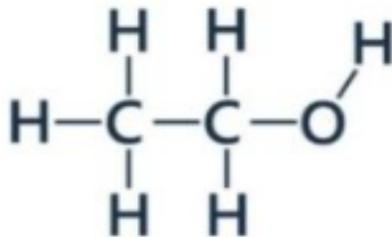
En la actualidad la energía empleada proviene en mayor parte de los combustibles fósiles no renovables, es decir, el petróleo y demás hidrocarburos, sin embargo, estos son recursos finitos en el planeta y generan un impacto ambiental negativo, puesto que aumentan las emisiones de gases de efecto invernadero, causantes del fenómeno conocido como calentamiento global.

Con base a lo anterior, la diversificación energética es una necesidad a nivel mundial, dado que las reservas de petróleo han disminuido, por lo que es necesario generar nuevas alternativas en las que se aprovechen subproductos o materiales residuales de procesos agroindustriales que tengan gran potencial para la producción de biocombustibles, además de una amplia disponibilidad y un bajo costo. En consecuencia, la producción de bioetanol se ha convertido en un tema amplio de investigación dado que se considera un recurso energético sostenible, de alta viabilidad, que ofrece ventajas medioambientales y económicas a largo plazo.

El bioetanol o etanol carburante es un líquido inflamable, incoloro, volátil y con olor característico, posee la misma composición química que el etanol o alcohol etílico, pero se diferencian en su origen, es decir el bioetanol se genera a partir del procesamiento de biomasa, mientras que el etanol químico se genera a partir de la industria petroquímica. En la Figura 17 [60] se observa la estructura química del etanol.

Figura 17.

Estructura del etanol



Nota: Descripción gráfica de la estructura del etanol.

El bioetanol al ser un biocombustible se clasifica del mismo modo, es decir en biocombustibles de primera, segunda y tercera generación. Los biocombustibles de primera generación o biocombustibles convencionales son aquellos en los que se utiliza como materia prima cultivos agrícolas destinados a la alimentación humana y su generación consiste en la conversión bioquímica de los carbohidratos en alcohol; los biocombustibles de segunda generación son los que en su producción no comprometen la seguridad alimentaria ni contribuyen a la destrucción de espacios naturales, por lo tanto se obtienen a partir de biomasa lignocelulósica que incluye residuos agrícolas, forestales y desechos urbanos; los biocombustibles de tercera generación se encuentran aún en investigación, pero plantean su producción a partir de algas, ya que estas son una fuente

renovable que posee diversas ventajas. [61]

De acuerdo a la clasificación de biocombustibles, se resalta que la investigación está ligada a la producción del bioetanol de segunda generación, puesto que la pulpa de café residual es material lignocelulósico y tiene como ventaja que durante el proceso no produce grandes emisiones de CO_2 . Cabe destacar que el bioetanol no sólo es una fuente de energía renovable, sino también una materia prima importante en diferentes industrias.

En el mismo orden de ideas, se recopilaron los datos reportados por diferentes investigaciones dirigidas a la producción de bioetanol a partir de la pulpa de café residual, con el fin de analizar el potencial de los hidrolizados obtenidos con esta materia prima en la industria de biocombustibles de segunda generación. La Tabla 16 presenta los resultados y en ella se especifica el tipo de hidrólisis empleado, algunas de las condiciones de proceso y el rendimiento en cuanto a azúcares reductores y producción de etanol carburante.

Tabla 16.

Investigaciones para la producción de bioetanol

Autor	Tipo de Hidrólisis	Condiciones	Rendimientos
D. Shenoy, et al. [62]	Ácida	Hidrólisis con ácido sulfúrico al 2% p/v y fermentación con <i>Saccharomyces cerevisiae</i> por 48 horas a 30°C.	ART = 0.71 g/100 mL de hidrolizada para pulpa seca y 0.23 g/100mL de hidrolizado para la pulpa húmeda Bioetanol = 9.35% pulpa de café seca y 40% pulpa de café húmeda.
E. Menezes, et al [63]	Enzimática	Pretratamiento alcalino con hidróxido de sodio al 4% p/v, seguido de la hidrólisis con celulasas y una fermentación con <i>Saccharomyces cerevisiae</i> por 48 horas a 30°C.	ART = 38.13 g/L para la pulpa de café Bioetanol = 13,66 g/L de etanol con un rendimiento de 0,4 g de etanol/g de glucosa.
N. Valencia [64]	Enzimática	Hidrólisis con celulasas seguido de una fermentación de 15 horas.	Bioetanol = 97,78% para la pulpa de café

Tabla 16. Continuación

Autor	Tipo de Hidrólisis	Condiciones	Rendimientos
N. Valencia [64]	Enzimática	Hidrólisis con celulasas y pectinasas seguido de una fermentación de 15 horas.	Bioetanol = 95,76% para la pulpa de café
N. Valencia [64]	Ácida	Hidrólisis con ácido sulfúrico concentrado seguido de una fermentación de 15 horas.	Bioetanol = 93,97% para la pulpa de café
R. Gurram, et al. [65]	Enzimática	Pretratamiento con ácido sulfúrico diluido, hidrólisis con ácido sulfúrico s y una fermentación con <i>Saccharomyces cerevisiae</i>	Bioetanol = 95% para la pulpa de café, es decir 0.51 g etanol/g glucosa
T. Widjaja, et al [66]	Enzimática	Pretratamiento organosolvente, hidrólisis con celulasa pura y enzima xileno y fermentación con <i>Saccharomyces cerevisiae</i> a una temperatura de 60 °C durante 30 horas.	ART = 0.164 g ART/ g pulpa de café Bioetanol = 0,065 g etanol/glucosa y xilosa.
J. Sadhukhan, et al. [67]	Enzimática	Pretratamiento ácido, hidrólisis enzimática, fermentación y purificación del bioetanol.	Bioetanol = 48,6 US gal/ton de pulpa de café, es decir un rendimiento en masa de 14,5%.

Nota: Recolección de investigaciones de producción de bioetanol a partir de la pulpa de café.

Según los datos previamente reportados en la Tabla 16 se concluye que la pulpa de café residual es una materia prima potencial en la producción de etanol carburante o bioetanol, puesto que presenta rendimientos favorables en el proceso, sin embargo, a través de la búsqueda se observó que los estudios al respecto son escasos y que aún no se le da el valor a la pulpa como subproducto en la industria cafetera y sigue siendo una fuente de contaminación. Cabe resaltar que al incluir la

pulpa de café como materia prima en la producción de bioetanol se generan beneficios ambientales en términos de reducción de consumo de energía no renovable y disminución de emisiones de gases de efecto invernadero.

Antes de finalizar el capítulo, es conveniente destacar algunos de los beneficios que ocasiona el correcto aprovechamiento de la pulpa de café residual en la industria cafetera, como la disminución del impacto ambiental, el acercamiento a un ciclo 100% productivo, el avance en el cambio de una economía lineal a una economía circular, la generación de valor agregado a los subproductos y nuevos ingresos económicos para los países productores de café. Adicionalmente, al convertir la pulpa de café residual en materia prima para la producción de diversos bioproductos a partir de la extracción de sus azúcares, se hace uso de uno de los recursos disponibles más abundantes en el planeta tierra, la biomasa lignocelulósica.

Asimismo, es importante tener en cuenta el concepto de biorefinería que hace referencia a la transformación sostenible de la biomasa, es decir que los diversos residuos se utilicen como biomasa y se conviertan en la materia prima para la producción de nuevos productos de forma que estos tengan un valor agregado y se disminuya la generación de residuos. Dentro de los productos de una biorefinería se destacan biogás, bioetanol, biomasa microbiana, metano, hidrógeno, productos químicos, etc. [68]

Un propósito complementario de esta investigación es exponer que se puede llevar a cabo la implementación de una biorefinería sustentable en la caficultura, donde se genere un espectro amplio de bioproductos con interés comercial mediante el aprovechamiento de los hidrolizados de la pulpa de café residual. Dentro del espectro de bioproductos se incluyen compuestos sencillos que se conocen como bioquímicos y se pueden vender como “commodities” químicos a otras industrias como “building blocks” para ser transformados en bioproductos [69]. Para cumplir este propósito es necesario tener en cuenta que la biorrefinería se debe construir en zonas aledañas de los establecimientos que cosechen café y realicen el beneficio del mismo, con el fin de que sea un lugar atractivo, económicamente viable y aporte los beneficios ya mencionados.

Para concluir el capítulo, se enfatiza en que el principal subproducto de la caficultura, la pulpa de café, presenta valores significativos en la conversión de sus polisacáridos a azúcares fermentables para la producción de bioproductos, a pesar de lo anterior en la actualidad este potencial es desaprovechado, visto que la pulpa sigue siendo una fuente contaminante y un desperdicio económico. Según lo realizado en esta investigación se puede afirmar que los estudios

basados en la obtención de bioproductos a partir de los hidrolizados es un tema con un amplio campo disponible por estudiar, en vista de que los estudios encontrados para la producción de biomasa microbiana fueron escasos y en la producción de bioetanol a pesar de que en los estudios se han obtenido rendimientos favorables, aún no se ha explotado esta metodología de obtención.

5. CONCLUSIONES

Se analizó la composición química de la pulpa de café residual a partir de una revisión bibliográfica, donde se observó que contiene valores significativos de polisacáridos, tales como pectina, celulosa y hemicelulosa, siendo la celulosa el polisacárido con mayor proporción entre los mencionados, encontrándose en un rango de valores entre 17.3% hasta 35.6% según los autores reportados. Estos polisacáridos se pueden extraer en forma de azúcares permitiendo dar un valor agregado al mayor subproducto generado en la caficultura mediante su aprovechamiento como materia prima en la producción de nuevos bioproductos.

Adicional, se seleccionó como método de obtención de azúcares en biomasa lignocelulósica la hidrólisis ácida utilizando una matriz de selección con base a los rendimientos, la generación de compuestos inhibidores, la versatilidad y las condiciones de reacción, sin embargo, no se descarta la hidrólisis enzimática, puesto que sus desventajas con respecto a la ácida son los tiempos de reacción y el complejo enzimático que se forma en el proceso.

Finalmente, se concluye que la pulpa de café sigue siendo un residuo para la industria cafetera, por ejemplo en Colombia para el periodo entre agosto de 2019 a julio del 2020 la generación de pulpa de café fue de aproximadamente 8.128.424.210,53 kg, debido a que no se ha aprovechado correctamente, lo que conlleva pérdidas de ingresos económicos que pueden generar los subproductos con valor agregado como el bioetanol y la biomasa microbiana, además de un distanciamiento al logro de un ciclo 100% productivo, creando una brecha en el paso de la economía lineal a la economía circular e impactando negativamente el medio ambiente.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] ICO: International Coffee Organization (2019, Septiembre 6) “Informe sobre desarrollo cafetero de 2019: Sumario” [Online] Disponible: <http://www.ico.org/documents/cy2018-19/ed-2318c-overview-flagship-report.pdf>
- [2] © International Coffee Organization (2019) “Total production by all exporting countries” [Online] Disponible: <http://www.ico.org/historical/1990%20onwards/PDF/1a-total-production.pdf>
- [3] ICO: International Coffee Organization (2020, Marzo) “Informe del mercado del café” [Online] Disponible: <http://www.ico.org/documents/cy2019-20/cmr-0320-c.pdf>
- [4] N.N. “Estos son los países que más exportan café” *Revista Dinero* [Online] Disponible: <https://www.dinero.com/pais/articulo/quienes-son-los-mayores-exportadores-de-cafe/276962#:~:text=Brasil%2C%20Vietnam%20y%20Colombia%20representan.net%2C%20con%20datos%20de%20CIA.>
- [5] N.N. “Principales importadores de café del mundo” [Online] Disponible: <https://www.infocafe.es/cafe/principales-importadores-cafe.php#:~:text=Estados%20Unidos%20es%20el%20mayor,en%20forma%20de%20producto%20procesado.>
- [6] © International Coffee Organization (2020) “Imports of coffee by selected importing countries January - June 2020” [Online] Disponible: <http://www.ico.org/prices/m5-imports.pdf>
- [7] Federación Nacional de Cafeteros de Colombia (2020, Enero 14) “Producción de café de Colombia cerró el 2019 en 14,8 millones de sacos” [Online] Disponible: <https://federaciondefcafeteros.org/wp/listado-noticias/produccion-de-cafe-de-colombia-cerro-el-2019-en-148-millones-de-sacos/>
- [8] R. Alves, et al. “*Handbook of Coffee Processing By-Products Sustainable Applications*” Edited by C. Galanakis, Research & Innovation Department, Galanakis Laboratories, Chania, Greece, 2017.
- [9] E. Figueroa, F. Pérez y L. Godínez “La producción y el consumo del café” ECORFAN®, p.p. 11 ISBN 978-607-8324-49-1 [Online] Disponible: https://www.ecorfan.org/spain/libros/LIBRO_CAFE.pdf

- [20] N. Fierro, A. Contreras, O. González, E. Rosas y V. Morales. (2018, abril) “Caracterización química y nutricional de la pulpa de café (*Coffea arábica* L.)” *Revista agroproductividad*, Vol. 11, Núm. 4, p.p. 9-13.
- [21] J. Rubio y J. Pineda “Composición química y digestibilidad in vitro de la pulpa de café” *Cenicafé*, Julio-Septiembre, 1973.
- [22] J. Braham y R. Bressani “*La pulpa de café: usos, composición y tecnología*” Instituto de Nutrición de Centro América y Panamá, INCAP, 1978
- [23] O. Diaz “Productos Krofal” Trabajo de grado, Pontifica Universidad Javeriana, Bogotá D.C., 2009.
- [24] P. Murthy y M. Madhava “Sustainable management of coffee industry by-products and value addition a review” *Journal Elsevier*, 2012
- [25] G. Corro, L. Paniagua, U. Pal, F. Bañuelos y M. Rosas “Generation of biogas from coffee-pulp and cow-dung co-digestion: Infrared studies of postcombustion emissions” *Journal Elsevier*, *Energy Conversion and Management*, Volume 74, p.p. 47-48, October 2013 DOI:10.1016/j.enconman.2013.07.017
- [26] T. Widjaja, T. Iswantoa, A. Altwaya, M. Shovitrib y S. Rachmania “Methane Production from Coffee Pulp by Microorganism of Rumen Fluid and Cow Dung in Co-digestion” *Chemical engineering transactions*, Vol 56, 2017 DOI: 10.3303/CET1756245
- [27] R. Hendroko et al. “Characterisation of Arabica Coffee Pulp - Hay from Kintamani - Bali as Prospective Biogas Feedstocks” *MATEC Web of Conferences*, Vol 164, Abril, 2018 DOI: 10.1051/mateconf/201816401039
- [28] R. Rodríguez, J. Laencina y J. García “Evaluation of coffee pulp as substrate for polygalacturonase production in solid state fermentation” *Emirates Journal of Food and Agriculture*, Vol 32, No 2, p.p. 117-124, Enero, 2020 DOI: 10.1051/mateconf/201816401039
- [29] Textos científicos (2013, Febrero 1) “Polisacáridos” [Online] Disponible: <https://www.textoscientificos.com/quimica/carbohidratos/polisacaridos>
- [30] R. Parada “Pectina: estructura, funciones, tipos, alimentos, aplicaciones” [Online] Disponible: <https://www.lifeder.com/pectina/>
- [31] SilvaTeam (2020) “¿Qué es la pectina?” [Online] Disponible: <https://www.silvateam.com/es/productos-y-servicios/aditivos-alimentarios/pectina/qu-es-la-pectina.html>

- [32] H. Calle “Pectinas” Cenicafé, p.p. 39-44, 1977. [Online]. Disponible: <https://biblioteca.cenicafe.org/bitstream/10778/806/8/7%20Pectinas.pdf;7>
- [33] D. Arriola y R. García “Caracterización química de la pectina obtenida de desechos del beneficiado de café” *Revista científica*, Vol 1, No 1, Universidad de San Carlos de Guatemala, 1985
- [34] M. Serrat, A. De la Fé, J. De la Fé y C. Monteros “Extracción y caracterización de pectina de pulpa de café de la variedad Robusta”, *Revista Cubana De Química*, Vol 30, No 3, Septiembre-Diciembre, 2018 [Online] Disponible: <http://scielo.sld.cu/pdf/ind/v30n3/ind11318.pdf>
- [35] S. Keller “Por Qué el Papel Prospera En un Mundo Digital”, *ChemMatters*, pp. 5-8. Abril/Mayo 2019.
- [36] N. Rodríguez (2011) “Experiencias recientes en el uso de los subproductos del café.” Centro nacional de investigaciones de café, Cenicafé [Online]. Disponible: <https://docplayer.es/3435414-Experiencias-recientes-en-el-uso-de-los-subproductos-del-cafe.html>
- [37] S. Rivas (2014) “Valorización de hemicelulosas de biomasa vegetal”
- [38] A. Álvarez “Caracterización fisicoquímica de varios residuos agroindustriales y sus mezclas para la producción de biocombustibles” Trabajo de grado, Universidad Santo Tomas, Bucaramanga, 2016 [Online] Disponible: <https://repository.usta.edu.co/bitstream/handle/11634/9608/AlvarezHincapieAnaBeatriz2016.pdf?sequence=1>
- [39] R. Parada “Hemicelulosa: clasificación, estructura, biosíntesis y funciones” [Online] Disponible: <https://www.lifeder.com/hemicelulosa/>
- [40] M. Chávez y M. Domine “Lignina, estructura y aplicaciones: Métodos de despolimerización para la obtención de derivados aromáticos de interés industrial” *Avances en Ciencias e Ingeniería*, vol. 4, núm. 4, pp. 15-46, octubre-diciembre, 2013 [Online] Disponible: <https://www.redalyc.org/pdf/3236/323629266003.pdf>
- [41] C. Hernández “Obtención de bioetanol a partir de hidrolizados de residuos de fruta” Trabajo fin de máster, Universidad de Oviedo, España, 2017 [Online] Disponible: https://digibuo.uniovi.es/dspace/bitstream/handle/10651/43613/TFM_CeliaHernandezGalindo.pdf;jsessionid=3DF66232DCCBBD8E5EBC01C6204D23D4?sequence=6

- [42] A. Guarnizo, P. Martínez y H, Valencia “Pretratamiento de la celulosa y biomasa para la sacarificación” *Scientia et Technica* Año XV, No 42, Agosto, 2009. ISSN 0122-1701
- [43] I. Rodríguez “Pretratamiento de hidrólisis hidrotérmica para la degradación de los carbohidratos complejos de residuos de frutas para la obtención de bioetanol” M.S. Tesis, Universidad de Oviedo, España, 2016 [Online] Disponible: <https://core.ac.uk/reader/83589964>
- [44] J. Montealegre y A. Polanco “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, Universidad de La Salle, Bogotá, 2016 [Online] Disponible: https://ciencia.lasalle.edu.co/cgi/viewcontent.cgi?article=1537&context=ing_ambiental_sanitaria
- [45] A. Foitzich “Desarrollo y validación de una metodología para determinar azúcares simples en matrices orgánicas mediante HPLC- IR.” Trabajo de grado, Universidad Austral de Chile, Chile, 2013 [Online] Disponible: <http://cybertesis.uach.cl/tesis/uach/2013/faf659d/doc/faf659d.pdf>
- [46] “Bradford Y DNS” [Online] Disponible: <https://sites.google.com/site/enzineticupiig/bradford-y-dns>.
- [47] “Cromatografía de gases” , [Online] Disponible: <https://rua.ua.es/dspace/bitstream/10045/8247/4/T3gascromat.pdf>.
- [48] C. Gerstner, C. Bernal, N. Marsili, M. Maccari y M. Williner “Identificación y cuantificación de azúcares por cromatografía electrocinética micelar en fase reversa en leche modificada” *Revista FABICIB*, Vol 18, p.p. 11 a 22, 2014 [Online] Disponible: <https://www.redalyc.org/pdf/904/90424216002.pdf>
- [49] G. Urbaneja et al., “Hidrólisis ácida y caracterización de carbohidratos de la pulpa de café”, *Fac. Agron*, Vol 14, p.p 265-275, 1997
- [50] E. Camacho, E. Alarcon, J. Garcia y B. Gutierrez, “Pretratamiento químico e hidrólisis enzimática de la pulpa de café para obtención de azúcares reductores totales”, *ResearchGate*, Universidad Veracruzana, 2015.
- [51] R. Rodriguez, J. Laencina y J. Ros “Evaluation of coffee pulp as substrate for polygalacturonase production in solid state fermentation” *Emirates Journal of Food and Agriculture*. Vol 32, No 2, p.p 117-124, 2020 DOI: 10.9755/ejfa.2020.v32.i2.2068

- [52] K. Espinoza et al. “Extracción de azúcares reductores totales ART por métodos físicos y químicos de planta de *Zea mays* (Poaceae) “maíz amarillo duro” *Arnaldoa*, Vol 24, p.p. 289 - 300, 2017 [Online] Disponible: <http://www.scielo.org.pe/pdf/arnal/v24n1/a12v24n1.pdf>
- [53] W. Cortés, J. Ibla, L. Calderon y A. Herrera. “Cuantificación de azúcares reductores en las cáscaras de naranja y banano” *Dialnet*, Programa de Ingeniería Ambiental, Universidad El Bosque, Bogotá, Colombia, 2013.
- [54] C. Bardales, C. Rojas y C. León, “Evaluación de los principales residuos lignocelulósicos agroindustriales del departamento de La Libertad, Perú como potenciales materias primas para la obtención de bioetanol”, *Arnaldoa*, Vol 22, p.p. 225 - 232, 2015, ISSN: 1815-8242.
- [55] F. Gomes “Métodos secuenciales de pretratamiento químico y enzimático de residuos agrícolas para la producción de metano” Trabajo de grado, Instituto Potosino de Investigación Científica y Tecnológica A.C., 2008
[\[https://ipicyt.repositorioinstitucional.mx/jspui/bitstream/1010/624/3/TMIPICYTG8M42008.pdf\]](https://ipicyt.repositorioinstitucional.mx/jspui/bitstream/1010/624/3/TMIPICYTG8M42008.pdf)
- [56] L. Lázaro y J. Arauzo “Aprovechamiento de residuos de la industria de conservas vegetales. Hidrólisis enzimática” *Zubia*, Vol 12, p.p. 227-240, 1994
- [57] M. Carrillo, D. Cuevas, B. Alvarado, K. Morales y P. Bautista. “Obtención de biomasa a partir de cascarilla de café” Universidad Autónoma de San Luis Potosí, México, 2011 [Online] Disponible:
https://www.researchgate.net/publication/227433215_OBTENCION_DE_BIOMASA_A_PARTIR_DE_CASCARA_DE_CAFE
- [58] Y. Bolaños y V. Lagos, “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” Informe final de trabajo de grado, Universidad de Nariño, San Juan de Pasto, 2013.
- [59] D. Pleissner, et al. “Fermentative lactic acid production from coffee pulp hydrolysate using *Bacillus coagulans* at laboratory and pilot scales” *Journal Elsevier*, Volume 218, p.p. 167-173, October 2016, DOI: 10.1016/j.biortech.2016.06.078
- [60] G. Bolívar (2020) “Alcohol etílico: estructura, propiedades, usos, obtención” *Lifeder.com* [Online] Disponible: <https://www.lifeder.com/alcohol-etilico/>

- [61] M. Cortes, E. Gata, A. Pipió, A. Rodríguez y J. Sánchez “Biocombustibles: tipos y estrategias de producción.” Universidad de Sevilla [Online] Disponible: <https://www.upo.es/cms1/export/sites/upo/moleqlla/documentos/Numero35/Destacado-1.pdf>
- [62] “A study on bioethanol production from cashew apple pulp and coffee pulp waste” *Biomass and bioenergy*, Vol 35, p.p 4107-4111, 2011 DOI: 10.1016/j.biombioe.2011.05.016
- [63] E. Menezes, et al “Optimization of Alkaline Pretreatment of Coffee Pulp for Production of Bioethanol” *Wiley Online Library*, American Institute of Chemical Engineers, 2013 DOI: 10.1002/btpr.1856
- [64] N. Valencia “Producción de alcohol a partir de la pulpa de café” *Revista Cenicafé*, Vol 64, p.p 78-93, 2013 [Online] Disponible: <https://biblioteca.cenicafe.org/bitstream/10778/541/1/arc064%2802%2978-93.pdf>
- [65] R. Gurram, et al. “Technical possibilities of bioethanol production from coffee pulp: a renewable feedstock” *Clean Techn Environ Policy*, 2015 DOI: 10.1007/s10098-015-1015-9
- [66] T. Widjaja, et al. “The effect of pretreatment and variety of microorganisms to the production of ethanol from coffee pulp” *ARNP Journal of Engineering and Applied Sciences* Volume 11, Issue 2, 2016, p.p. 1056-1060
- [67] J. Sadhukhan, et al. “Economic and environmental impact evaluation of various biomass feedstock for bioethanol production and correlations to lignocellulosic composition” *Bioresource Technology Reports*, Vol 7, 2019, Article number 100230. DOI: 10.1016/j.biteb.2019.100230
- [68] K. Das, J. Garcia y M. Garcia “Revisión del concepto de biorefinería y oportunidades en el sector palmero” *PALMAS*, Vol. 28 No. Especial, Tomo 1, p.p. 61-69, 2007.
- [69] AEBIG-Asociación española de biogás. “Biorefinerías” [Online] Disponible: <https://www.aebig.org/biorefinerias/>

GLOSARIO

Cogollo: conjunto de las hojas interiores y apretadas de algunas plantas.

Roya: es una enfermedad en el cafeto causada por el hongo *Hemileia vastatrix* que se evidencia como un polvillo amarillo en el envés (cara principal) de la hoja. Esta enfermedad cíclica produce la caída prematura de las hojas de los árboles. Los estudios señalan que esta enfermedad causa la pérdida del 23% de la producción acumulada en cuatro cosechas.

Carbohidratos: son las moléculas orgánicas más ampliamente distribuidas en la naturaleza que almacenan energía en los seres vivos. Los mayores productores de carbohidratos en la naturaleza son los organismos capaces de realizar la fotosíntesis.

Monosacárido: son azúcares simples que tienen la siguiente fórmula $(CH_2O)_n$ y contienen de tres a siete átomos de carbono. Son moléculas que no se pueden hidrolizar y se oxidan fácilmente transformándose en ácidos.

Disacárido: son un tipo de hidratos de carbono formados por dos monosacáridos, iguales o distintos, unidos por un enlace O-glucosídico con pérdida de una molécula de agua. Estos al hidrolizarse dan lugar a los monosacáridos.

Enlaces glucosídicos: son los enlaces covalentes que se dan entre azúcares y otras moléculas. El enlace O-glucosídico es el enlace mediante el cual se unen monosacáridos para formar disacáridos o polisacáridos y el enlace N-glucosídico es el que se da entre un monosacárido y un compuesto aminado.

Grado de metoxilación: relación entre los grupos metoxilados y los ácidos libres que se presentan en la cadena molecular de la pectina.

Azúcares reductores: son las biomoléculas que pueden donar electrones a las moléculas con las que reaccionan, es decir se comportan como agentes reductores puesto que tienen en su estructura un grupo carbonilo ($C = O$).

Azúcares no reductores: son biomoléculas que no pueden actuar como agente reductor, dado que no poseen grupos de aldehídos o cetonas libres. Estas moléculas se unen mediante enlaces glucosídicos alfa o beta.

Biomasa: la biomasa es un conjunto de materias orgánicas que en términos de aprovechamiento energético se emplea como fuente de energía renovable, dado que su contenido energético proviene de la energía solar fijada en las plantas a través de la fotosíntesis.

Building blocks: es la base de intervención para la transformación productiva de una industria.