ANÁLISIS TEÓRICO DEL DESARROLLO DE BIOPLÁSTICOS BIODEGRADABLES PARA EMPAQUES NO ALIMENTARIOS DE USO AGRÍCOLA A PARTIR DE AGUAS RESIDUALES DE LA INDUSTRIA CAFICULTORA

ARNOLD DAVID VILLA CARRASCAL

UNIVERSIDAD POPULAR DEL CESAR, SECCIONAL AGUACHICA

DEPARTAMENTO DE CIENCIAS AGROINDUSTRIALES

PROGRAMA DE INGENIERIA AGROINDUSTRIAL

AGUACHICA, CESAR

2025

ANÁLISIS TEÓRICO DEL DESARROLLO DE BIOPLÁSTICOS BIODEGRADABLES PARA EMPAQUES NO ALIMENTARIOS DE USO AGRÍCOLA A PARTIR DE AGUAS RESIDUALES DE LA INDUSTRIA CAFICULTORA

ARNOLD DAVID VILLA CARRASCAL

DIRECTOR(A)

MAG. YINA PAOLA ORTEGA SANTIAGO

Trabajo de grado para optar al título de ingeniero agroindustrial

Línea de investigación:

Ctel desarrollo tecnológico e innovación industrial

UNIVERSIDAD POPULAR DEL CESAR, SECCIONAL AGUACHICA

DEPARTAMENTO DE CIENCIAS AGROINDUSTRIALES

PROGRAMA DE INGENIERIA AGROINDUSTRIAL

AGUACHICA, CESAR

2025

Tabla de contenido

1. RESUMEN 7
2. ABSTRACT 8
3. INTRODUCCIÓN 9
3.1. OBJETIVOS 12
3.2. MARCO TEÓRICO 13
3.2.1. Bioplásticos como alternativa sostenible frente al plástico convencional 13
3.2.2. Aguas residuales del beneficio húmedo del café 13
3.2.3. Compuestos orgánicos de las aguas residuales del café en la síntesis de bioplásticos 14
3.2.4. Métodos de extracción y transformación de compuestos útiles en la síntesis de bioplásticos 14
3.2.5. Aplicaciones potenciales de los bioplásticos en la industria agrícola 15
3.2.6. Viabilidad técnica y estándares normativos aplicables en la producción y uso de bioplásticos en contextos agrícolas 16
3.3. ANTECEDENTES DE LA INVESTIGACIÓN (ESTADO DEL ARTE) 18
4. DISEÑO METODOLOGICO 20
4.1. Tipo de investigación 20
4.1.1. Enfoque de la investigación 20
4.1.2. Alcance de la investigación 21
4.1.3. Diseño de la investigación 21
4.2. Población y muestra 22
4.2.1. Población: 22
4.2.2. Muestra: 23
4.3. Instrumentos de recolección de datos 23
4.4. Análisis y tabulación de datos 24
4.5. Métodos y procedimientos 25
Objetivo 1: Identificar los componentes claves presentes en las aguas residuales del beneficio húmedo del café con potencial para ser utilizados en la síntesis de bioplásticos. 25
Objetivo 2: Evaluar los métodos disponibles para la extracción y transformación de los compuestos claves presentes en las aguas residuales del beneficio húmedo del café, orientados a la síntesis eficiente de bioplásticos. 25

Objetivo 3: Determinar las aplicaciones potenciales de los bioplásticos producto de las aguas residuales del café en empaques para la industria agrícola, considerando sus propiedades técnicas y la viabilidad según estándares de calidad aplicables. 26
4.6. Hipótesis y variables 26
Objetivo 1 26
Objetivo 2 27
Objetivo 3 28
5. DESARROLLO DEL TEMA 29
5.1. Publicaciones por año 30
5.2. Publicaciones por autor 31
5.3. Publicaciones por países 34
5.4. Publicaciones por áreas temáticas 36
5.5. Relación entre palabras claves 38
5.6. Resultados 40
Objetivo 1: 40
Objetivo 2 52
Objetivo 3 69
5.7. Conclusiones 86
5.8. Recomendaciones 88
5.9. Agradecimientos 89
6. BIBLIOGRAFIA 90
7. ANEXOS 101
7.1. Anexo 1 101

Lista de Tablas

Tabla 1 Evaluación de viabilidad de los compuestos presentes en las aguas residuales del beneficio húmedo del café para la producción de bioplásticos biodegradables. 50
Tabla 2 Criterios y pesos para la evaluación de métodos de extracción y transformación. 59
Tabla 3 Matriz comparativa de métodos de extracción y transformación de compuestos del efluente caficultor. 62
Tabla 4 Participación de costos e insumos en etapas del proceso de bioconversión de biomasa lignocelulósica. 65
Tabla 5 Propiedades representativas de bioplásticos derivados o formulados con residuos del café o de sus componentes estructurales. 73
Tabla 6 Parámetros técnicos, respaldo normativo y objetivos prácticos. 77

Lista de Gráficos

Gráfica 1 Documentos científicos indexados en Web of Science según año de publicación. 30
Gráfica 2 Distribución de documentos científicos indexados en Web of Science según número de autores. 32
Gráfica 3 Mapa de red de coautoría por autores con codificación temporal (2012-2022). 33
Gráfica 4 Documentos científicos indexados en Web of Science según país de publicación (2025)..... 34
Gráfica 5 Distribución de documentos científicos indexados en Web of Science por áreas temáticas..... 36
Gráfica 6 Mapa de coocurrencia de palabras clave en la producción científica (2012-2022). 38
Gráfica 7 Flujograma conceptual de valorización de aguas residuales del café para producción de biopolímeros..... 84

RESUMEN

Las aguas residuales del beneficio húmedo del café representan un problema ambiental debido a su carga orgánica, pero también una oportunidad para aprovechar sus componentes en la producción de bioplásticos biodegradables destinados a aplicaciones agrícolas no alimentarias. En este estudio, se analizó su potencial como materia prima y las alternativas tecnológicas para su aprovechamiento. La investigación tuvo un enfoque mixto, alcance exploratorio-descriptivo y diseño no experimental transversal. Se realizó una revisión documental del periodo 2015-2025, apoyada en un análisis bibliométrico mediante VOSviewer. La información se organizó en matrices de análisis y se utilizó una matriz multicriterio ponderada para comparar alternativas de extracción y transformación. Los resultados identificaron los carbohidratos y los ácidos orgánicos como componentes de interés para procesos biotecnológicos encaminados a la obtención de polihidroxialcanoatos (PHA) y ácido poliláctico (PLA). Asimismo, se reconocieron alternativas de aprovechamiento y posibles aplicaciones en películas de acolchado, envases para fertilizantes y bandejas para plántulas. Sin embargo, su implementación depende de factores como los costos de producción, las propiedades mecánicas y las condiciones de biodegradación. El aprovechamiento de estas aguas residuales abre una posibilidad para desarrollar bioplásticos biodegradables destinados al sector agrícola y dar un nuevo uso a los residuos del beneficio del café, pero para llevar esta alternativa a la práctica, todavía es necesario comprobar su viabilidad mediante ensayos experimentales y evaluaciones económicas y ambientales, especialmente en las zonas cafeteras de Colombia.

Palabras clave: aguas residuales del café, bioplásticos biodegradables, beneficio húmedo, economía circular, empaques agrícolas, PHA, PLA.

ABSTRACT

Wastewater from wet coffee processing poses an environmental problem due to its high organic load, but it also offers an opportunity to use its components in the production of biodegradable bioplastics for non-food agricultural applications. This study analyzed its potential as a raw material and the technological alternatives available for its valorization. The research followed a mixed-methods approach, with an exploratory-descriptive scope and a non-experimental cross-sectional design. A documentary review covering the period from 2015 to 2025 was conducted, supported by bibliometric analysis using VOSviewer. The information was organized into analytical matrices, and a weighted multi-criteria matrix was used to compare extraction and transformation alternatives. The results identified carbohydrates and organic acids as promising components for biotechnological processes aimed at producing polyhydroxyalkanoates (PHA) and polylactic acid (PLA). Potential applications were also identified in agricultural mulch films, fertilizer packaging, and seedling trays. However, their implementation depends on factors such as production costs, mechanical properties, and biodegradation conditions. The use of this wastewater offers a potential pathway for developing biodegradable bioplastics for agricultural applications while giving coffee-processing residues a new purpose. However, experimental testing and economic and environmental assessments are still needed to determine the feasibility of this approach, particularly in Colombia's coffee-growing regions.

Keywords: coffee wastewater, biodegradable bioplastics, wet coffee processing, circular economy, agricultural packaging, PHA, PLA.

1. INTRODUCCIÓN

La producción de café es una de las principales actividades económicas en Colombia, reconocida por su relevancia en la exportación y en la generación de empleo. No obstante, enfrenta desafíos ambientales significativos, especialmente en el manejo de los recursos hídricos (Cotes, 2025). Uno de los mayores problemas es el alto consumo de agua en el proceso de beneficio húmedo del café. Según Rodríguez Valencia et al. (2015), el método tradicional de beneficio húmedo emplea aproximadamente 40 litros de agua por cada kilogramo de café pergamino seco (cps), generando un efluente con alta carga de compuestos orgánicos e inorgánicos. Esta composición lo convierte en un contaminante más agresivo que las aguas residuales urbanas, y si no es tratado adecuadamente, puede afectar las fuentes de agua potable, los ecosistemas acuáticos y la calidad del suelo (Cronon., 2020a).

La contaminación de los cuerpos de agua, además, repercute en la biodiversidad, en la economía y en la calidad de vida de las comunidades locales. Esta situación compromete la sostenibilidad de la industria cafetalera, sobre todo en mercados donde la responsabilidad ambiental es un criterio cada vez más exigente (Fernández-Cortés et al., 2020).

En Colombia, el Decreto 3930 de 2010 establece límites para los vertimientos de efluentes, buscando prevenir y controlar la contaminación hídrica. Este marco legal ha impulsado la adopción de tecnologías más limpias, como BECOLSUB y ECOMILL, desarrolladas por Cenicafé, las cuales mejoran la eficiencia en el manejo de subproductos de la industria caficultora (Ministerio de Ambiente, 2010; Oliveros-Tascón et al., 2013). Sin embargo, la implementación de estas tecnologías se ve limitada por los altos costos iniciales

para la compra de estos equipos y mantenimiento, lo que dificulta su acceso a pequeños productores.

Entre las estrategias emergentes para la valorización de residuos del café se encuentra la producción de bioplásticos biodegradables, los cuales han sido objeto de estudio en la última década. Investigaciones recientes han demostrado que si se puede desarrollar bioplásticos a partir del beneficio seco del café, como la cascarilla, el mucilago y los residuos de café tostado, teniendo un gran potencial en aplicaciones industriales (Duarte Betancur & Granada Sacristán, 2024). Aunque gran parte de la literatura se ha centrado en estos subproductos sólidos, las aguas residuales del beneficio húmedo del café contienen compuestos orgánicos y polisacáridos aprovechables para producir bioplásticos. Aun así, los estudios sobre este enfoque son limitados, lo que abre una oportunidad de investigación dentro de los marcos de la economía circular y la biotecnología.

En relación con esto, la presente monografía está enfocada en un análisis teórico de la viabilidad del uso de aguas residuales de la industria caficultora en la producción de bioplásticos biodegradables. Se recopilará y examinará información científica y técnica acerca de sus componentes aprovechables y de las tecnologías disponibles para su transformación. Dado que la investigación no incluye experimentación, el análisis se centrará en identificar compuestos de interés, rutas tecnológicas y posibles aplicaciones en empaques agrícolas no alimentarios. Además, la información generada podría ser útil para sectores con problemáticas similares en la gestión de residuos, como la industria cacaotera, la de aceite de palma y la industria láctea, contribuyendo a generar una base sólida de conocimiento que impulse materiales sostenibles y reduzca el impacto ambiental del sector cafetero.

En este contexto, surge la siguiente pregunta de investigación:

¿Cuál es el potencial de los compuestos presentes en las aguas residuales del beneficio húmedo del café para ser utilizados en la síntesis de bioplásticos biodegradables, y qué tan viable sería su aplicación en empaques agrícolas no alimentarios según criterios técnicos y normativos existentes?

1.1. OBJETIVOS

OBJETIVO GENERAL: Analizar, desde una perspectiva teórica, el uso de aguas residuales generadas en la industria caficultora para la producción de bioplásticos biodegradables para empaques no alimentarios de uso agrícola.

OBJETIVOS ESPECIFICOS

a) Identificar los componentes claves presentes en las aguas residuales del beneficio húmedo del café con potencial para ser utilizados en la síntesis de bioplásticos.
b) Evaluar los métodos disponibles para la extracción y transformación de los compuestos claves presentes en las aguas residuales del beneficio húmedo del café, orientados a la síntesis eficiente de bioplásticos.
c) Determinar las aplicaciones potenciales de los bioplásticos producto de las aguas residuales del café en empaques para la industria agrícola, considerando sus propiedades técnicas y la viabilidad según estándares de calidad aplicables.

1.2. MARCO TEÓRICO

1.2.1. Bioplásticos como alternativa sostenible frente al plástico convencional

Los bioplásticos han surgido como una alternativa frente al impacto ambiental que genera el uso masivo de plásticos convencionales derivados del petróleo. Estos materiales se caracterizan por estar elaborados a partir de fuentes renovables y, en la mayoría de los casos, por su capacidad de biodegradarse bajo condiciones específicas. Según European Bioplastics (2022), los bioplásticos incluyen tanto plásticos de base biológica como plásticos biodegradables, lo que ha permitido ampliar su campo de aplicación y desarrollo.

Los tipos más comunes de bioplásticos son aquellos producidos a partir de polisacáridos como el almidón y la celulosa, y otros sintetizados por microorganismos, como los poliésteres tipo polihidroxialcanoatos (PHA). Aunque parte de su aplicación ha sido impulsada en reducir los residuos que contienen contaminantes orgánicos persistentes (COP), y aportar a la economía circular, estos materiales enfrentan desafíos técnicos y económicos, como su poca resistencia en ciertos usos, costos de producción más altos que los plásticos tradicionales y la escasa infraestructura para su disposición final (Haider et al., 2018).

A pesar de que los bioplásticos no representan aún una solución definitiva, si establecen una línea de desarrollo que podría adaptarse progresivamente a ciertos sectores, especialmente aquellos donde la sostenibilidad y el aprovechamiento de residuos orgánicos resulten técnicamente viables.

1.2.2. Aguas residuales del beneficio húmedo del café

El proceso del beneficio húmedo del café es una práctica común en países productores de este fruto, especialmente en Latinoamérica. Este método, si bien garantiza una alta calidad del grano, genera grandes volúmenes de aguas residuales, llegando a utilizar

hasta 40 L/kg de café pergamino seco (cps).

Las aguas resultantes presentan una elevada carga orgánica, acidez y contenido de sólidos en suspensión como restos de mucílago, cáscara, azúcares, compuestos fenólicos y cafeína, lo que las convierte en una fuente de contaminación significativa para los cuerpos hídricos cercanos. Su concentración de demanda biológica de oxígeno (DBO) y demanda química de oxígeno (DQO) puede superar ampliamente los límites permisibles para vertimientos, generando impactos como la eutrofización y la degradación de ecosistemas acuáticos cercanos (Torres-Valenzuela et al., 2019).

1.2.3. Compuestos orgánicos de las aguas residuales del café en la síntesis de bioplásticos

Los componentes de la materia orgánica presente en las aguas residuales del beneficio húmedo del café como azúcares fermentables, ácidos orgánicos y residuos lignocelulósicos pueden ser empleados como sustrato en procesos de fermentación o extracción química para la producción de compuestos base usados en bioplásticos.

Según Gricel & Itzel, (2022), la celulosa extraída de la cascarilla de café ha demostrado ser una fuente viable para la elaboración de bioplásticos, debido a su alta pureza y rendimiento en la extracción, alcanzando un 88.80% de a-celulosa y un rendimiento del 32.75% en peso seco. La caracterización fisicoquímica de estos residuos agroindustriales indica que poseen propiedades adecuadas para su transformación en materiales biodegradables, representando una alternativa sostenible para la valorización de subproductos del café (Sampieri et al., 2022).

1.2.4. Métodos de extracción y transformación de compuestos útiles en la síntesis de bioplásticos

La eficiencia en la producción de bioplásticos a partir de subproductos

agroindustriales depende en gran parte de la selección de los métodos adecuados para la extracción y transformación de estos compuestos. En el caso de las aguas residuales del café, los procesos deben adaptarse a una matriz compleja que contiene azúcares, polisacáridos, ácidos orgánicos y lignina, lo cual exige técnicas de separación selectiva y de bajo impacto ambiental (Torres-Valenzuela et al., 2019; Silva Vargas & Soler Londoño, 2024).

Para la extracción de polisacáridos como celulosa o hemicelulosa, se emplean tratamientos fisicoquímicos que incluyen pretratamientos con álcalis, autohidrólisis y tecnologías de ultrasonido o microondas, los cuales permiten mejorar la disponibilidad de estos compuestos para su posterior modificación o síntesis. Schmitz et al. (2021), demostró que un pretratamiento combinado de ultrasonido y alcalino puede solubilizar eficientemente la hemicelulosa de las cáscaras de avena, logrando una solubilización del 72% de toda la hemicelulosa presente en estas. Por otro lado, los procesos fermentativos son muy utilizados para la conversión de estos azucares presentes en las aguas mieles, en compuestos como ácido láctico o PHA, aprovechando así los azucares fermentables que se obtienen después de ciertos tratamientos previos.

1.2.5. Aplicaciones potenciales de los bioplásticos en la industria agrícola

Los bioplásticos obtenidos a partir de fuentes residuales tienen un potencial prometedor en el sector agrícola, debido a que esta industria demanda materiales biodegradables y con bajo impacto ambiental. Estos materiales pueden ser utilizados en la fabricación de bolsas para viveros, films de acolchado para cobertura de cultivos, macetas biodegradables y sistemas de encapsulación de fertilizantes o semillas, entre otros usos que buscan reducir la dependencia de plásticos derivados del petróleo (Briassoulis & Dejean, 2010).

Es así, como la funcionalidad de los bioplásticos deben cumplir con ciertos criterios técnicos para ser viables, como resistencia mecánica, estabilidad térmica, permeabilidad controlada y biodegradabilidad según las condiciones de uso. La norma UNE-EN 17033:2018, establece las directrices técnicas relevantes sobre las propiedades y el comportamiento esperado de estos materiales, específicamente para los films acolchados, exigiendo que estos se degraden en los suelos sin causas impactos ambientales negativos (Asociación Española de Normalización, 2018).

Además, el uso agrícola de estos materiales se vincula directamente con los principios de la economía circular, al cerrar el ciclo de los residuos agroindustriales dentro del mismo sistema productivo del cual provienen. Según Hernández Amaya (2020), este enfoque permite no solo disminuir los impactos ambientales generados por la gestión inadecuada de estos residuos, sino también aportar valor agregado a través de nuevas líneas de productos sostenibles.

1.2.6. Viabilidad técnica y estándares normativos aplicables en la producción y uso de bioplásticos en contextos agrícolas

Desde el punto de vista técnico, la variación de la composición de las aguas residuales del café, afectada por factores como la variedad del grano, las prácticas de cultivo y el proceso de beneficio, dificulta la estandarización de procesos para la obtención de bioplásticos. Sumado a esto, la necesidad de tecnologías específicas para la extracción y transformación de los compuestos, como polisacáridos y ácidos orgánicos, requiere grandes inversiones en investigación y desarrollo para adaptar y optimizar estos procesos a las características de este tipo de residuos líquidos.

Económicamente, los bioplásticos aún presentan costos de producción más altos en comparación con los plásticos convencionales. Esto se debe, en parte, a la baja producción

y a la necesidad de infraestructuras especiales para su fabricación. Según un informe de Coherent Market Insights (2024), los altos costos de producción y las grandes inversiones iniciales limitan la competitividad de los bioplásticos frente a los plásticos convencionales en el mercado global.

Por otro lado, en el ámbito regulatorio, las pocas normativas específicas en países como Colombia para el uso de bioplásticos en la agricultura limita su adopción. Uno de los principales problemas es la ausencia de laboratorios acreditados en el país para realizar pruebas de biodegradación y compostabilidad, esto obliga a que las empresas recurran a laboratorios internacionales, encareciendo y ralentizando el proceso de certificación (Almatia, 2024).

A pesar de todo esto, existen oportunidades para avanzar dentro de este campo. Proyectos como ALACEN, una iniciativa conjunta entre la Universidad de Groningen, Países Bajos, y el CONICET, Argentina, han demostrado la viabilidad de transformar residuos agroindustriales, como cañas, rastrojo de maíz, paja de trigo y bagazo de caña de azúcar, en bioplásticos y compuestos biodegradables de alto valor comercial, contribuyendo a la economía circular y promoviendo la utilización de materiales desechados (Bertran-Llorens et al., 2024).

1.3. ANTECEDENTES DE LA INVESTIGACIÓN (ESTADO DEL ARTE)

En las últimas décadas, el aprovechamiento de residuos agroindustriales para generar algo útil o con valor económico ha impulsado investigaciones orientadas hacia la economía circular, especialmente en el desarrollo de materiales alternativos como los bioplásticos que no solo tienen la capacidad de degradarse bajo ciertas condiciones, sino que pueden ser producidos a partir de fuentes renovables, como almidones, celulosa, ácidos orgánicos o residuos agroindustriales. Este punto de vista fomenta la valorización de subproductos, aportando así soluciones alternativas frente a el uso excesivo de plásticos convencionales que amenazan la vida silvestre, el clima y la salud humana (Santana, 2023; United Nations Environment Programme, 2023).

Uno de los residuos poco explorados son las aguas residuales del beneficio húmedo del café, cuya composición puede variar según la variedad del grano, el grado de madurez del fruto, las prácticas agrícolas y las condiciones del proceso (Pérez et al., 2023). Estas contienen compuestos como ácidos orgánicos, azucares y polisacáridos, que pueden servir para la síntesis de bioplásticos.

La caracterización de estas aguas ha pasado de simples descripciones sobre su carga orgánica (Aguilera et al., 1998) a análisis más precisos que evidencian variaciones en pH, solidos suspendidos y composición química según la etapa del proceso (Pineda, 2022). Este avance ha abierto la puerta a métodos para extraer compuestos de interés.

En investigaciones recientes, se han aplicado técnicas térmicas y enzimáticas para extraer polisacáridos como pectina y celulosa, permitiendo conservar la estructura funcional, como en el caso del estudio de Rengifo Álava et al. (2019) donde utilizan la cascara de cacao como materia prima parta extraer pectinas con características funcionales similares a las comerciales. Para ácidos orgánicos como el acético, láctico o succínico, se

han encontrado procesos que combinan fermentación controlada, microfiltración y extracción con solventes verdes, así es el caso de Silva Vargas & Soler Londoño, (2024) en su estudio sobre la producción de ácido láctico a partir de la fermentación de biomasa celulósica del afrecho de malta.

Asimismo, estudios como el de Zhang & Bao (2024) evidencian que azúcares simples como glucosa y fructosa pueden transformarse en monómeros para bioplásticos como el poliácido láctico (PLA), mientras que otros componentes, como la celulosa y hemicelulosa, mediante hidrólisis controlada, pueden ser transformados en alcoholes o ácidos con aplicaciones industriales.

En cuanto a la aplicación de bioplásticos en la industria agrícola, Campanale et al. (2023) destacan su uso como alternativa a los plásticos convencionales en actividades como el envasado de fertilizantes, semilleros y acolchados. La posibilidad de fabricar empaques biodegradables a partir de residuos como los del café se plantea como una vía para avanzar hacia un diseño de producción más sostenible, en línea con los principios de bioeconomía local (Campanale et al., 2023).

Sin embargo, para que estos materiales sean adecuados en aplicaciones agrícolas, deben cumplir con requisitos como resistencia mecánica, estabilidad frente a la humedad, biodegradabilidad controlada y compatibilidad con los productos que contienen. Revisiones como la de Dutta & Sit, (2024) han demostrado que los biopolímeros derivados de ácidos orgánicos y polisacáridos pueden ajustarse a estas necesidades mediante mezclas, aditivos o modificaciones en su proceso de síntesis.

2. DISEÑO METODOLOGICO

Este diseño metodológico establece el enfoque estructurado para analizar el uso potencial de aguas residuales generadas en el beneficio húmedo del café para la producción de bioplásticos no alimentarios en el sector agrícola. La metodología se organizó bajo el enfoque mixto de carácter documental, seleccionando el tipo de investigación adecuado y definiendo la población y muestra, los instrumentos de recolección de datos, el análisis y la tabulación de la información recolectada, así como las hipótesis y variables relevantes. De esta manera, se garantizó un análisis teórico aplicado que respondió directamente a los objetivos de la investigación sin realizar mediciones experimentales propias.

2.1.Tipo de investigación

2.1.1. Enfoque de la investigación

El enfoque metodológico adoptado en esta investigación fue de carácter mixto, pues brindó la posibilidad de integrar tanto elementos cualitativos como cuantitativos a partir del análisis de información secundaria existente en la literatura científica, lo que favoreció una comprensión más amplia del tema estudiado. Esta elección respondió a la necesidad de analizar el tema desde dos perspectivas importantes:

1. Cuantitativa: orientada a identificar y medir los componentes químicos presentes en las aguas residuales del beneficio húmedo del café (objetivo 1)
2. Cualitativa: enfocada en evaluar los métodos de extracción y transformación de dichos componentes (objetivo 2), así como en explorar sus posibles aplicaciones dentro del sector agrícola (objetivo 3)

Como lo señalan Creswell et al. (2014), el enfoque mixto se caracteriza por articular datos numéricos (cuantitativos) con interpretaciones contextuales (cualitativas), ofreciendo

así una perspectiva integral al problema de investigación. En este mismo sentido, Hernández Sampieri et al. (2014) destacan que dicha combinación permite no solo obtener resultados técnicos medibles, sino también interpretaciones prácticas que enriquecen el análisis. De esta manera, se logra contextualizar los resultados entorno a los componentes claves para la síntesis de bioplásticos y su potencial aplicación en la agroindustria.

2.1.2. Alcance de la investigación

El alcance de esta investigación fue exploratorio y descriptivo, dado que en una primera etapa se buscó comprender, desde un enfoque teórico, cómo podían aprovecharse las aguas residuales del beneficio húmedo del café en la producción de bioplásticos biodegradables.

El alcance exploratorio se consideró pertinente, dado que el estudio aborda un tema novedoso y poco estudiado en Colombia, especialmente en lo que está relacionado con el uso de los compuestos presentes en estas aguas para crear materiales alternativos. Este tipo de análisis permitió dar un primer vistazo al problema, detectar lo que aún no se conoce y abrir el camino a futuras investigaciones. A su vez, el carácter descriptivo de la investigación permitió detallar qué componentes claves están presentes en estas aguas, cómo podrían extraerse y transformarse, y qué tan viables serían - desde el punto de vista técnico - para fabricar empaques no alimentarios de uso agrícola, en línea con lo planteado en el tercer objetivo específico de la investigación (Capítulo 4 Sampieri., 2012).

2.1.3. Diseño de la investigación

El diseño metodológico adoptado fue no experimental y transversal, ya que no se manipularon directamente las variables y el análisis se basó en la información recolectada en un único momento (2025).

El diseño no experimental se caracteriza por observar y analizar los datos sin alterar el entorno ni las condiciones naturales de los fenómenos estudiados (Argote Pérez et al., 2010). Este enfoque resultó pertinente en esta investigación, pues el interés principal fue examinar la información existente sobre los componentes químicos de las aguas residuales y el potencial que podrían tener estos en la síntesis de bioplásticos, sin intervenir en los procesos industriales actuales. Además, el diseño transversal permitió obtener una visión actual del fenómeno, lo que facilitó obtener conclusiones relevantes enmarcadas con esta investigación.

2.2. Población y muestra

2.2.1. Población:

La población considerada en esta investigación estuvo conformada por la totalidad de documentos científicos, artículos académicos, informes técnicos y estudios previos relacionados específicamente con el tema de aguas residuales del beneficio húmedo del café y los bioplásticos biodegradables, especialmente aquellos orientados a su aplicación en empaques agrícolas no alimentarios.

En este caso, la población correspondió a 113.030 documentos científicos encontrados en diversas fuentes confiables, distribuidos de la siguiente manera: Web of Science con 111.206 documentos, Scielo con 13, Google Scholar con 1.720 y ScienceDirect con 91, usando una ecuación de búsqueda con operadores booleanos, diseñada para maximizar la relevancia de los resultados: Sewage OR wet coffee benefit AND Bioplastic OR biodegradables OR agricultural packaging.

2.2.2. Muestra:

La selección de la muestra se llevó a cabo mediante un análisis bibliométrico utilizando la herramienta VOSviewer, la cual permitió identificar y representar gráficamente las relaciones significativas entre las palabras claves y autores en la literatura científica, a partir de los resultados obtenidos con la ecuación de búsqueda definida en la población.

De los documentos hallados en las diferentes bases de datos, se seleccionó como fuente principal Web of Science, por ser la fuente con mayor número de resultados (111.206 documentos) y por su alta rigurosidad académica. Los resultados obtenidos fueron exportados en formato .RIS, compatible con VOSviewer, lo que posibilitó la construcción de mapas de coocurrencia con palabras claves.

Seguidamente, se filtraron los 10 autores más citados o con mayor número de producción científica relacionada directamente con los objetivos del estudio. A partir de estos, se realizó la selección final de documentos, considerando los publicados en los últimos diez años (2015-2025), con el fin de asegurar información actual y pertinente. Asimismo, se dio prioridad a publicaciones en español e inglés, asegurando tanto la comprensión como la validez en el marco de la investigación (Van Eck & Waltman, 2009).

2.3. Instrumentos de recolección de datos

Para garantizar una recolección de información confiable y de calidad, se usó un método basado en la revisión detallada de los artículos, publicaciones y demás documentos encontrados en las bases de datos previamente señaladas, específicamente aquellos que hablaban sobre el aprovechamiento de aguas residuales del café en la producción de bioplásticos biodegradables (Mamani Gutiérrez, 2022).

Como parte de este proceso, se implementó un protocolo de control de calidad que

estableció los criterios de inclusión y exclusión de los documentos, considerando únicamente los que se relacionaban directamente con los objetivos de la investigación, que eran de tipo académico o técnico, y que fueran sido publicados entre los años 2015-2025. Adicionalmente, se integró el uso del software VOSviewer, el cual permitió la identificación de patrones y conexiones claves en el campo de estudio, facilitando así una interpretación más estructurada de la información recopilada.

2.4. Análisis y tabulación de datos

Los documentos seleccionados fueron organizados en una matriz de análisis elaborada en Excel, en la cual se registró información clave como: autor(es), año de publicación, título del estudio, aporte al tema, observaciones generales y fuente (para más información, ver Anexo 1).

Esta sistematización permitió clasificar y comparar la información recopilada, tomando como referencia tres ejes principales:

- Contextualización: aspectos relacionados con materias primas y procesos.
- Metodología: procedimientos, técnicas y pretratamientos empleados.
- Resultados: hallazgos relevantes, enfoques tecnológicos e innovaciones asociadas.

De esta forma, el análisis facilitó la identificación de patrones, tendencias y enfoques que resulten significativos para el desarrollo del estudio.

2.5. Métodos y procedimientos

Objetivo 1: Identificar los componentes claves presentes en las aguas residuales del beneficio húmedo del café con potencial para ser utilizados en la síntesis de bioplásticos.

El primer objetivo se desarrolló en tres etapas consecutivas. En la primera etapa, se buscó, leyó y seleccionó todo lo relevante (tanto teórico como práctico) sobre la composición química de las aguas residuales generadas durante el proceso de beneficio húmedo del café, considerando las características generales del lixiviado, tales como el contenido de materia orgánica, ácidos, polisacáridos y otros compuestos bioactivos. Posteriormente, en la segunda etapa, se procedió a clasificar los compuestos identificados con base en criterios técnicos definidos como la capacidad de formar polímeros, biodegradabilidad y abundancia, clasificación que se hizo a través de un análisis cualitativo comparativo teniendo en cuenta la aplicabilidad de estos en la síntesis de bioplásticos y, finalmente, la tercera etapa consistió en un análisis más profundo, donde se seleccionaron los compuestos de mayor viabilidad técnica para el desarrollo de bioplásticos, considerando su aplicabilidad práctica y el respaldo de estudios e investigaciones.

Objetivo 2: Evaluar los métodos disponibles para la extracción y transformación de los compuestos claves presentes en las aguas residuales del beneficio húmedo del café, orientados a la síntesis eficiente de bioplásticos.

El desarrollo del segundo objetivo consistió inicialmente, en identificar tecnologías aplicables mediante una revisión documental, considerando técnicas como precipitación química, filtración por membranas, hidrólisis enzimática y fermentación. Luego, se realizó una comparación de estos métodos en una matriz multicriterio construida en Excel (ver Tabla 2), con base en criterios de eficiencia de recuperación, pureza del compuesto extraído y requerimientos técnicos. A cada criterio se le asignó un peso y cada método fue calificado en una escala de 1 a 5, lo que permitió una comparación objetiva entre ellos y, para finalizar,

con base en los puntajes obtenidos se seleccionaron los métodos más prometedores para su implementación teórica en el sector agroindustrial, teniendo en cuenta su compatibilidad con los residuos del café y la sostenibilidad del proceso.

Objetivo 3: Determinar las aplicaciones potenciales de los bioplásticos producto de las aguas residuales del café en empaques para la industria agrícola, considerando sus propiedades técnicas y la viabilidad según estándares de calidad aplicables.

Para abordar este último objetivo, se inició haciendo una recopilación de información sobre las propiedades técnicas de bioplásticos que se han obtenido a partir de componentes similares a los presentes en las aguas residuales del café, incluyendo parámetros como resistencia mecánica, biodegradabilidad, permeabilidad y estabilidad térmica (ver Tabla 5). Así, se pudieron comparar dichas propiedades con los requisitos técnicos de los empaques agrícolas no alimentarios, como envolturas para plántulas, bolsas para fertilizantes orgánicos, coberturas biodegradables y films acolchados, tomando como referencias normativas internacionales vigentes como la ASTM D5338, ASTM D882, ASTM D6400 e ISO 17088 (ver Tabla 6) y, para terminar, se determinó la viabilidad de su aplicación en áreas agrícolas específicas, considerando factores como el tipo de uso, las condiciones del entorno y la durabilidad esperada.

2.6. Hipótesis y variables

Nota: Todas las variables y datos numéricos que se mencionan en esta monografía provienen de información secundaria recopilada de fuentes científicas y técnicas existentes. No se realizaron mediciones experimentales propias.

Objetivo 1

Para el primer objetivo, se planteó la siguiente hipótesis de investigación, la cual fue evaluada mediante el análisis bibliográfico y documental: *“En las aguas residuales*

generadas por el beneficio húmedo del café, existen compuestos químicos identificables con características funcionales que permiten su aprovechamiento en la síntesis de bioplásticos biodegradables."

Las variables fueron:

Variable independiente: Composición química de las aguas residuales del café.

Variable dependiente: Potencial de los compuestos para la síntesis de bioplásticos.

Variables cualitativas específicas: Tipo de compuesto (ácido, polisacárido, lignina, etc.), función biológica, compatibilidad con procesos de polimerización.

Variables cuantitativas específicas: Concentración de compuestos (mg/L), DBO, DQO, pH, entre otros.

Objetivo 2

Para el segundo objetivo, se planteó la siguiente hipótesis, basada en la revisión de literatura científica y técnica: *"Los métodos de extracción y transformación como la precipitación química, la hidrólisis enzimática y la fermentación presentan una alta eficiencia de recuperación y viabilidad técnica para obtener compuestos con potencial para su uso en la síntesis de bioplásticos biodegradables a partir de las aguas residuales del beneficio húmedo del café."*

Las variables fueron:

Variable independiente: Tipo de método de extracción y transformación utilizado.

Variable dependiente: Eficiencia y viabilidad del método para obtener compuestos útiles en la síntesis de bioplásticos.

Variables cualitativas específicas: Tipo de tecnología utilizada, nivel de tecnificación,

compatibilidad con las características fisicoquímicas del agua residual.

Variables cuantitativas específicas: Rendimiento de extracción (%), pureza del compuesto extraído.

Objetivo 3

Para el tercer objetivo, se planteó la siguiente hipótesis, sustentada en la revisión de estudios previos y normas técnicas vigentes: *"Los bioplásticos producidos a partir de compuestos extraídos de las aguas residuales del café presentan propiedades técnicas (respaldadas por estudios previos según la teoría) que los hacen viables para su uso en empaques agrícolas no alimentarios. Estas propiedades incluyen resistencia mecánica adecuada, biodegradabilidad comprobada y estabilidad térmica compatible con las condiciones de uso agrícola, basado en normativas técnicas como ASTM D882, ASTM D5338 e ISO 17088."*

Las variables fueron:

Variable independiente: Propiedades técnicas del bioplástico (según el compuesto base y el método de síntesis).

Variable dependiente: Viabilidad de aplicación del bioplástico en empaques agrícolas no alimentarios, teniendo en cuenta su funcionalidad y cumplimiento de normativas.

Variables cualitativas específicas: Tipo de aplicación (envolturas, films, bolsas de cultivo), compatibilidad con condiciones agrícolas (humedad, temperatura), normativas de referencia (ASTM D882, D5338, D6400, ISO 17088).

Variables cuantitativas específicas: Resistencia mecánica (MPa), tiempo de degradación (días), permeabilidad (g/m^2/día), tolerancia a humedad (%).

3. DESARROLLO DEL TEMA

Antes de abordar el desarrollo específico de los objetivos planteados, se realizó un análisis bibliométrico con el propósito de examinar el estado actual de la producción científica relacionada con el aprovechamiento de las aguas residuales del beneficio húmedo del café y su potencial en la elaboración de bioplásticos biodegradables. Esta etapa permitió identificar las principales tendencias de investigación, los autores más relevantes, las regiones con mayor actividad científica y las áreas temáticas de mayor interés académico.

El análisis se llevó a cabo mediante el uso del software VOSviewer, a partir de los registros bibliográficos obtenidos en la base de datos Web of Science. La búsqueda inicial arrojó un total de 111.206 documentos. Seguidamente se aplicaron criterios de inclusión y exclusión, considerando aspectos como el periodo de publicación y el tipo de documento, limitando los resultados a artículos científicos y revisiones. Asimismo, se seleccionaron aquellos estudios que estuvieran directamente relacionados con la producción de biopolímeros, la valorización de residuos agroindustriales y el aprovechamiento de subproductos de la industria cafetera. De igual manera, se descartaron documentos que no abordaban procesos biotecnológicos de conversión de biomasa, publicaciones duplicadas, trabajos con acceso incompleto o estudios cuya temática no presentaba relación directa con el desarrollo de bioplásticos o el aprovechamiento de residuos del café. Tras este proceso de filtrado se obtuvo un subconjunto de aproximadamente 10.000 documentos para su procesamiento bibliométrico, los cuales fueron exportados en formato .RIS para su análisis en el software. Los resultados se presentan en forma de gráficas y mapas de coocurrencia que evidencian las relaciones entre autores, temas y palabras claves.

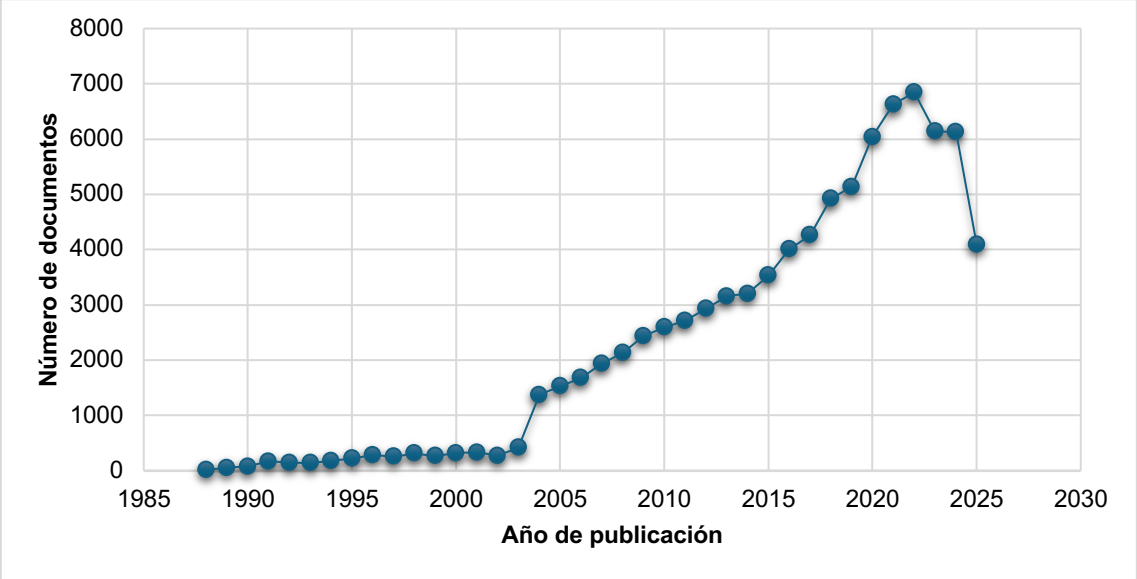
Como siguiente paso, se elaboró una matriz en Excel para organizar los documentos correspondientes a los diez autores con mayor producción científica identificados en el análisis bibliométrico, lo cual facilitó la clasificación, revisión y comparación de la información relevante (ver Anexo 1).

3.1. Publicaciones por año

En la Gráfica 1 se observa la tendencia en la producción científica relacionada con el aprovechamiento de las aguas residuales del beneficio húmedo del café y la obtención de bioplásticos biodegradables.

Gráfica 1

Documentos científicos indexados en Web of Science según año de publicación.



Nota. Elaboración propia con base en datos de *Web of Science* (2025).

Durante las décadas de los noventa y hasta principios de los años 2000, las publicaciones fueron escasas, con valores inferiores a los 200 documentos por año, lo que sugiere que el tema apenas comenzaba a recibir atención científica. A partir de 2005 se observa una tendencia ascendente sostenida, y este crecimiento se intensifica de forma

marcada a partir de 2015, alcanzando un pico entre 2021 y 2023. Este incremento coincide con el aumento global del interés en bioplásticos y materiales biodegradables; por ejemplo, un estudio bibliométrico reciente reporta un crecimiento anual de aproximadamente 13.55 % en la producción científica sobre bioplásticos desde 1990 hasta 2023, reflejo de la transición mundial hacia economías más circulares y sostenibles (Nnolim & Nwodo, 2025).

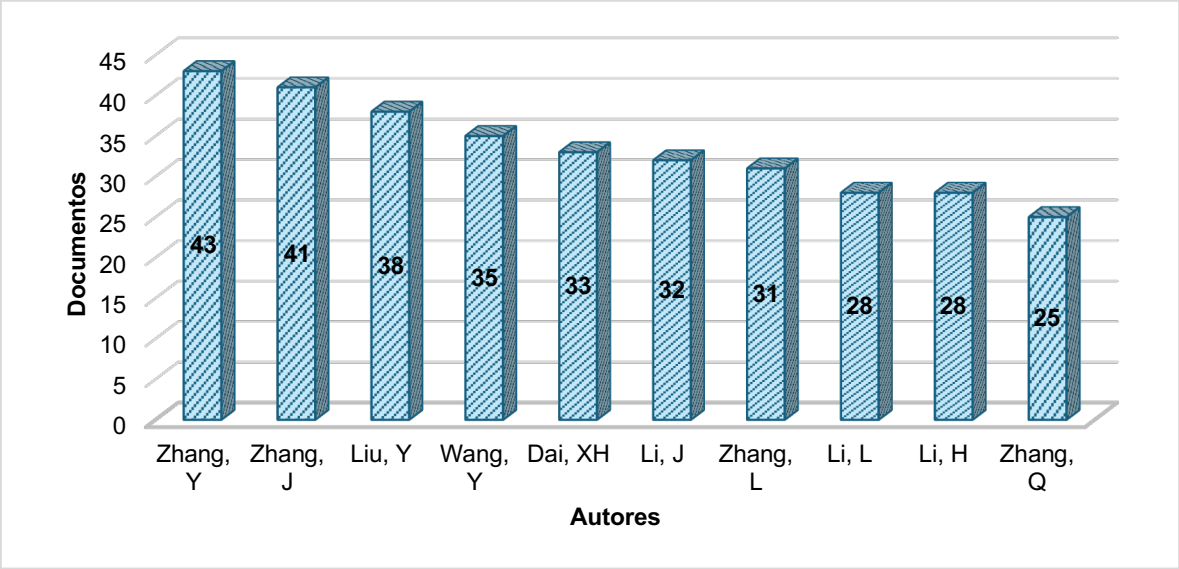
Este repunte no solo refleja un mayor número de investigaciones, sino también una creciente diversificación temática y geográfica en este campo, impulsada por regulaciones ambientales más estrictas, mayor conciencia pública sobre la contaminación plástica y la búsqueda de alternativas sostenibles basadas en residuos agrícolas. No obstante, tras el pico registrado en 2022, se observa una ligera caída en los años posteriores, lo cual podría atribuirse a la diversificación de líneas de investigación dentro del tema (por ejemplo, el aprovechamiento de otros subproductos agroindustriales distintos al café), a una posible saturación del tema o a variaciones en los procesos de indexación de documentos en las bases de datos científicas.

3.2. Publicaciones por autor

El análisis de publicaciones por autor permitió identificar a los investigadores con mayor aporte en este campo de estudio. Además, facilitó reconocer las tendencias de colaboración y las redes científicas que impulsan el desarrollo de esta línea de investigación a nivel global.

Gráfica 2

Distribución de documentos científicos indexados en Web of Science según número de autores.



Nota. Elaboración propia con base en datos de *Web of Science* (2025).

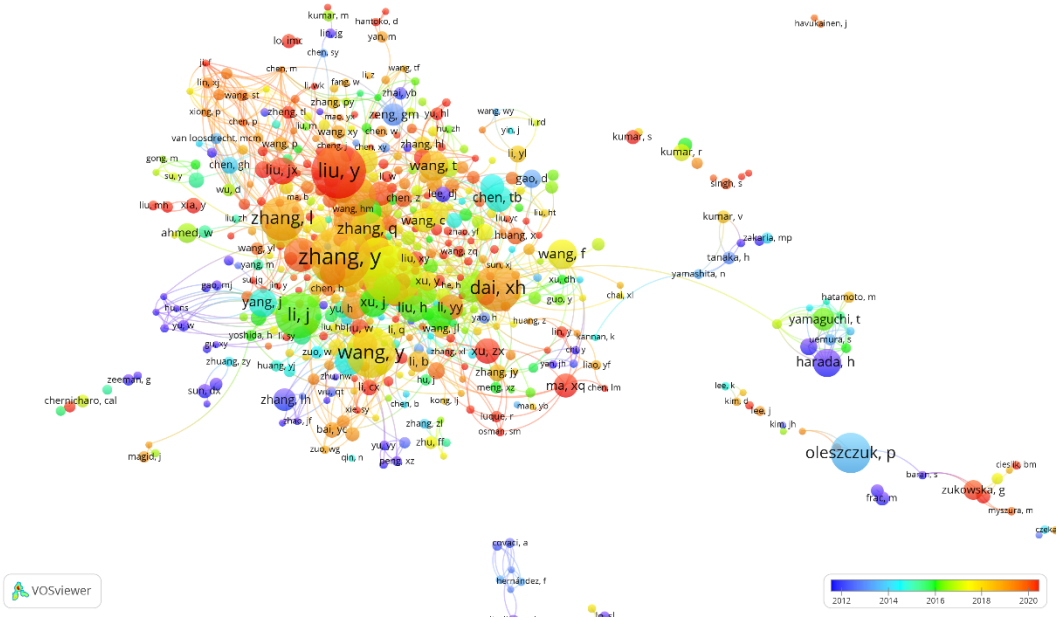
La Gráfica 2 presenta los diez autores con mayor número de publicaciones relacionadas con el aprovechamiento de residuos agroindustriales y el desarrollo de bioplásticos biodegradables. Se observa que los investigadores Zhang, Y. y Zhang, J. lideran la producción científica con 43 y 41 documentos, respectivamente, seguidos por Liu, Y. (38) y Wang, Y. (35). Este predominio de autores de origen asiático, particularmente de China, evidencia el fuerte interés de ese país en el desarrollo de materiales sostenibles derivados de fuentes renovables y residuos agrícolas. Según datos de la OECD (2022), China ha incrementado significativamente su inversión en investigación sobre economía circular y biotecnología verde, lo que explica el liderazgo de sus investigadores en esta área emergente.

La distribución entre los principales autores, con valores que oscilan entre 25 y 43 publicaciones, muestra que el tema ha despertado un interés constante en diferentes grupos

de investigación. Esto deja ver que no se trata de esfuerzos aislados, sino de una comunidad científica que ha venido trabajando de forma sostenida en torno al desarrollo de materiales biodegradables y al aprovechamiento de residuos agroindustriales.

Gráfica 3

Mapa de red de coautoría por autores con codificación temporal (2012-2022).



Nota. Elaboración propia a partir de registros bibliográficos exportados de *Web of Science* (consultados en octubre de 2025) y analizados en *VOSviewer 1.6.20*

El mapa de coautorías complementa la información de la gráfica anterior al mostrar la distribución temporal de los autores con mayor producción científica en el campo analizado. Cada nodo representa a un autor, cuyo tamaño se asocia con la cantidad de publicaciones, mientras que las líneas indican vínculos de colaboración científica. La escala cromática (de azul a rojo) muestra el periodo de actividad predominante, permitiendo identificar las dinámicas de cooperación a lo largo del tiempo.

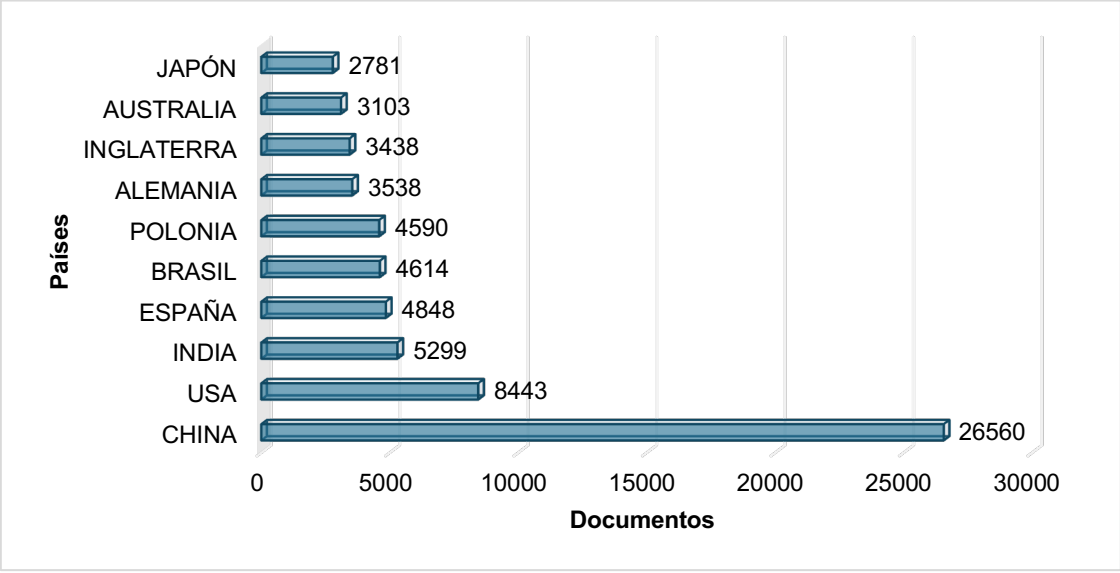
Se observa que los trabajos iniciales - representados en tonos azules y verdes - corresponden principalmente a investigadores como Oleszczuk, P., Harada, H. y Yamaguchi, T., quienes aportaron en las etapas más tempranas del periodo 2012–2015, sentando bases sobre tratamiento de aguas residuales y procesos de digestión anaerobia. En contraste, los tonos amarillos, naranjas y rojizos señalan autores con actividad más reciente (2018-2022), entre los que destacan Zhang, Y., Liu, Y., Wang, Y. y Dai, X.H., lo que evidencia una consolidación de la investigación en Asia oriental durante los últimos años.

La progresión cromática sugiere una transición del interés científico, que pasó de estudios enfocados en aspectos microbiológicos y de tratamiento básico de residuos, hacia investigaciones orientadas al aprovechamiento biotecnológico de residuos agroindustriales y la síntesis de materiales biodegradables.

3.3. Publicaciones por países

Gráfica 4

Documentos científicos indexados en Web of Science según país de publicación (2025).



Nota. Elaboración propia con base en datos de *Web of Science* (2025).

El análisis de la producción científica por país muestra una clara concentración del conocimiento en dos potencias investigadoras: China (26.560 documentos) y Estados Unidos (8.443 documentos), cuya producción conjunta supera ampliamente la de los demás países del top 10. Esta brecha refleja el peso que ambas naciones ejercen en las áreas de biotecnología verde, economía circular y desarrollo de materiales sostenibles, impulsadas por políticas públicas que priorizan la innovación en sostenibilidad y gestión ambiental. En particular, el liderazgo de China se relaciona con su fuerte inversión en investigación y desarrollo orientada a la reducción de residuos y la valorización de subproductos agroindustriales, una tendencia reconocida por la OECD (2022) como parte de su estrategia hacia una economía baja en carbono.

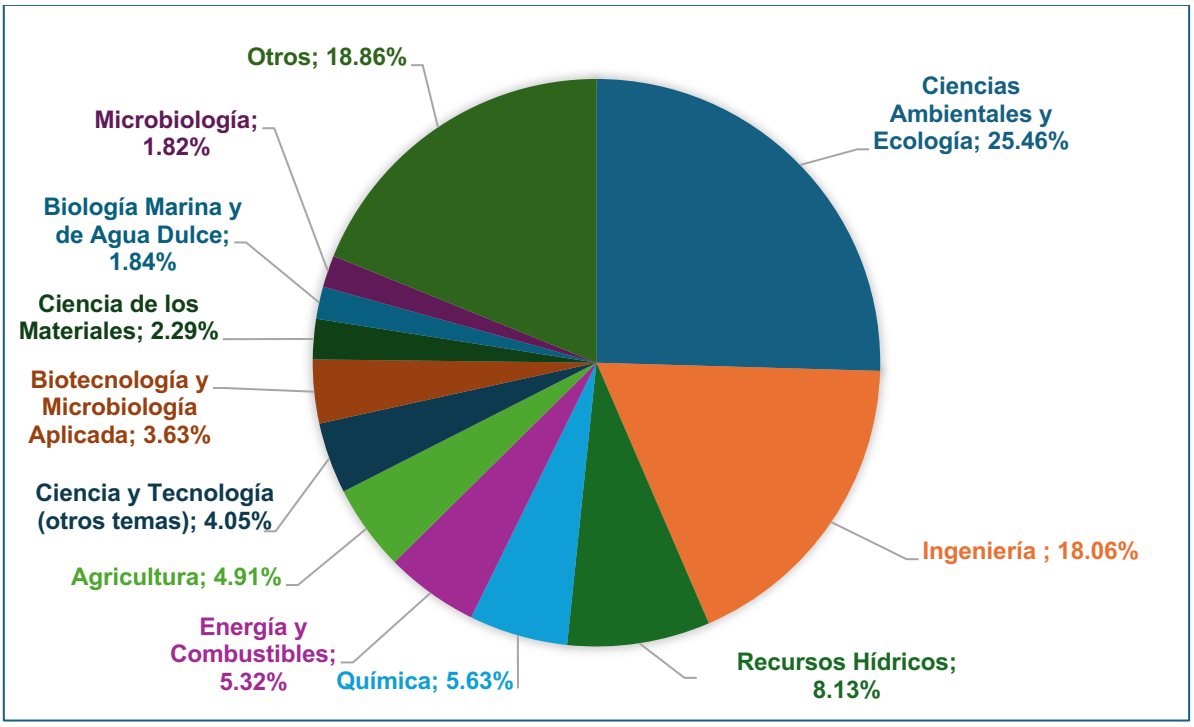
Por otro lado, la presencia de España, Brasil y Polonia entre los diez primeros países (con producciones que oscilan entre 4.500 y 5.000 documentos) evidencia un interés regional creciente en la valorización de residuos agrícolas y la búsqueda de alternativas biodegradables. En el caso de Brasil, que es el mayor productor de café a nivel mundial, su posición dentro del top 10 puede vincularse directamente con la relevancia de su sector agrícola y con los esfuerzos por valorizar subproductos del café, como el bagazo y la pulpa, para el desarrollo de materiales sostenibles. Esta tendencia se ha fortalecido en los últimos años gracias al impulso de proyectos orientados a la bioeconomía y la reducción de residuos agroindustriales, apoyados por instituciones de investigación como EMBRAPA y el Ministerio de Ciencia, Tecnología e Innovación de Brasil (EMBRAPA, 2023). Aunque la producción científica de estos países es menor que la de las principales potencias, suele

caracterizarse por un enfoque más aplicado y contextual, centrado en resolver desafíos locales de sostenibilidad y gestión ambiental.

3.4. Publicaciones por áreas temáticas

Gráfica 5

Distribución de documentos científicos indexados en Web of Science por áreas temáticas.



Nota. Elaboración propia con base en datos de *Web of Science* (2025).

La distribución de los documentos por área temática muestra que este campo de estudio combina varias disciplinas, especialmente las ciencias ambientales, la ingeniería y la biotecnología, que trabajan de forma conjunta para desarrollar soluciones sostenibles. Las áreas de Ciencias Ambientales y Ecología e Ingeniería concentran la mayor parte de las publicaciones, superando las 67.000 investigaciones en conjunto. Este predominio evidencia que la investigación se enfoca principalmente en la gestión sostenible de residuos y la reducción de la contaminación del agua y del suelo, aspectos estrechamente relacionados con

el aprovechamiento de efluentes agroindustriales, como los generados en el beneficio del café.

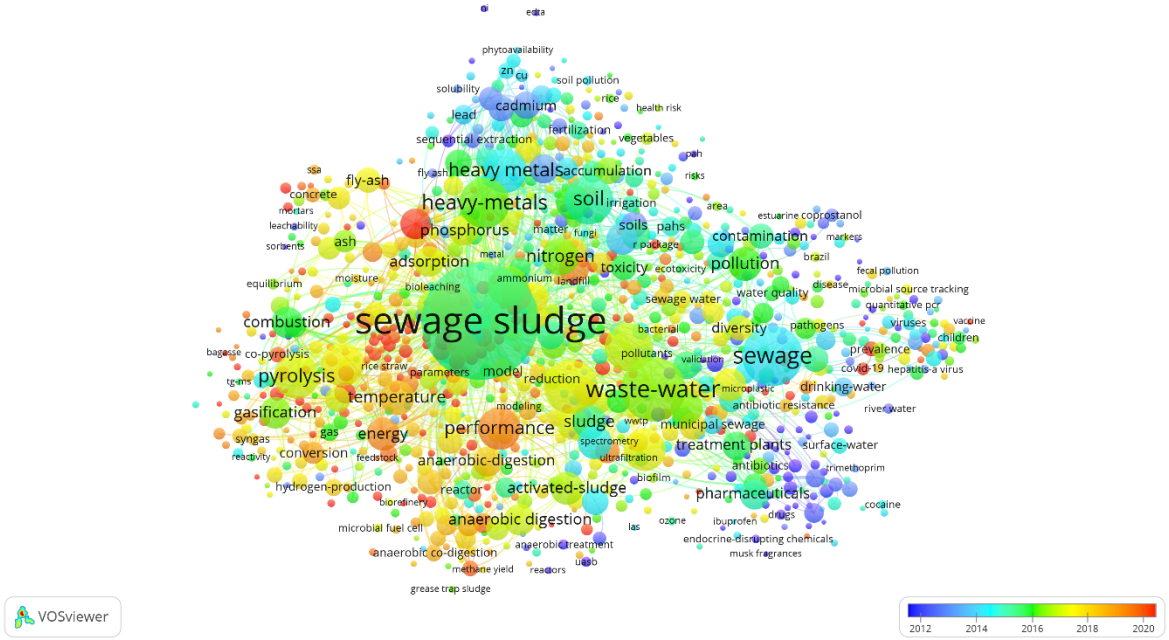
En un segundo plano, sobresalen las áreas de Recursos Hídricos y Química, que constituyen los pilares técnicos de la aplicación práctica. La notable participación de la Química, con más de 8.000 publicaciones, refleja el interés por optimizar procesos de fermentación, extracción y polimerización, con el fin de lograr una síntesis de biopolímeros de origen residual. Este enfoque se sustenta en estudios recientes, como el de Zhou et al. (2023), quienes destacan que los microorganismos pueden sintetizar poli-hidroxialcanoatos (PHAs) a partir de residuos y efluentes orgánicos, lo que representa una alternativa viable frente a los plásticos convencionales.

Por su parte, el área de Recursos Hídricos reafirma uno de los ejes conceptuales de esta monografía: las aguas residuales no deben considerarse simples desechos, sino fuentes potenciales de valor y materia prima recuperable. Investigaciones aplicadas, como la de Cydzik-Kwiatkowska et al. (2024), demuestran que en plantas de tratamiento de aguas residuales a escala real se logra la producción de biopolímeros microbianos (EPS) bajo condiciones controladas, evidenciando su potencial técnico y ambiental en esquemas de economía circular.

3.5. Relación entre palabras claves

Gráfica 6

Mapa de coocurrencia de palabras clave en la producción científica (2012-2022).



Nota. Elaboración propia a partir de registros bibliográficos exportados de *Web of Science* (consultados en octubre de 2025) y analizados en *VOSviewer 1.6.20.*

El mapa de co-ocurrencia de palabras clave evidencia que la investigación sobre el aprovechamiento de aguas residuales y lodos ha evolucionado desde enfoques centrados en la mitigación ambiental hacia estrategias de valorización y recuperación de recursos. El término “sewage sludge” ocupa el nodo de mayor peso y conectividad (con una fuerza total de enlace de 12.971), situándose como el eje estructural del campo. Su estrecha relación con conceptos como “waste-water”, “removal”, “heavy metals” y “sewage” confirma que la mayor parte de los estudios iniciales (2012–2016, tonos azulados) se concentraron en la gestión y descontaminación de los efluentes urbanos e industriales.

Con el paso de los años - representado por la transición cromática hacia verdes, amarillos y naranjas- , se observa un cambio claro en la orientación de los estudios. Términos como “pyrolysis”, “biochar”, “gasification”, “biomass” y “energy” comienzan a ganar relevancia a partir del 2018, realizando un cambio conceptual: el lodo residual pasa de ser considerado un desecho a ser tratado como un recurso energético y material aprovechable. Este cambio coincide con el auge global de la economía circular y las políticas de bioenergía sostenible, buscando darles aprovechamiento a los subproductos agroindustriales generando valor agregado.

A partir de la caracterización bibliométrica realizada, que permitió delimitar el panorama investigativo sobre el tema estudiado, se procede a presentar los resultados específicos del proyecto. Toda esta revisión previa no fue solo un simple requisito metodológico; sirvió para entender qué se ha estudiado, qué falta por explorar y cómo encaja el tema dentro de ese panorama. Con ese contexto claro, ahora se presentan los hallazgos correspondientes a cada objetivo, profundizando en los componentes, procesos y aplicaciones relevantes para la evaluación teórica del potencial de las aguas residuales de la industria caficultora en el desarrollo teórico de bioplásticos biodegradables destinados a usos agrícolas no alimentarios.

3.6. Resultados

Objetivo 1: Identificar los componentes claves presentes en las aguas residuales del beneficio húmedo del café con potencial para ser utilizados en la síntesis de bioplásticos.

Las aguas residuales que surgen durante el beneficio húmedo del café representan mucho más que un simple desecho de proceso. En su composición se entrelazan restos del fruto, trazas del mucílago y una gran variedad de compuestos orgánicos e inorgánicos que, en conjunto, forman una mezcla tan compleja como interesante. Diversos estudios han descrito estas aguas como una verdadera matriz química, rica en carbohidratos, ácidos orgánicos, fenoles y proteínas, cuya interacción determina tanto su comportamiento contaminante como su potencial de valorización. Dentro de esta matriz conviven azúcares, ácidos orgánicos, fenoles, proteínas, lípidos, fibras vegetales y alcaloides, cada uno con un papel específico y con posibilidades distintas de aprovechamiento (Ijanu et al., 2019). Comprender la composición y comportamiento de estos compuestos permite establecer la base teórica sobre la cual se sustentan los procesos de transformación hacia materiales poliméricos biodegradables.

Cabe señalar que la composición exacta de las aguas residuales del beneficio húmedo del café no es constante, sino que depende en gran medida de factores agronómicos y operativos. Variables como la variedad del café (Arabica, Robusta u otras), el grado de maduración del fruto al momento de la recolección, las condiciones climáticas durante el beneficio, el tiempo y tipo de fermentación, así como la eficiencia del lavado, pueden modificar notablemente la proporción de azúcares, ácidos, proteínas y compuestos fenólicos presentes en el efluente. Estas variaciones repercuten directamente en su comportamiento químico y microbiológico, y en consecuencia, en la viabilidad de su aprovechamiento como

sustrato. En este sentido, el análisis debe asumirse de manera contextual y adaptable a las condiciones particulares de cada zona cafetera.

Entre los componentes más abundantes reportados en la literatura científica se encuentran los carbohidratos solubles, que provienen principalmente del mucílago y de los restos de pulpa que acompañan al grano durante el proceso de despulpado, la fermentación y el lavado inicial. Estos azúcares, tanto los simples (como glucosa, fructosa y sacarosa) como los polisacáridos solubles (por ejemplo, pectinas y oligosacáridos), se liberan al agua en cantidades variables, dependiendo del tipo de proceso y del momento en que se tome la muestra (G/Mariam, 2014; Kc et al., 2021). El mucílago del café se caracteriza por una elevada proporción de carbohidratos solubles. Neu et al. (2016) reportan que puede contener hasta 60 gramos por litro (g/L) de azucares libres, mientras que evaluaciones composicionales realizadas por Cárdenas et al. (2018) sitúan el contenido entre 6.2% y 7.4% en peso. Estos valores reflejan la alta presencia de compuestos azucarados en el efluente.

Por otra parte, investigaciones sobre la hidrólisis de subproductos del café demuestran que, mediante tratamientos controlados, como la hidrólisis ácida o enzimática de la pulpa, es posible obtener soluciones con altas concentraciones de azúcares fermentables, alcanzando valores de hasta 20 g/L de azúcares totales. Esto confirma que los residuos sólidos asociados al efluente tienen un importante potencial para convertirse en un sustrato útil y concentrado para distintos procesos biotecnológicos (Arya et al., 2021; Ulsido et al., 2024).

La presencia de carbohidratos en las aguas residuales del beneficio del café, en concentraciones que pueden variar desde cientos de miligramos por litro hasta varios gramos por litro, representa una fuente de carbono fácilmente aprovechable por microorganismos capaces de producir biopolímeros. Algunas especies bacterianas, como *Cupriavidus necator*

y ciertos tipos de *Bacillus*, pueden utilizar estos azúcares como alimento para generar polihidroxialcanoatos (PHAs), un tipo de bioplástico biodegradable. Mediante procesos de fermentación controlada, es posible transformar los azúcares solubles en monómeros o polímeros con rendimientos eficientes (Arya et al., 2021).

Sin embargo, la disponibilidad real de estos compuestos depende de factores como el tipo de flujo del efluente y la necesidad de estabilizar la corriente antes de su aprovechamiento, con el fin de evitar fermentaciones no deseadas o acidificaciones espontáneas que afecten la calidad del sustrato.

En este sentido, los datos disponibles permiten observar dos escenarios complementarios: por un lado, el efluente sin tratamiento previo ya contiene cantidades moderadas de azúcares aprovechables; por otro, al aplicar procesos de concentración o hidrólisis de los sólidos asociados, la cantidad de azúcares puede aumentar considerablemente hasta alcanzar niveles de varios gramos por litro, lo que lo convierte en un recurso altamente prometedor para la producción de bioplásticos mediante fermentación microbiana.

En estrecha relación con los carbohidratos, los ácidos orgánicos conforman otro grupo importante de compuestos presentes en las aguas residuales del beneficio húmedo del café. Su origen está relacionado con el metabolismo del fruto y con los procesos de fermentación del mucílago, durante los cuales se liberan ácidos como el acético, láctico, málico, cítrico y succínico (Adolfo, 2022).

Las concentraciones de estos compuestos pueden variar significativamente según el tiempo de fermentación, el grado de madurez del fruto y las prácticas de lavado aplicadas en

el proceso. En el estudio de Campos et al. (2020) realizado en plantas de beneficio húmedo de café, registraron valores destacados: por ejemplo, en el procesamiento por lotes, el ácido láctico se identificó como el principal ácido orgánico, alcanzando concentraciones cercanas a 2687 miligramos por litro (mg/L) en las corrientes de fermentación. En contraste, en sistemas de procesamiento continuo, este valor disminuyó hasta alrededor de 373 mg/L en algunas fracciones muestreadas. Otros compuestos, como el ácido málico, se han detectado en rangos de varios cientos de miligramos por litro en ciertas corrientes de lavado.

Estas concentraciones están asociadas con valores de pH entre 3.5 y 5.5, lo que influye directamente en la solubilidad de otros compuestos presentes y en la actividad microbiana del medio (Dadi et al., 2017). Dichas condiciones pueden favorecer fermentaciones espontáneas si no se controlan adecuadamente las variables operativas, afectando la estabilidad del efluente y su posterior aprovechamiento.

Por otro lado, los ácidos orgánicos son de gran interés, porque pueden actuar como fuentes de carbono para la producción de biopolímeros. En particular, el ácido láctico es el precursor directo del ácido poliláctico (PLA), que puede obtenerse mediante procesos químicos o combinaciones microbiológicas-químicas. Por su parte, los ácidos volátiles como el acético y el propiónico pueden ser metabolizados por diversas bacterias productoras de polihidroxialcanoatos (PHA), favoreciendo la formación de copolímeros con diferentes propiedades físicas y mecánicas (Nduko & Taguchi, 2021). Estudios como el de Getino et al. (2024), sobre la producción microbiana de monómeros derivados del lactato y sobre estrategias para sintetizar PHAs a partir de corrientes mixtas respaldan este potencial de aprovechamiento en efluentes ricos en ácidos orgánicos.

Sin embargo, una alta concentración de ácidos puede generar dificultades operativas, ya que provoca estrés osmótico y de pH en los microorganismos más sensibles y altera el equilibrio redox del medio, reduciendo la eficiencia del proceso si no se aplican medidas correctivas. En respuesta a esto, estudios recientes señalan que la co-cultivación de microorganismos ayuda a disminuir estos efectos de inhibición y mejora la producción de PHA frente a los cultivos puros. Además, se ha observado que el uso de tratamientos previos y el ajuste del pH contribuyen a optimizar el rendimiento cuando se aplican técnicas de acondicionamiento adecuadas al efluente (Zhu et al., 2022; Coats et al., 2016).

Otro grupo de compuestos de gran importancia son los compuestos fenólicos. Proceden, principalmente, de la pulpa y de las capas externas del fruto, donde cumplen funciones antioxidantes y de defensa frente a patógenos. Entre los más destacados se encuentran los ácidos clorogénicos (especialmente el 5-cafeilquinico), cafeico, ferúlico y p-cumárico, además de pequeñas fracciones de taninos y ligninas solubles. Campos et al. (2020) indicaron que el ácido 5-cafeilquinico puede representar hasta el 67% del total de compuestos fenólicos presentes, lo que demuestra su alta prevalencia en esta corriente residual.

Desde una perspectiva química, los fenoles presentan estructuras aromáticas estables que les permiten interaccionar fácilmente con proteínas y polisacáridos, contribuyendo a la alta demanda química de oxígeno (DQO) y a la baja biodegradabilidad del efluente, siendo los taninos y otros fenoles los principales responsables de la coloración intensa y la recalcitrancia del agua residual del café (Hasan et al., 2022).

A pesar de que estos compuestos incrementan la toxicidad del efluente, también representan una oportunidad de valorización. Los compuestos fenólicos pueden emplearse

como materia prima para la obtención de biopolímeros fenólicos, o bien actuar como reforzantes en matrices de bioplásticos, aportando propiedades antioxidantes y mayor resistencia a la degradación.

Ahora bien, la biodegradación de los compuestos fenólicos requiere de microorganismos especializados capaces de romper los anillos aromáticos y transformar estos compuestos en intermedios más simples, que puedan aprovecharse posteriormente en la síntesis de biopolímeros o biomasa microbiana. Según Torres et al. (2015), la oxidación enzimática del ácido cafeico en aguas residuales del procesamiento del café, utilizando peroxidasas inmovilizadas, lograron eliminar aproximadamente el 50% del ácido cafeico en solo 15 minutos de reacción. Este tipo de tratamiento demuestra que, si bien el aprovechamiento biotecnológico de los fenoles es más complejo que el de los azúcares o los ácidos orgánicos, puede abrir nuevas rutas hacia materiales lignocelulósicos y biopolímeros de alto valor agregado. Sin embargo, su uso industrial aún depende de estrategias de pretratamiento fisicoquímico o enzimático que reduzcan la toxicidad y mejoren la biodisponibilidad de estos compuestos, lo que representa uno de los principales retos técnicos y económicos del proceso.

Dentro de la composición orgánica de las aguas residuales, las proteínas y otros compuestos nitrogenados, aunque se encuentran en menor cantidad que los carbohidratos o los ácidos orgánicos, cumplen un papel fundamental en la dinámica biológica del efluente.

Estas sustancias provienen principalmente del mucílago, de fragmentos del grano y de residuos de pulpa arrastrados durante el despulpado y lavado, los cuales aportan proteínas parcialmente solubles, péptidos y aminoácidos al medio, así lo plantea Cruz-Salomón et al. (2017), en su estudio sobre la caracterización de estos efluentes, donde además reportaron

concentraciones de nitrógeno total cercanas a 700 mg/L, lo que evidencia una alta riqueza en compuestos aprovechables por microorganismos.

La fracción nitrogenada constituye una fuente clave de nutrientes para el crecimiento microbiano inicial, facilitando la multiplicación de bacterias o hongos útiles en la producción de biopolímeros. No obstante, la relación carbono/nitrógeno (C/N) es determinante: un exceso de nitrógeno favorece la síntesis de biomasa, pero limita la acumulación de polímeros como los PHA, que se producen mejor bajo limitación de nitrógeno. Por ello, aunque la fracción proteica del efluente aporta valor metabólico, requiere pretratamientos que regulen la disponibilidad de nitrógeno, como la hidrólisis enzimática o ácida. En esta línea, Cavanagh (2024) reporta que la hidrólisis enzimática de proteínas en residuos de café mejora la asimilación microbiana y el rendimiento de biopolímeros, lo que confirma que un manejo adecuado del nitrógeno puede transformar un residuo nutritivo pero desequilibrado en un sustrato eficaz para bioplásticos.

Entre los componentes minoritarios pero de gran interés funcional se encuentran los lípidos y ácidos grasos. Aunque su concentración es baja, usualmente inferior a 2 g/L, su presencia proviene del arrastre de ceras epicuticulares, restos del mucílago y trazas oleosas del grano, que se liberan durante el despulpado y lavado. En estudios sobre subproductos sólidos del café se han identificado contenidos lipídicos cercanos al 0.8% en la pulpa seca (Efthymiopoulos et al., 2018), lo que permite inferir que fracciones menores pueden migrar al efluente líquido. Pese a su limitada cantidad, estos compuestos revisten especial valor, ya que los ácidos grasos de cadena media e insaturados, como el oleico, linoleico y palmítico, actúan como sustratos idóneos para la síntesis de polihidroxialcanoatos de cadena media

(PHA-mcl), biopolímeros caracterizados por su flexibilidad y resistencia térmica superiores a los PHA convencionales (Dartiailh et al., 2021).

Por otro lado, la mayor parte de la fracción estructural polisacárida, conformada por celulosa, hemicelulosa y pectinas, se mantiene en los sólidos del mucílago y la pulpa. Diversos autores señalan que una fracción significativa puede pasar al efluente cuando el proceso de lavado es intenso o el despulpado genera partículas finas. De acuerdo con Ijanu et al. (2020), las aguas del beneficio húmedo se caracterizan por su alta carga orgánica y presencia de polisacáridos parcialmente solubilizados, los cuales pueden hidrolizarse en azúcares simples, como glucosa, xilosa o manosa, que sirven como sustratos fermentables en la producción de biopolímeros o biocelulosa bacteriana, materiales con aplicaciones crecientes en recubrimientos agrícolas y membranas biodegradables.

Por último, los alcaloides del café, especialmente la cafeína y la trigonelina, también se detectan en el efluente, aunque en concentraciones variables que dependen de la variedad de café, el grado de madurez del fruto y las condiciones de fermentación. Teoh et al. (2022) reportaron valores cercanos a 470 mg/L de cafeína en mezclas residuales derivadas del procesamiento de café, evidenciando la posibilidad de que estos compuestos alcancen niveles considerables en sistemas no tratados. Si bien los alcaloides no aportan valor directo a la síntesis de biopolímeros, su relevancia radica en su efecto inhibitorio sobre la actividad microbiana, al interferir con la respiración celular y disminuir la eficiencia de conversión de carbono. Por ello, resulta recomendable incorporar etapas de bioadsorción o degradación enzimática previas al aprovechamiento biotecnológico de estos efluentes.

En síntesis, desde una perspectiva teórica, los carbohidratos y ácidos orgánicos emergen como los componentes más prometedores, pues constituyen fuentes de carbono fácilmente asimilables por microorganismos productores de PHA y PLA, además de encontrarse en concentraciones adecuadas y con alta solubilidad. En contraste, los fenoles y alcaloides, aunque ofrecen potencial para la obtención de materiales funcionales o como aditivos antioxidantes, presentan una elevada toxicidad y recalcitrancia, lo que limita su uso directo sin pretratamientos. Por su parte, la fracción nitrogenada y lipídica puede considerarse complementaria: la primera como fuente esencial de nutrientes para la fase de crecimiento microbiano y la segunda como precursora de biopolímeros de cadena media, aunque ambas requieren estrategias de control o concentración específicas para su aprovechamiento óptimo.

De esta manera, el análisis integral permite concluir que las corrientes carbonadas (azúcares y ácidos) constituyen el núcleo más viable para la obtención de bioplásticos biodegradables a partir de las aguas residuales del café, mientras que los demás compuestos pueden desempeñar roles secundarios o sinérgicos dentro de esquemas de una planta de aprovechamiento de residuos agrícolas más amplia.

A continuación, se presenta la Tabla 1, que resume los compuestos clave identificados en las aguas residuales del café y su viabilidad para la obtención de bioplásticos biodegradables, junto con la justificación técnica de su potencial aplicabilidad.

Antes de presentar la Tabla 1, es importante aclarar que las categorías “Alta”, “Media” y “Baja” se usan como una escala cualitativa para entender qué tan viable es aprovechar cada compuesto mencionado anteriormente. Esta clasificación se basa en tres aspectos sencillos:

1. qué tan frecuente o abundante es el compuesto según la literatura,

2. qué tan fácil es usarlo en procesos biotecnológicos conocidos (como producción de PHA, PLA u otros bioplásticos), y
3. qué tanto pretratamiento necesita antes de poder aprovecharse.

En este sentido, “Alta” se asigna a compuestos disponibles en buena cantidad y que pueden usarse casi directamente; “Media” a compuestos con buen potencial, pero que requieren ciertos ajustes o tratamientos previos; y “Baja” a aquellos que presentan límites prácticos o efectos inhibitorios que dificultan su uso inmediato. Esta escala sirve únicamente como guía para interpretar los resultados del primer objetivo del proyecto.

Tabla 1

Evaluación de viabilidad de los compuestos presentes en las aguas residuales del beneficio húmedo del café para la producción de bioplásticos biodegradables.

Compuesto / Grupo	**Ejemplos principales**	**Viabilidad biotecnológica**	**Justificación**
Carbohidratos	Glucosa, fructosa, sacarosa, pectinas	Alta	Son fuentes de carbono fácilmente metabolizables para la producción microbiana de PHA y PLA; se encuentran en alta concentración y con buena biodisponibilidad.
Ácidos orgánicos	Ácido láctico, acético, málico, cítrico	Alta	Actúan como precursores directos del PLA y como fuentes carbonadas para la síntesis de copolímeros PHA; su concentración natural favorece la fermentación controlada.
Compuestos fenólicos	Ácido clorogénico, cafeico, ferúlico, taninos	Media-Baja	Pueden aprovecharse para biopolímeros fenólicos o como aditivos antioxidantes, pero requieren pretratamientos por su toxicidad y baja biodegradabilidad.
Proteínas y compuestos nitrogenados	Péptidos, aminoácidos, nitrógeno total	Media	Aportan nutrientes esenciales para el crecimiento microbiano, pero el exceso de nitrógeno puede inhibir la acumulación de biopolímeros; requieren control de la relación C/N.

Compuesto / Grupo	Ejemplos principales	Viabilidad biotecnológica	Justificación
Lípidos y ácidos grasos	Ácido oleico, linoleico, palmítico	Media	Son sustratos valiosos para la síntesis de PHA-mcl, aunque su baja concentración en el efluente limita el aprovechamiento directo.
Polisacáridos estructurales	Celulosa, hemicelulosa, pectinas	Alta	Tras hidrólisis, generan azúcares fermentables que pueden emplearse como base para biopolímeros o biocelulosa bacteriana.
Alcaloides	Cafeína, trigonelina	Baja	Poseen efecto inhibitorio sobre la actividad microbiana; requieren eliminación previa mediante adsorción o degradación enzimática.

Nota. Elaboración propia con base en Ijanu et al. (2019); Campos et al. (2020); Dadi et al. (2017); Arya et al. (2021); Ulsido et al. (2024); Nduko y Taguchi (2021); Getino et al. (2024); Zhu et al. (2022); Coats et al. (2016); Hasan et al. (2022); Torres et al. (2015); Cruz-Salomón et al. (2017); Cavanagh (2024); Efthymiopoulos et al. (2018); Dartiailh et al. (2021); Teoh et al. (2022).

Objetivo 2: Evaluar los métodos disponibles para la extracción y transformación de los compuestos claves presentes en las aguas residuales del beneficio húmedo del café, orientados a la síntesis eficiente de bioplásticos.

La transformación de las aguas residuales del beneficio húmedo del café en un sustrato viable para la síntesis de bioplásticos requiere una secuencia controlada de operaciones que permita pasar de un efluente con alta carga contaminante a una corriente biotecnológicamente aprovechable. Este proceso implica la separación física de sólidos y coloides, la remoción o neutralización de compuestos inhibidores, la conversión de fracciones complejas en compuestos fermentables y un acondicionamiento final del medio para el cultivo microbiano. Más que una técnica única o universal, la estrategia eficiente consiste en integrar procesos físicos, químicos y biológicos de manera complementaria, en función del producto final deseado, ya sea la obtención de ácidos grasos volátiles (VFAs) para cultivos mixtos, hidrolizados azucarados para cepas puras o extractos lipídicos orientados a la producción de PHA-mcl. A continuación, se detallan los métodos más relevantes y su aplicabilidad práctica respaldada por la evidencia científica disponible.

a. Separación y acondicionamiento físico-mecánico

Previo a cualquier proceso de transformación, la separación sólido-líquido y el ajuste de parámetros fisicoquímicos, como pH y temperatura, constituyen operaciones esenciales. Métodos como la decantación, el cribado y el desarenado permiten remover sólidos gruesos y materiales suspendidos, mejorando la eficiencia de los tratamientos posteriores. En etapas más avanzadas, la centrifugación o el uso de filtros prensa posibilitan concentrar fracciones sólidas (pulpa y mucílago) cuando se busca su hidrólisis independiente. Estas operaciones iniciales optimizan la estabilidad de los procesos subsiguientes y previenen el arrastre de

partículas que podrían inhibir la actividad microbiana en los reactores biológicos. La bibliografía especializada sobre tratamiento de efluentes cafetaleros coincide en considerar esta fase como un paso inicial estándar e indispensable dentro de cualquier esquema de valorización (Ijanu et al., 2019).

En aplicación práctica, esta etapa de separación permite dirigir rápidamente los sólidos hacia una planta de aprovechamiento de residuos agrícolas, donde se someten a hidrólisis para la liberación de azúcares fermentables, mientras que la fracción líquida continúa hacia tratamientos biológicos o químicos, según el tipo de producto intermedio que se busque obtener.

b. Pretratamientos para liberar azúcar y polisacáridos

Cuando el objetivo es obtener azúcares fermentables para la síntesis de biopolímeros, como el ácido poliláctico (PLA) o los polihidroxialcanoatos (PHA) mediante rutas microbianas, la hidrólisis de la fracción sólida (pulpa y mucílago) del café se convierte en una etapa crítica.

Para ello, existen dos opciones importantes:

Hidrólisis ácida: Es una alternativa técnicamente sencilla y de bajo costo en equipos, efectiva para romper enlaces polisacarídicos y liberar azúcares simples. No obstante, el exceso de severidad en las condiciones de reacción puede generar compuestos inhibidores como furfural y 5-hidroximetilfurfural (HMF), lo que obliga a incluir etapas posteriores de neutralización o detoxificación (Jang et al., 2018).

Hidrólisis enzimática: Ofrece una conversión más selectiva y controlada, con mínima formación de subproductos tóxicos. Su principal limitante radica en el costo de las

enzimas y en la necesidad de optimizar variables como la composición enzimática, la temperatura y el tiempo de reacción. Estudios sobre residuos de café y spent coffee grounds (SCG) han demostrado rendimientos significativamente altos de glucosa tras pretratamientos alcalinos o con agua caliente seguidos de sacárificación enzimática, reforzando su aplicabilidad industrial (Jang et al., 2018; Huang et al., 2024).

De este modo, para un proyecto orientado a obtener sustratos concentrados y de alta calidad, la combinación de un pretratamiento físico con una hidrólisis enzimática optimizada representa el mejor equilibrio entre rendimiento, pureza del hidrolizado y viabilidad económica del proceso fermentativo.

c. Producción de ácidos orgánicos (VFA) por fermentación acidogénica.

Cuando el objetivo es alimentar cultivos mixtos productores de PHA mediante el uso de ácidos grasos volátiles (VFA) como sustrato intermedio, la alternativa más eficiente consiste en transformar la materia orgánica soluble en compuestos como acetato, propionato y butirato a través de una fermentación acidogénica controlada. Este proceso requiere una regulación precisa de parámetros operativos, como pH, tiempo de retención de sólidos (SRT) y temperatura, ya que su equilibrio define la acumulación y el perfil de los VFAs producidos (Zhang et al., 2020; Gracia et al., 2023).

Revisiones recientes sobre la generación de VFAs a partir de aguas residuales y residuos orgánicos destacan que un pH cercano a la neutralidad o ligeramente alcalino favorece la acumulación de ácidos, mientras que un SRT corto evita la transición a la fase metanogénica. Asimismo, la temperatura y la carga orgánica (OLR) deben ajustarse para maximizar la productividad y estabilidad del sistema (Vázquez-Fernández et al., 2022).

Este proceso permite convertir la fracción orgánica compleja del efluente en un sustrato directamente utilizable para la síntesis de PHA, sin requerir una hidrólisis completa. Sin embargo, mantener la selectividad acidogénica exige controlar inhibidores naturales presentes en el café (fenoles, alcaloides) y evitar el avance de la metanogénesis. Estudios experimentales han demostrado que el ajuste fino del pH y del tiempo de retención hidráulica influye de manera determinante en la concentración y composición de los VFAs obtenidos, afectando directamente la eficiencia de conversión microbiana posterior (Diaz et al., 2023; Guardia-Puebla et al., 2021).

d. Eliminación de inhibidores (fenoles, alcaloides): técnicas físico-químicas y enzimáticas.

Los compuestos fenólicos y los alcaloides constituyen los principales obstáculos para la fermentación eficiente del efluente. Su remoción o transformación parcial es indispensable antes de etapas biotecnológicas sensibles. Entre las alternativas más relevantes se encuentran:

1. Adsorción (carbón activado, biochar): método ampliamente probado para reducir fenoles y color; ofrece buena eficiencia y simplicidad operativa, aunque requiere el manejo adecuado de adsorbentes saturados.
2. Intercambio iónico y resinas selectivas: eficaces para eliminar compuestos específicos como la cafeína, aunque con un costo operativo más elevado.
3. Procesos de oxidación avanzada (AOP: ozono, Fenton, fotocatálisis): degradan fenoles con alta efectividad, pero su consumo energético y la generación de subproductos limitan su uso a casos donde se requiere una detoxificación rápida previa a la fermentación.

4. Tratamientos enzimáticos (laccasas, peroxidasas inmovilizadas): especialmente adecuados para matrices fenólicas; se han reportado remociones cercanas al 50% del ácido cafeico en pocos minutos mediante peroxidasas inmovilizadas, y las laccasas muestran buen desempeño frente a compuestos recalcitrantes.

(Bhardwaj et al., 2022; Sanchez-Ledesma et al., 2023).

Una estrategia integrada combina la adsorción inicial, para reducir la carga global de inhibidores, con tratamientos enzimáticos orientados a transformar selectivamente las fracciones fenólicas. Este enfoque permite no solo detoxificar la corriente antes de su fermentación hacia VFA o PHA, sino también conservar compuestos con potencial para actuar como aditivos funcionales o antioxidantes en matrices de bioplásticos (Ijanu et al., 2019; Bhardwaj et al., 2022).

e. Recuperación de lípidos - fracciones grasas.

En la producción de biopolímeros tipo PHA-mcl, la obtención de fracciones lipídicas puede representar una etapa relevante. Entre las técnicas más utilizadas destacan:

1. Extracción con disolventes (Soxhlet, hexano): ofrece alta eficiencia en matrices sólidas como los spent coffee grounds (SCG), aunque no resulta adecuada para corrientes líquidas debido al bajo contenido de grasa y la dispersión del material.
2. Extracción asistida por ultrasonido o microondas (UAE/MW): permite mejorar los rendimientos con menores tiempos y consumo de solventes; diversos estudios reportan incrementos significativos de recuperación lipídica en SCG tras optimizar potencia y tiempo de exposición.

3. Extracción en fase líquida y concentración por centrifugación: aplicable en efluentes con emulsiones grasosas, aunque el rendimiento suele ser limitado; resulta más efectiva cuando se combina con la recuperación previa de sólidos o fases concentradas.

(Pyrzynska, 2024; Huang et al., 2024).

En el caso de las aguas residuales del beneficio húmedo del café, la recuperación directa de lípidos desde la fracción líquida está poco documentada y presenta retos técnicos y económicos significativos. Para ilustrar: en los granos verdes de café se reporta un contenido de lípidos alrededor del 10-13% sobre peso seco (Echeverri-Giraldo et al., 2023). Sin embargo, en el agua de lavado o el efluente líquido, los estudios sobre contenido lipídico son escasos, lo que implica que su concentración real puede ser demasiado baja para justificar técnicas de extracción intensivas. La baja disponibilidad, la dispersión en emulsiones y la necesidad de grandes volúmenes para recuperar cantidades significativas de lípidos hacen que esta ruta requiera un análisis económico detallado antes de implementarse . Lo más eficiente es focalizar la recuperación en las fracciones sólidas (pulpa, SCG o lodos), donde el contenido graso es mayor y la extracción posterior puede integrarse dentro de un sistema de transformación de subproductos agroindustriales orientados a la síntesis de PHA-mcl (Pyrzynska, 2024).

f. Rutas biológicas directas: cultivo puro vs. cultivo mixto.

Existen dos enfoques principales para convertir los sustratos derivados del efluente en biopolímeros.

1. Cultivos puros y cepas seleccionadas (Cupriavidus, Bacillus, Pseudomonas): requieren sustratos relativamente definidos, como azúcares o lípidos purificados, además de un control estricto de nutrientes y condiciones estériles o semiestériles. Estos sistemas logran altos rendimientos por gramo de sustrato, pero implican mayores costos de infraestructura y operación (Delgado & Cordoba, 2015).
2. Cultivos mixtos (biomasas no estériles enriquecidas por selección): presentan una tolerancia superior a corrientes complejas y residuos, aceptan como fuente de carbono los ácidos grasos volátiles (VFAs) y permiten procesos más económicos y escalables en condiciones no estériles. Estudios como el de Tamang et al. (2020), han demostrado que los cultivos mixtos alimentados con VFAs pueden alcanzar rendimientos comparables a los sistemas puros, consolidándose como una opción realista para efluentes agroindustriales.

Ahora, si nos referimos a los efluentes del beneficio húmedo del café, caracterizados por variabilidad en su composición y presencia de inhibidores, los cultivos mixtos alimentados con VFAs ofrecen mayor robustez operacional. Sin embargo, si se dispone de hidrolizados azucarados limpios y controlados, los cultivos puros pueden ser preferibles para obtener biopolímeros con propiedades más definidas y reproducibles (Gracia et al., 2023).

Integración operador-económica y criterios de selección.

El rendimiento químico no es el único factor determinante: la selección de rutas debe considerar la complejidad operativa, los costos energéticos, el consumo de reactivos y la huella de carbono del proceso. Diversas revisiones sobre el tratamiento de aguas residuales del beneficio húmedo del café coinciden en que muchas tecnologías son técnica y ambientalmente viables, como los procesos de oxidación avanzada (AOP) o el uso de resinas

de intercambio iónico, pero cuestan una fortuna en la producción a gran escala. Por ello, el enfoque más racional es priorizar esquemas integrados que logren una detoxificación suficiente con mínima complejidad operativa (Ijanu et al., 2019).

Combinaciones operativas como la adsorción en lecho fijo con carbón activado o biochar, seguida de una fermentación acidogénica controlada, constituyen un equilibrio operativo eficiente: la adsorción reduce la carga de inhibidores y estabiliza el sustrato, mientras que la acidogénesis transforma la fracción carbonada residual en VFAs aprovechables para la síntesis de PHA. Diversos estudios respaldan esta estrategia, evidenciando mejoras significativas en la producción de VFAs y en la estabilidad del proceso al integrar adsorbentes en la etapa previa a la fermentación (Reyhanitash et al., 2017; Chen et al., 2023; Nagarajan et al., 2022).

Para evaluar de manera ordenada los métodos de extracción y transformación identificados en la literatura, se definieron una serie de criterios que permiten comparar su viabilidad frente a las características de los residuos generados en el beneficio húmedo del café. Estos criterios, junto con los pesos asignados a cada uno, se presentan en la siguiente tabla.

Tabla 2

Criterios y pesos para la evaluación de métodos de extracción y transformación.

Criterio	Peso (%)	Descripción	Escala usada
Eficiencia de recuperación	30%	Capacidad del método para recuperar la mayor cantidad del compuesto objetivo.	1 (muy bajo) - 5 (muy alto)

Criterio	Peso (%)	Descripción	Escala usada
Requerimientos técnicos	15%	Nivel de complejidad operativa; una puntuación alta indica menor dificultad de implementación.	1 (muy exigente) - 5 (muy sencillo)
Compatibilidad con residuos del café	20%	Grado en que el método se ajusta a las características químicas del efluente del beneficio húmedo.	1 (pobre) - 5 (alta compatibilidad)
Pureza del compuesto extraído	20%	Calidad del producto obtenido tras el proceso.	1 (impureza alta) - 5 (pureza alta)
Sostenibilidad del proceso	15%	Impacto ambiental y consumo de recursos del método.	1 (bajo) - 5 (alto)

Nota. Los pesos asignados a cada criterio se definieron con base en enfoques de evaluación multicriterio utilizados para comparar tecnologías y procesos, considerando factores como eficiencia, compatibilidad con el residuo, calidad del producto y sostenibilidad. Tomado de Makwakwa et al., 2024; Sitorus & Brito-Parada, 2020; Lamelas et al., 2012.

Métodos evaluados

Método A: Pretratamiento físico-mecánico (cribado, decantación, centrifugado)

Método B: Eliminación de inhibidores (adsorción en lecho fijo, biochar, AOP, tratamiento enzimático)

Método C: Hidrólisis enzimática (pectinasas más celulasas; sacárificación)

Método D: Hidrólisis ácida (diluta, controlada)

Método E: Recuperación de lípidos (UAE/MW o extracción solvente, principalmente en sólidos)

Método F: Producción microbiana (rutas: cultivo puro y cultivo mixto; etapa de conversión a PHA)

Método G: Downstream o Recuperación de PHA (precipitación, centrifugación, extracción)

Con estos criterios establecidos, fue posible aplicar una matriz (Tabla 3) comparativa a los distintos métodos seleccionados, asignando una puntuación entre 1 y 5 según su desempeño frente a cada criterio. La multiplicación entre el peso y la puntuación permitió obtener un valor ponderado por método, cuyos resultados se muestran en la siguiente tabla.

Tabla 3

Matriz comparativa de métodos de extracción y transformación de compuestos del efluente caficultor.

Criterios	Peso (%)	Método A	Método B	Método C	Método D	Método E	Método F	Método G
Eficiencia de recuperación	30%	0,9	1,2	1,5	1,2	0,6	1,2	0,9
Requerimientos técnicos	15%	0,6	0,45	0,6	0,45	0,45	0,45	0,3
Compatibilidad con residuos del café	20%	1	0,8	1	0,6	0,6	0,8	0,6
Pureza del compuesto extraído	20%	0,4	0,8	1	0,6	0,8	0,8	1
Sostenibilidad del proceso	15%	0,6	0,45	0,75	0,3	0,3	0,45	0,3
Puntaje ponderado total	100%	3,5	3,7	4,85	3,15	2,75	3,7	3,1

Nota. Elaboración propia a partir de la revisión bibliográfica realizada en el desarrollo del objetivo específico 2. Ijanu et al., 2019; Jang et al., 2018; Bhardwaj et al., 2022; Chen et al., 2023.

Método A: Pretratamiento físico-mecánico.

Método B: Eliminación de inhibidores.

Método C: Hidrólisis enzimática.

Método D: Hidrólisis ácida.

Método E: Recuperación de lípidos.

Método F: Producción microbiana.

Método G: Recuperación de PHA (downstream).

El análisis ponderado muestra que el Método C (Hidrólisis enzimática), obtuvo el puntaje más alto (4,85), destacando como la técnica más eficiente para liberar azúcares fermentables a partir de los sólidos del mucílago y la pulpa, gracias a su alta selectividad y baja formación de subproductos inhibidores, lo que la convierte en una fase particularmente favorable para procesos biotecnológicos posteriores como la fermentación microbiana orientada a la producción de biopolímeros. Sin embargo, su viabilidad práctica está condicionada financieramente debido al alto costo de los insumos enzimáticos, especialmente cuando se requiere la combinación de múltiples enzimas especializadas (celulasas, pectinasas, proteasas). Este costo puede representar entre el 20 y el 40% del gasto operativo en procesos de escala piloto o industrial, dependiendo del grado de optimización y las estrategias de reutilización o inmovilización aplicadas. En la Tabla 4 se presenta una comparación general de la participación de costos en las principales etapas de los procesos de conversión biotecnológica de biomasa.

Tabla 4

Participación de costos e insumos en etapas del proceso de bioconversión de biomasa lignocelulósica.

Etapa del proceso	Tipo de insumo	Ejemplo de producto industrial	Unidad de costo de referencia	Rango de precio aproximado	Participación en costos operativos (%)
Hidrólisis enzimática	Enzimas hidrolíticas	Pectinasa (Pectinex Ultra SP-L), Celulasa (Celluclast 1.5L)	USD/kg de enzima	15-40 USD/kg	20-40
Eliminación de inhibidores	Adsorbentes y enzimas oxidativas	Carbón activado granular, laccasas	USD/kg	2-6 USD/kg	5-15
Fermentación microbiana	Nutrientes y control de cultivo	Extracto de levadura, sales minerales, buffers	USD/kg	8-20 USD/kg	15-30
Separación y recuperación	Equipos de separación	Membranas de filtración, centrifugación	USD/m² o USD/kg biomasa	5-15 USD/m²	10-20

Etapa del proceso	Tipo de insumo	Ejemplo de producto industrial	Unidad de costo de referencia	Rango de precio aproximado	Participación en costos operativos (%)
Utilidades y operación	Energía y servicios industriales	Electricidad, vapor de proceso, agua industrial	USD/kWh	0,08-0,15 USD/kWh	10-25

Nota. Los valores presentados corresponden a rangos aproximados de costos reportados en análisis tecno-económicos de procesos de bioconversión de biomasa lignocelulósica a escala industrial. Los precios de insumos (USD/kg) reflejan valores de referencia del mercado internacional para enzimas industriales, adsorbentes y nutrientes utilizados en bioprocesos. Los porcentajes de participación en los costos operativos (OPEX) pueden variar según factores como el tipo de biomasa utilizada, la eficiencia del pretratamiento y el grado de integración energética del proceso. Elaboración propia, adaptado de Saini et al., 2022; Johnson, 2016; Intelligence, 2026; Sosa-Martínez et al., 2024; Diamantopoulou et al., 2025; Cunniffe et al., 2025.

Como se observa en la Tabla 4, la bioconversión de biomasa lignocelulósica sigue siendo un proceso en el que las etapas biotecnológicas influyen de manera importante en los costos operativos. La hidrólisis enzimática destaca como una de las fases con mayor efecto, ya que puede representar entre el 20% y el 40% del costo total del proceso. Esto se explica por el uso de enzimas especializadas, como pectinasas y celulasas, necesarias para descomponer los compuestos presentes en la biomasa y liberar azúcares fermentables. Estos insumos suelen tener un costo elevado en el mercado y requieren condiciones controladas de operación, especialmente en términos de pH y temperatura.

La fermentación microbiana concentra entre el 15% y el 30% de los costos operativos. Aunque los nutrientes empleados en esta etapa tienen un precio menor que el de las enzimas, el proceso exige mantener condiciones adecuadas para el crecimiento de los microorganismos, lo que implica la adición continua de nutrientes, control del pH y suministro de aireación, factores que incrementan su peso dentro del gasto total del proceso.

Las utilidades asociadas al funcionamiento del sistema también representan una parte relevante del costo operativo. El consumo de energía eléctrica y de vapor de proceso constituye un componente constante en este tipo de operaciones. A nivel industrial, el costo de la energía eléctrica suele ubicarse aproximadamente entre 0,08 y 0,15 USD/kWh, lo que resalta la necesidad de un manejo eficiente de la energía en estos procesos.

En términos generales, la producción de biopolímeros como PHA continúa siendo más costosa que la fabricación de plásticos convencionales derivados del petróleo. Reportes en la literatura indican que el costo de producción de PHA puede situarse aproximadamente entre 4 y 12 USD por kilogramo, mientras que plásticos ampliamente utilizados como el polietileno o el polipropileno suelen producirse a costos cercanos a 1-1,6 USD/kg (Koller &

Mukherjee, 2022; Choi & Lee, 1999; Chen, 2009). Esta diferencia se explica principalmente por el costo de las materias primas utilizadas en la fermentación, el consumo de energía durante el proceso biotecnológico y las etapas necesarias para recuperar y purificar el biopolímero obtenido.

Así, aunque técnicamente superior, la hidrólisis enzimática solo resulta viable bajo modelos operativos que integren mecanismos de reducción de costos (producción interna de enzimas, co-inmovilización o modelos de economía circular con coproductos de alto valor agregado).

En segundo lugar se posiciona el Método B (Eliminación de inhibidores) y el Método F (Producción microbiana), ambos con un puntaje ponderado de 3,7. El primero destaca como una etapa esencial para mejorar la fermentabilidad del sustrato, especialmente mediante adsorción con biochar o tratamientos enzimáticos con laccasas, que reducen la toxicidad sin comprometer la sostenibilidad del proceso. Por su parte, la producción microbiana, ya sea con cultivos mixtos o puros, representa la fase de conversión central hacia la síntesis de PHA, destacando por su flexibilidad y adaptabilidad a distintos tipos de efluentes agroindustriales.

El Método A (Pretratamiento físico-mecánico) obtuvo un puntaje intermedio (3,5), confirmando su papel como etapa inicial de acondicionamiento más que como método de extracción directa. En contraste, la hidrólisis ácida (Método D) y la recuperación de lípidos (Método E) presentaron menor viabilidad teórica (3,15 y 2,75 puntos, respectivamente), debido a la formación de subproductos inhibidores, la necesidad de neutralización posterior y los bajos rendimientos en medios acuosos, factores que limitan su sostenibilidad técnica y económica. Finalmente, el downstream o recuperación de PHA (Método G) alcanzo un

puntaje de 3,1, afectado principalmente por la alta demanda técnica y el uso potencial de solventes, aunque ofrece productos de elevada pureza en la fase final del bioproceso.

Por tanto, dentro de este objetivo no es posible hablar de una única técnica "ideal" en sentido absoluto, sino de una combinación de procesos físicamente robustos y económicamente adaptables, entre los cuales la hidrólisis enzimática se perfila como el componente clave cuando se cuenta con respaldo económico o integración biotecnológica que permita amortizar costos.

Objetivo 3: Determinar las aplicaciones potenciales de los bioplásticos producto de las aguas residuales del café en empaques para la industria agrícola, considerando sus propiedades técnicas y la viabilidad según estándares de calidad aplicables.

La literatura publicada en los últimos diez a quince años (periodo en el que se ha consolidado la investigación sobre valorización de residuos de la industria cafetera) muestra dos rutas principales y complementarias para su aprovechamiento en el desarrollo de materiales biobasados. La primera consiste en el uso de residuos sólidos como los spent coffee grounds (SCG), la cáscara y la pulpa de café, que se incorporan como rellenos o refuerzos en matrices termoplásticas, típicamente ácido poliláctico (PLA) o poli(3-hidroxibutirato-co-3-hidroxivalerato) (PHBV), para la obtención de biocompuestos. La segunda ruta se centra en la extracción y utilización de fracciones solubles y estructuras polisacáridas, como azúcares hidrolizados, celulosa o nanocelulosa y biocelulosa bacteriana, orientadas a la formulación de películas y fibras con alto contenido biobasado.

Estudios experimentales han documentado que la adición de proporciones moderadas de SCG (entre 1 y 5% p/p) en PLA puede mejorar la rigidez y la estabilidad térmica del

material sin comprometer su procesabilidad, siempre que se garantice una adecuada dispersión de las partículas (Yu et al., 2023; Paramatti et al., 2024), mientras que investigaciones centradas en la obtención de celulosa nanométrica y biocelulosa a partir de subproductos del café destacan su utilidad como refuerzo estructural o como base para películas funcionales, con propiedades mecánicas competitivas (Malarat et al., 2023; Sangta et al., 2024).

Ambas estrategias reflejan enfoques técnicos diferentes, ya que, mientras los biocompuestos basados en matrices termoplásticas permiten su procesamiento mediante técnicas convencionales como extrusión, moldeo o termoformado, los materiales polisacáridos y biocelulósicos se orientan hacia aplicaciones específicas como recubrimientos, membranas o barreras funcionales.

En términos de desempeño, los biopolímeros comerciales como PLA o PHAs exhiben valores de resistencia a la tracción que generalmente oscilan entre 30 y 70 MPa, dependiendo de su grado de cristalinidad y condiciones de procesado (Khouri et al., 2024). La incorporación de SCG dentro del rango óptimo de carga mantiene estos valores dentro de parámetros industriales aceptables, aunque incrementos superiores pueden provocar fenómenos de aglomeración y pérdidas de tenacidad (Yu et al., 2023; Paramatti et al., 2024). Paralelamente, las películas de nanocelulosa o biocelulosa extraídas de residuos de café presentan propiedades mecánicas adecuadas para aplicaciones de baja carga estructural; sin embargo, su marcada hidrofilicidad demanda tratamientos de superficie o recubrimientos complementarios para garantizar un desempeño funcional en ambientes húmedos (Malarat et al., 2023; Sangta et al., 2024).

A continuación se presentan los resultados del análisis comparativo entre las propiedades técnicas de bioplásticos derivados de residuos de la industria cafetera y los requisitos mínimos establecidos en normas internacionales, junto con parámetros técnicos reportados en la literatura científica reciente. Con este propósito, se incluyen dos tablas: la primera (Tabla 5) reúne las propiedades reportadas para bioplásticos obtenidos a partir de residuos sólidos del café y sus componentes estructurales; la segunda (Tabla 6) compila los requisitos normativos exigidos para materiales biodegradables destinados a empaques y dispositivos agrícolas. Este contraste permite evaluar la viabilidad técnica y regulatoria de su aplicación en el sector agrícola, asegurando compatibilidad con las exigencias funcionales y ambientales vigentes.

1. Comparación de propiedades técnicas

Las propiedades clave evaluadas fueron: resistencia mecánica, biodegradabilidad, permeabilidad al vapor de agua y estabilidad térmica. Estas propiedades permiten determinar si el bioplástico puede desempeñarse adecuadamente como material de empaque en contextos agrícolas, sometidos a factores como humedad, carga mecánica, radiación solar y actividad microbiana.

Acto seguido se presenta la Tabla 5, donde se incluyeron estudios que reportan materiales elaborados a partir de otros residuos del mismo fruto como pulpa, cascarilla o mucílago, con el fin de contextualizar las propiedades técnicas de los bioplásticos potencialmente obtenibles a partir de compuestos presentes en las aguas residuales del beneficio húmedo del café. Estos materiales se utilizan únicamente como referencia comparativa, ya que comparten compuestos estructurales similares, principalmente polisacáridos, azúcares y lignocelulosa, que también pueden encontrarse en las corrientes

líquidas del proceso. Por lo tanto, los resultados reportados permiten aproximar el comportamiento esperado de bioplásticos derivados del efluente caficultor.

Tabla 5

Propiedades representativas de bioplásticos derivados o formulados con residuos del café o de sus componentes estructurales.

Bioplástico	Matriz polimérica	Componentes orgánicos	Resistencia mecánica (MPa)	Biodegradabilidad (días)	Permeabilidad al vapor de agua (g/m²*día)	Estabilidad térmica (°C)	Referencia
PLA + SCG (biocomposite)	PLA reforzado con 5-15 % de residuos de café gastado (SCG)	Partículas sólidas de café gastado (lignocelulosa aromática)	28-42 MPa (PLA ≈ 50 MPa; la adición de SCG reduce la resistencia pero mejora módulo y rigidez)	≤180 días en compost industrial (90% degradación)	20-60 g/m²*día (según espesor y cristalinidad)	Tg ≈ 60-65°C, Tm ≈ 150-170°C (PLA)	(Masssijaya et al., 2023; Boughanmi et al., 2024; Ranakoti et al., 2022)
Celulosa bacteriana (BC) obtenida de cáscara o pulpa de café	Película de celulosa microbiana purificada	Celulosa de residuos de café (cáscara/pulpa)	10-80 MPa (varía según compactación y grado de purificación)	30-120 días (rápida en compostaje y digestión enzimática)	Baja-moderada (hidrofílica; se puede reducir con recubrimientos)	Estabilidad térmica hasta >200°C antes de descomposición térmica; comportamiento depende de humedad	(Gondim et al., 2024; Elsacker et al., 2021)
Matriz polisacarídica (almidón/pectina) + lignina de café	Bioplástico gelificado o film fundido	Polisacáridos solubles y lignina de cáscara/pulpa	8-25 MPa (puede aumentar con plastificantes o refuerzos)	15-90 días en compost controlado (materiales polisacáridos se mineralizan	30-100 g/m²*día (polisacáridos puros son más permeables al vapor que PLA; aditivos reducen WVTR)	Tg baja (material blando); degradación térmica inicia ≈150-250°C	(Coelho et al., 2020; Łopusiewicz et al., 2018)

Bioplástico	Matriz polimérica	Componentes orgánicos	Resistencia mecánica (MPa)	Biodegradabilidad (días)	Permeabilidad al vapor de agua (g/m²*día)	Estabilidad térmica (°C)	Referencia
				relativamente rápido)			
Film de almidón/pectina con extractos hidrolizados de pulpa de café	Biopolímero flexible (fundido o moldeado)	Polisacáridos solubles (pectinas, azúcares hidrolizados) y compuestos fenólicos	10-30 MPa (depende plastificantes y grado de reticulación)	15-90 días (en compostaje industrial o laboratorio)	25-90 g/m²*día (variable según grado de reticulación)	Tg ≈ 80-120°C; desnaturalización sobre 150-200°C	(Coelho et al., 2020; Łopusiewicz et al., 2018)
PHBV/PLA reforzado con fibras de celulosa (fibra aislada del café)	Copolímero PHBV o mezcla PHBV/PLA + fibras lignocelulósicas	Fibras celulósicas aisladas de la cascara y/o pergamino	15-60 MPa (PHBV puro 10-35 MPa; con refuerzo y compatibilización puede superar 60 MPa)	PHBV biodegradado en compost/agua (60-180 días dependiendo del espesor y condiciones ambientales)	10-60 g/m²*día (PHBV/PLA y compuestos mejoran barrera frente a polisacáridos)	Tg ≈ -5°C; Tm ≈ 150-175 °C; útil hasta ≈200°C	(Rivera-Briso & Serrano-Aroca, 2018; Frącz et al., 2023; Janowski et al., 2025)

Nota. La información presentada resume valores promedio o rangos reportados en estudios publicados entre 2018 y 2024 sobre bioplásticos derivados o formulados con residuos del café. Las propiedades pueden variar según el método de procesamiento, la proporción de aditivos y las condiciones de ensayo. MPa = megapascales; WVTR = tasa de transmisión de vapor de agua. Datos

referenciados corresponden a estudios reales de autores como Masssijaya et al. (2023), Gondim et al. (2024), Rivera-Briso & Serrano-Aroca (2018), entre otros.

2. Comparación con requisitos técnicos y respaldo normativo

En esta sección, se llevó a cabo una revisión normativa para contrastar estas propiedades con las exigencias técnicas requeridas para materiales destinados a empaques agrícolas, especialmente en el caso de productos biodegradables o compostables.

Se presenta la Tabla 6, donde se muestra el parámetro evaluado, las normas específicas (como ASTM, ISO, EN), el requisito técnico referido, y el objetivo técnico recomendado, asociado a materiales del sector agrícola.

Tabla 6

Parámetros técnicos, respaldo normativo y objetivos prácticos.

Parámetro técnico	Norma / qué exige	¿La norma fija un umbral numérico?	Valor normado	Objetivo técnico recomendado
Biodegradabilidad en compostaje industrial	ISO 17088 (especifica procedimientos y requisitos para declarar un plástico "compostable" en instalaciones industriales; se basa en ensayos de biodegradación, desintegración y ecotoxicidad; remite a métodos como ISO 14855 o ASTM D5338 para medir mineralización)	Sí	La familia de normas para compostabilidad exige ensayos de biodegradación y desintegración y criterios operativos equivalentes a ≥90% de mineralización en ensayo respirométrico en plazos prácticos de ensayo.	≥90% mineralización (CO_2) en ≤180 días en ensayo respirométrico controlado para poder utilizar la etiqueta "compostable" en instalaciones industriales (valor operativo ampliamente utilizado en certificación y literatura técnica) (Raval, 2025).
Biodegradación en suelo (films agrícolas)	EN 17033:2018 (norma específica para películas mulch biodegradables: exige pruebas de biodegradación en suelo, desintegración, ecotoxicidad, y control de constituyentes; la norma toma como referencia esquemas tipo "OK Biodegradable-soil").	Sí	EN 17033 exige evaluación de biodegradación en suelo y criterios prácticos de desintegración/ecotoxicidad; en certificaciones basadas en la	Demostrar cumplimiento de EN 17033 mediante ensayos de degradación en suelo y pruebas de ecotoxicidad; como referencia operativa, diseño para desintegración significativa dentro de la campaña agrícola (p. ej. 6-24 meses según cultivo o espesor) (Manger, 2021).

Parámetro técnico	Norma / qué exige	¿La norma fija un umbral numérico?	Valor normado	Objetivo técnico recomendado
			norma se usan criterios equivalentes (p. ej. 90% en plazos de campo o ensayo que pueden extenderse hasta 24 meses según protocolo de verificación).	
Resistencia mecánica (tensión / elongación)	ASTM D882 (método de ensayo para determinar propiedades a la tracción de films y láminas delgadas; describe procedimiento, geometría de probeta y condiciones de ensayo). La norma es método de ensayo; no fija valores mínimos de aceptación.	No	No fija valor	Establecer especificación de producto; valores típicos de la industria para uso agrícola: films de mulch: ≥16-20 MPa como referencia de diseño; piezas rígidas (bandejas, macetas): 15-30 MPa según geometría y requerimiento de manejo. Estos son objetivos técnicos de diseño, no requisitos normativos (Parida et al., 2024; Liu et al., 2025).
Permeabilidad al vapor de agua (WVTR)	ASTM E96 (método gravimétrico para determinar WVTR); las norma describe procedimientos de ensayo y condiciones de prueba. No establece un umbral universal.	No	No fija valor	La permeabilidad al vapor de agua dependera según el uso: en films de mulch se aceptan 20-50 g/m²*día, mientras que en envases de semillas o productos secos se requiere ≤20-30 g/m²*día (Yang et al., 2022).

Parámetro técnico	Norma / qué exige	¿La norma fija un umbral numérico?	Valor normado	Objetivo técnico recomendado
Estabilidad térmica / procesabilidad	ISO 11357 series / ASTM (D3418/E1356) - normas que definen cómo medir Tg, Tm y estabilidad térmica; no fijan temperaturas mínimas de servicio, son métodos de caracterización.	No	No fija valor	Garantizar que Tg del material esté por encima de la temperatura de uso y una Tm adecuada para extrusión o termoformado (p. ej. PLA Tm ≈150-170°C; permitiendo procesarlo de forma segura). Esto es especificación de material, no un requisito normativo (Velghe et al., 2023).
Compatibilidad agrícola y ecotoxicidad	ISO 17088 y EN 17033 exigen ensayos de ecotoxicidad y control de constituyentes (metales pesados, sustancias peligrosas) para evitar efectos adversos en compost o suelos; las normas obligan a evaluar efectos en germinación o biomasa y composición química de material.	No	Tiene un criterio cualitativo y límites para contaminantes.	Cumplir límites de metales pesados y no reducir germinación o su biomasa en ensayos normalizados; seguir protocolos de ISO 17088 y EN 17033 para ensayos ecotox (Barbir et al., 2023; Ao et al., 2025).

Nota. La columna “Norma / qué exige” indica el alcance verificado de la norma citada (método de ensayo o requisito funcional). Cuando la norma no fija un umbral numérico, la tabla ofrece un objetivo técnico recomendado para diseño y pruebas piloto basado en valores de la industria y literatura técnica, es decir, son objetivos de diseño, no requisitos normativos. Consulte los textos completos de

las normas para detalles de procedimiento, condiciones de ensayo y requisitos de verificación: ISO 17088, EN 17033, ASTM D5338, ASTM D882, ASTM E96, ISO 14855 / ISO 14855-1 / ISO 14855-2, ISO 11357, ASTM (D3418/E1356).

Los resultados obtenidos a partir de la comparación entre las propiedades técnicas de los bioplásticos derivados de los residuos del café y los parámetros evaluados para su uso en empaques agrícolas revela un panorama que combina oportunidades concretas con limitaciones técnicas que deben ser consideradas según la aplicación prevista.

Los biocompuestos a base de PLA con adición de residuos de café (SCG), así como las formulaciones de PHBV reforzadas con fibras de celulosa, demostraron una combinación atractiva de resistencia mecánica y procesabilidad. Ambas alternativas alcanzan o superan los valores típicos de resistencia utilizados como referencia en aplicaciones agrarias como films de acolchado y contenedores biodegradables, al ubicarse en rangos de 28-60 MPa, superando el umbral mínimo de 16-20 MPa que suelen exigir los films de mulch. Además, su estabilidad térmica, con temperaturas de fusión superiores a los 150°C, posibilita su transformación mediante procesos convencionales como extrusión o termoformado, lo cual representa una ventaja clara en términos de escalabilidad industrial. Por su parte, los biopolímeros basados exclusivamente en matrices polisacarídicas o celulósicas presentaron valores mecánicos más modestos, entre 8 y 25 MPa, resultando adecuados para aplicaciones de menor exigencia estructural, como envolturas biodegradables, recubrimientos o macetas de ciclo corto, pero insuficientes para soportar tensiones prolongadas o altas demandas mecánicas sin refuerzo adicional.

En cuanto a la biodegradabilidad, todos los bioplásticos evaluados presentan capacidades de desintegración compatibles con los requisitos de las normas internacionales, si bien esto depende de las condiciones ambientales del proceso. Los polímeros celulósicos y los bioplásticos en base a polisacáridos muestran tiempos de degradación rápida, de entre 15 y 120 días en sistemas controlados, siendo especialmente aptos para aplicaciones donde se requiera retorno acelerado al entorno agrícola. Por otro lado, materiales como PLA y PHBV cumplen con las normativas de compostabilidad (ISO 17088, ASTM D5338), pero suelen requerir condiciones térmicas e hídricas más específicas, como las que se encuentran en compostaje industrial, lo que limita su degradación efectiva en campo abierto sin manejo técnico complementario.

Respecto a la permeabilidad al vapor de agua (WVTR), un factor clave para aplicaciones como el mulching o el almacenamiento de insumos agrícolas, los biopolímeros termoplásticos (PLA, PHBV y sus compuestos reforzados) presentan un desempeño significativamente superior a los materiales de base polisacarídica. En particular, los valores de permeabilidad reportados para PLA con SCG y PHBV reforzado varían entre 10 y 60 g/m²*día, mientras que los biopolímeros polisacarídicos tienden a superar los 80 g/m²*día, lo cual aumenta la susceptibilidad a la absorción de humedad y restringe su uso en ambientes con alta exposición al agua o donde se requiera fuerte control de humedad, a menos que se sometan a procesos de recubrimiento hidrofóbico o laminación.

Por último, la compatibilidad ambiental y la seguridad agrícola constituyen criterios transversales para cualquier material biodegradable dirigido a uso agroindustrial. Los compuestos orgánicos derivados del café, especialmente en matrices de celulosa o polisacáridos, poseen una composición química sencilla y libre de aditivos sintéticos, lo que

reduce el riesgo de liberar sustancias tóxicas o persistentes durante su degradación. Sin embargo, cuando se emplean matrices como PLA o PHBV combinadas con refuerzos o compatibilizantes, es necesario monitorear la presencia de aditivos, residuos químicos o partículas no biodegradables, dado que normas como EN 17033 e ISO 17088 exigen que el material no genere efectos negativos en el suelo ni altere parámetros biológicos del compost resultante.

Los resultados permiten concluir que los biopolímeros basados en PLA y PHBV reforzado con fibras de café ofrecen el mejor desempeño para aplicaciones agrícolas que demandan mayor resistencia y estabilidad, como films de acolchado, envases y elementos estructurales, siempre y cuando se controle su formulación y ruta de disposición post-uso. Por otro lado, los materiales basados en polisacáridos y celulosa resultan más adecuados para usos de corta duración o en sistemas donde se priorice la degradación acelerada y la ausencia de riesgo ecotoxicológico. La elección final del material dependerá, de la escala del proyecto, las condiciones de valorización post-consumo y el entorno ambiental en el que se pretenda utilizar.

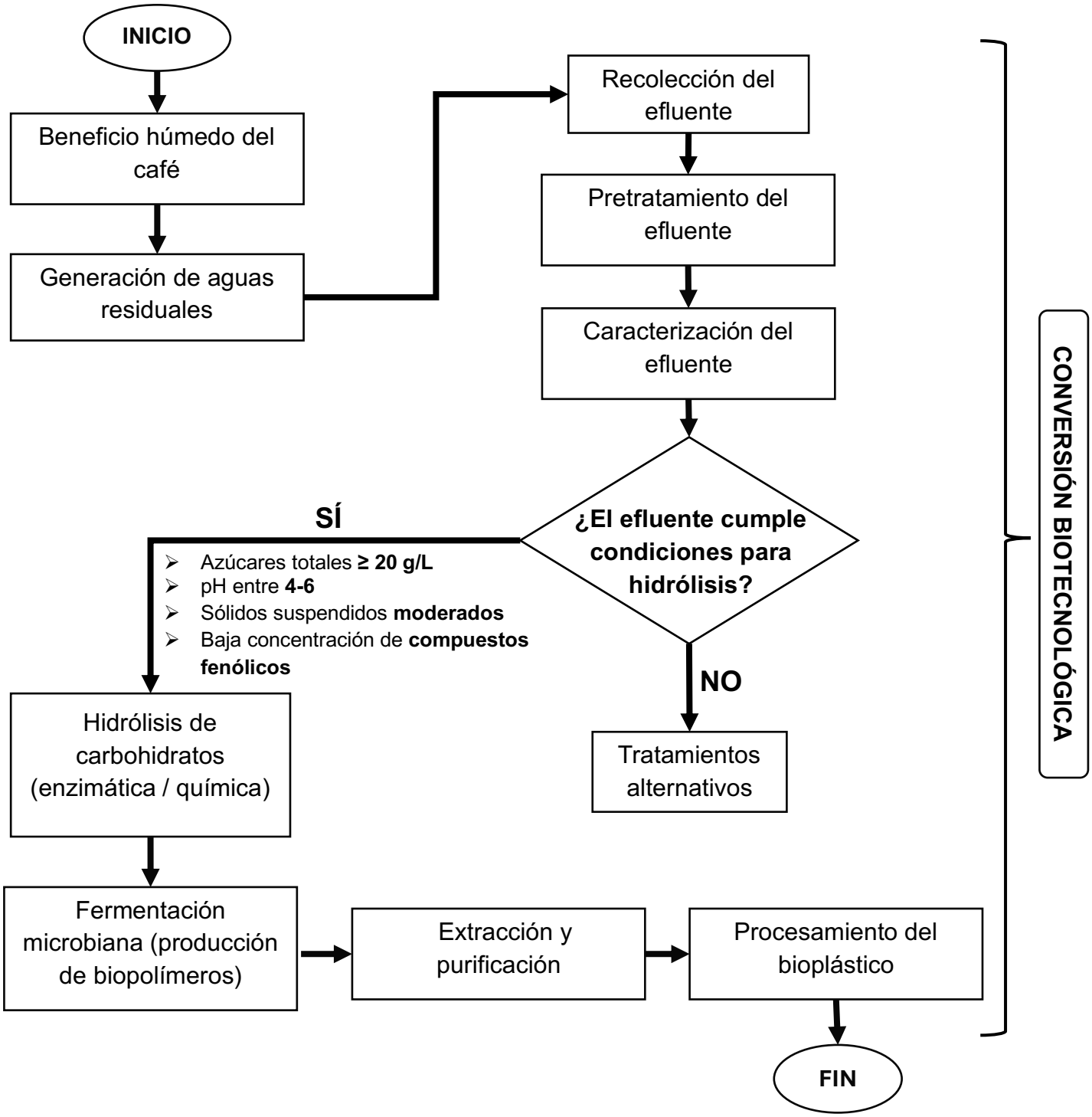
Con el propósito de mostrar cómo los resultados analizados podrían aplicarse en un contexto agroindustrial, se presenta en la Gráfica 7 un flujograma conceptual del proceso propuesto en este estudio. Este diagrama reúne, de manera general, las principales etapas descritas en la literatura, como el pretratamiento del efluente, la caracterización de sus compuestos, la hidrólisis de carbohidratos, la conversión microbiana y el procesamiento del material obtenido.

Asimismo, el flujograma incorpora un punto de decisión posterior a la caracterización del efluente, con el fin de evaluar si las condiciones fisicoquímicas del sustrato resultan adecuadas para la aplicación de la etapa de hidrólisis. Este elemento permite representar de forma simplificada la selección del tratamiento más conveniente según la composición del efluente.

Cabe aclarar que este flujograma no corresponde a un diseño de ingeniería a escala industrial ni incluye especificaciones técnicas de operación o dimensionamiento de equipos. Dado que el presente estudio se desarrolla desde un enfoque teórico y de análisis documental, el diagrama se plantea únicamente como una representación conceptual del proceso, que permite visualizar de manera general cómo el efluente generado en el beneficio húmedo del café podría transformarse en una fuente potencial para la obtención de bioplásticos.

Gráfica 7

Flujograma conceptual de valorización de aguas residuales del café para producción de biopolímeros.



Nota. El punto de decisión posterior a la caracterización del efluente indica la evaluación de parámetros fisicoquímicos que determinan la viabilidad de aplicar la etapa de hidrólisis de carbohidratos para la liberación de azúcares fermentables. Cuando el efluente cumple condiciones adecuadas de composición (concentración de azúcares, rango de pH y baja presencia de compuestos inhibidores), el proceso puede continuar hacia la hidrólisis y posterior fermentación microbiana para la síntesis de biopolímeros. En caso contrario, el efluente puede requerir tratamientos alternativos de acondicionamiento o eliminación de inhibidores antes de su conversión biotecnológica. Elaboración propia, adaptado de Murthy & Naidu, 2012; Cano et al., 2024; Tsang et al., 2019.

3.7. Conclusiones

El presente estudio demuestra que la valorización biotecnológica de las aguas residuales del beneficio húmedo del café representa una estrategia técnicamente viable para la obtención de materiales biodegradables con aplicaciones concretas en la agricultura sostenible. La investigación permitió comprobar que este efluente, tradicionalmente considerado un pasivo ambiental, contiene un conjunto de compuestos orgánicos, principalmente carbohidratos, ácidos orgánicos, proteínas, lípidos y fibras lignocelulósicas, con alto potencial para la síntesis directa o indirecta de biopolímeros.

En el primer objetivo se logró identificar y caracterizar estos compuestos, cuantificando su presencia a partir de estudios científicos recientes (2018-2024). Se estableció que los carbohidratos fermentables constituyen la fracción mayoritaria (hasta 5-10 g/L), seguidos de ácidos orgánicos (2-6 g/L), compuestos fenólicos y trazas lipídicas. Este perfil químico sustenta la premisa de que las aguas residuales de café pueden funcionar como sustratos de alto valor para procesos biotecnológicos controlados.

En el segundo objetivo, la evaluación comparativa de los principales métodos de extracción y transformación evidenció que la eficiencia técnica de las tecnologías disponibles, como la centrifugación, fermentación acidogénica, adsorción y, especialmente, la hidrólisis enzimática, no garantiza por sí sola su viabilidad en escenarios reales. Factores como costo, estabilidad operativa y tolerancia a inhibidores deben ser evaluados en conjunto.

En ese sentido, aunque la hidrólisis enzimática se confirma como la estrategia con mejores resultados en términos de rendimiento bioquímico, su alto costo de ejecución posiciona a las técnicas físico-mecánicas y a la fermentación acidogénica como rutas

alternativas de mayor pertinencia cuando los recursos son limitados o cuando se busca una implantación gradual en el contexto rural o de pequeña industria.

Finalmente, en el tercer objetivo se demostró que los biopolímeros obtenidos, ya sea por vía microbiana (PHBV, PHA) o mediante incorporación de residuos sólidos (SCG, fibras) a matrices comerciales como PLA, cumplen con normativas internacionales de resistencia mecánica, biodegradabilidad y desempeño térmico aplicables al sector agrícola (ASTM D882, EN 17033, ISO 17088). Los resultados de la matriz comparativa evidencian que biocomposites como PLA+SCG o PHBV reforzado con celulosa alcanzan valores de resistencia entre 25-60 MPa, biodegradación superior al 90% en compostaje industrial y niveles de estabilidad térmica adecuados para termoformado o extrusión, lo que los convierte en alternativas competitivas frente al polietileno convencional en aplicaciones como mulching, envases para fertilizantes o bandejas de plántulas.

En conclusión, el proyecto valida que es técnicamente posible transformar un residuo agroindustrial de alto impacto ambiental en materiales funcionales con proyección comercial y aplicabilidad en cadenas de producción agrícola. La implementación de este modelo representa una oportunidad para reducir la carga contaminante asociada al beneficio húmedo del café, fortalecer la circularidad de recursos en zonas cafetaleras y promover el desarrollo de la bioeconomía rural en Colombia, en concordancia con los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS 9, 12 y 13).

3.8. Recomendaciones

Se recomienda que la implementación de este tipo de bioplásticos derivados de aguas residuales del café se realice de manera gradual, comenzando en zonas rurales donde la actividad cafetera es más intensa. La instalación de sistemas básicos de separación física y fermentación controlada permitiría probar la capacidad real de estas aguas para generar compuestos útiles sin requerir fuertes inversiones desde el inicio.

Aunque la hidrólisis enzimática es el método que ofrece mejores resultados para transformar los compuestos orgánicos presentes en estas aguas en precursores útiles para bioplásticos, su costo limita su aplicación inmediata. Por ello, es recomendable priorizar técnicas de menor inversión como la fermentación acidogénica, que se adapta bien a entornos rurales y permite obtener productos intermedios adecuados para la producción de biopolímeros.

Además, al desarrollar los bioplásticos, se sugiere enfocarse en materiales reforzados con residuos del mismo café, como los posos (SCG) o fibras celulósicas, porque mejoran la resistencia y son compatibles con las condiciones de uso en campo agrícola. Antes de su lanzamiento, es indispensable evaluar su comportamiento real en suelos, asegurando que sean biodegradables y no generen efectos negativos en plantas o microorganismos.

3.9. Agradecimientos

En primer lugar, agradezco a Dios, fuente de sabiduría, fortaleza y guía constante a lo largo de todo este proceso. Su presencia fue fundamental para mantener la claridad y el propósito en cada paso de este proyecto.

Extiendo mi más profundo agradecimiento a mi madre y padre, por su apoyo incondicional, confianza y paciencia. Cada palabra de ánimo y cada gesto de respaldo fueron esenciales para continuar avanzando con firmeza.

A mi directora de proyecto, Mg. Yina Paola Ortega Santiago, le expreso mi sincero reconocimiento por su orientación académica, compromiso y dedicación en la construcción de esta investigación. Su acompañamiento fue clave para alcanzar los objetivos propuestos con rigor y claridad.

De igual forma, agradezco a los evaluadores del proyecto, Mg. María del Mar Prieto Manosalva y Mg. Luis Eduardo Galezo Guerra, por sus valiosas observaciones, recomendaciones y aportes que enriquecieron significativamente la calidad académica y técnica de este trabajo. Así mismo, a los docentes del programa de Ingeniería Agroindustrial, quienes durante mi formación aportaron al desarrollo de una visión crítica y científica, elementos que hoy se reflejan en este trabajo. A las fuentes académicas y científicas consultadas, que hicieron posible fundamentar los avances teóricos y prácticos del proyecto, también les extiendo mi gratitud.

Finalmente, a todas las personas que, desde el ámbito académico o personal, contribuyeron con ideas, motivación o palabras de aliento, les expreso mi más sincero agradecimiento. Este logro también les pertenece.

4. BIBLIOGRAFIA

Adolfo, F. C. G. (2022). Wet-coffee processing production wastes : quality, potentials, and valorization opportunities. publishup.uni-potsdam.de. https://doi.org/10.25932/publishup-55882

Ao, R., Liu, Z., Yi, J., Cai, Z., Mu, Y., & Zhao, X. (2025). Ecological risk assessment of PBAT/PLA mulch-derived microplastics on vegetable growth using a species sensitivity distribution approach. Ecotoxicology and Environmental Safety, 303, 118881. https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2025.118881

Argote Pérez, D., Minguela Fernández, K., Acosta Arámburo, P., & Sandoval Pérez, J. (2010). Diseño no experimental transversal [Presentación de diapositivas]. SlideShare. https://es.slideshare.net/slideshow/diseo-no-experimental-transversal-252/4926652

Arya, S. S., Venkatram, R., More, P. R., & Vijayan, P. (2021). The wastes of coffee bean processing for utilization in food: a review. *Journal of Food Science and Technology*, 59(2), 429–444. https://doi.org/10.1007/s13197-021-05032-5

Asociación Española de Normalización (UNE). (2018). UNE-EN 17033:2018. Plásticos. Películas de acolchado biodegradables para su uso en la agricultura y la horticultura. Requisitos y métodos de ensayo. https://thefoodtech.com/wp-content/uploads/2023/11/EXUNE-EN_170332018.pdf

Barbir, J., Arato, E., Chen, C., Granberg, M., Gutow, L., Krång, A., Kröger, S. D., Filho, W. L., Liwarska-Bizukojc, E., Miksch, L., Paetz, K., Prodana, M., Saborowski, R., Rojas, R. S., & Witt, G. (2023). Assessing ecotoxicity of an innovative bio-based mulch film: a multi-environmental and multi-bioassay approach. Frontiers in Environmental Science, 11. https://doi.org/10.3389/fenvs.2023.1171261

Bertran-Llorens, S., Zhou, W., Palazzolo, M. A., Colpa, D. L., Euverink, G. W., Krooneman, J., & Deuss, P. J. (2024). ALACEN: a holistic herbaceous biomass fractionation process attaining a Xylose-Rich stream for direct microbial conversion to bioplastics. ACS Sustainable Chemistry & Engineering, 12(20), 7724–7738. https://doi.org/10.1021/acssuschemeng.3c08414

Bhardwaj, P., Kaur, N., Selvaraj, M., Ghramh, H. A., Al-Shehri, B. M., Singh, G., Arya, S. K., Bhatt, K., Ghotekar, S., Mani, R., Chang, S. W., Ravindran, B., & Awasthi, M. K. (2022). Laccase-assisted degradation of emerging recalcitrant compounds – A review. Bioresource Technology, 364, 128031. https://doi.org/10.1016/j.biortech.2022.128031

Boughanmi, O., Allegue, L., Marouani, H., & Koubaa, A. (2024). Experimental investigations of the influence of spent coffee grounds content on PLA based composite for 3D printing. Journal of Research Updates in Polymer Science, 13, 226–233. https://doi.org/10.6000/1929-5995.2024.13.23

Briassoulis, D., & Dejean, C. (2010). Critical Review of Norms and Standards for Biodegradable Agricultural Plastics Part I. Biodegradation in soil. Journal of

Polymers and the Environment, 18(3), 384–400. https://doi.org/10.1007/s10924-010-0168-1

Campanale, C., Galafassi, S., Di Pippo, F., Pojar, I., Massarelli, C., & Uricchio, V. F. (2023). A critical review of biodegradable plastic mulch films in agriculture: Definitions, scientific background and potential impacts. TrAC Trends in Analytical Chemistry, 170, 117391. https://doi.org/10.1016/j.trac.2023.117391

Campos, G. a. F., Sagu, S. T., Celis, P. S., & Rawel, H. M. (2020). Comparison of batch and continuous Wet-Processing of coffee: changes in the main compounds in beans, By-Products and wastewater. Foods, 9(8), 1135. https://doi.org/10.3390/foods9081135

Cano, E. V., Salas, F. S., Quinto, F. H., & Carreto, C. M. (2024). Hidrólisis enzimática de la cascarilla de café para su uso como sustrato en la producción de bioetanol. Tendencias En Energías Renovables Y Sustentabilidad ., 3(1), 208–214. https://doi.org/10.56845/terys.v3i1.221

Cárdenas, E. L. M., Zapata-Zapata, A. D., & Kim, D. (2018). Hydrogen Production from Coffee Mucilage in Dark Fermentation with Organic Wastes. Energies, 12(1), 71. https://doi.org/10.3390/en12010071

Chen, G. (2009). Plastics completely synthesized by bacteria: polyhydroxyalkanoates. In Microbiology monographs (pp. 17–37). https://doi.org/10.1007/978-3-642-03287-5_2

Chen, W., Zeng, Y., Liu, H., Sun, D., Liu, X., Xu, H., Wu, H., Qiu, B., & Dang, Y. (2023). Granular activated carbon enhances volatile fatty acid production in the anaerobic fermentation of garden wastes. Frontiers in Bioengineering and Biotechnology, 11. https://doi.org/10.3389/fbioe.2023.1330293

Choi, J., & Lee, S. Y. (1999). Factors affecting the economics of polyhydroxyalkanoate production by bacterial fermentation. Applied Microbiology and Biotechnology, 51(1), 13–21. https://doi.org/10.1007/s002530051357

Coats, E. R., Watson, B. S., & Brinkman, C. K. (2016). Polyhydroxyalkanoate synthesis by mixed microbial consortia cultured on fermented dairy manure: Effect of aeration on process rates/yields and the associated microbial ecology. Water Research, 106, 26–40. https://doi.org/10.1016/j.watres.2016.09.039

Coelho, G. O., Batista, M. J., Ávila, A. F., Franca, A. S., & Oliveira, L. S. (2020). Development and characterization of biopolymeric films of galactomannans recovered from spent coffee grounds. Journal of Food Engineering, 289, 110083. https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2020.110083

Creswell, J. W. (2014). A concise introduction to mixed methods research. SAGE Publications.

Cruz-Salomón, A., Ríos-Valdovinos, E., Pola-Albores, F., Lagunas-Rivera, S., Meza-Gordillo, R., & Ruíz-Valdiviezo, V. (2017). Evaluation of hydraulic Retention time on treatment of coffee Processing Wastewater (CPWW) in EGSB Bioreactor. Sustainability, 10(1), 83. https://doi.org/10.3390/su10010083

Cunniffe, J., Berrio, V. R., Hunter, C., Nguyen, T., Salmon, S., Crook, N., Grunden, A., & Sagues, W. J. (2025). Techno-economic analysis of industrial-scale fermentation for formate dehydrogenase (FDH) production. Bioresources and Bioprocessing, 12(1), 145. https://doi.org/10.1186/s40643-025-00985-3

Cydzik-Kwiatkowska, A., Ciesielski, S., Florczyk, M., Pasieczna-Patkowska, S., Komorowska-Kaufman, M., Pomian, W., Jóźwiak, K., & Oleskowicz-Popiel, P. (2024). Biopolymer production in a Full-Scale Activated Sludge wastewater Treatment plant: seasonal changes and promising bacterial producers. Energies, 17(24), 6231. https://doi.org/10.3390/en17246231

Dadi, D., Mengistie, E., Terefe, G., Getahun, T., Haddis, A., Birke, W., Beyene, A., Luis, P., & Van Der Bruggen, B. (2017). Assessment of the effluent quality of wet coffee processing wastewater and its influence on downstream water quality. Ecohydrology & Hydrobiology, 18(2), 201–211. https://doi.org/10.1016/j.ecohyd.2017.10.007

Dartiailh, C., Blunt, W., Sharma, P. K., Liu, S., Cicek, N., & Levin, D. B. (2021). The Thermal and Mechanical Properties of Medium Chain-Length Polyhydroxyalkanoates Produced by Pseudomonas putida LS46 on Various Substrates. Frontiers in Bioengineering and Biotechnology, 8. https://doi.org/10.3389/fbioe.2020.617489

Delgado, A. C. L., & Cordoba, A. M. (2015). Polihidroxialcanoatos (PHA's) producidos por bacterias y su posible aplicación a nivel industrial. Informador Técnico, 79(1), 83. https://doi.org/10.23850/22565035.139

Diamantopoulou, P., Aggelis, G., & Papanikolaou, S. (2025). Renewable carbon sources as microbial substrates for the production of amylases and lignocellulases. Carbon Resources Conversion, 9(2), 100356. https://doi.org/10.1016/j.crcon.2025.100356

Diaz, R., Goswami, A., Clark, H. C., Michelson, R., & Goel, R. (2023). Volatile fatty acid production from primary and secondary sludges to support efficient nutrient management. Chemosphere, 336, 138984. https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2023.138984

Duarte Betancur, J. S., & Granada Sacristán, F. H. (2024). Obtención de un bioplástico a partir de cascarilla de café (Proyecto de grado). Fundación Universidad de América. https://repository.uamerica.edu.co/bitstreams/29ee4233-ff52-400f-bb96-f9d9d40f1bc2/download

Dutta, D., & Sit, N. (2024). A comprehensive review on types and properties of biopolymers as sustainable bio-based alternatives for packaging. Food Biomacromolecules. https://doi.org/10.1002/fob2.12019

Echeverri-Giraldo, L. F., Fandiño, M. I. P., Cadavid, L. M. G., Marín, N. D. R., Ríos, D. a. M., & Pérez, V. O. (2023). Determination of Lipids and Fatty Acids in Green Coffee Beans (Coffea arabica L.) Harvested in Different Agroclimatic Zones of the Department of Quindío, Colombia. Agronomy, 13(10), 2560. https://doi.org/10.3390/agronomy13102560

Efthymiopoulos, I. (2018). Recovery of lipids from spent coffee grounds for use as a biofuel. ResearchGate.

https://www.researchgate.net/publication/327621609_Recovery_of_lipids_from_spent_coffee_grounds_for_use_as_a_biofuel

Elsacker, E., Vandelook, S., Damsin, B., Van Wylick, A., Peeters, E., & De Laet, L. (2021). Mechanical characteristics of bacterial cellulose-reinforced mycelium composite materials. Fungal Biology and Biotechnology, 8(1). https://doi.org/10.1186/s40694-021-00125-4

EMBRAPA (2023). Bioeconomia e sustentabilidade na agricultura brasileira. Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. Disponible en: https://www.embrapa.br

European Bioplastics. (2024). Market. https://www.european-bioplastics.org/market/

Fernández-Cortés, Y., Sotto-Rodríguez, K. D., & Vargas-Marín, L. A. (2020). Impactos ambientales de la producción del café, y el aprovechamiento sustentable de los residuos generados. Producción + Limpia, 15(1), 93–110. http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1909-04552020000100093

Frącz, W., Janowski, G., & Bąk, Ł. (2023). The possibilities of using poly(3-hydroxybutyrate-CO-3-hydroxyvalerate) PHBV in the production of Wood–Polymer composites. Journal of Composites Science, 7(12), 509. https://doi.org/10.3390/jcs7120509

G/Mariam, A. (2014). Characteristics of wet coffee processing waste and its environmental impact in Ethiopia. ResearchGate. https://www.researchgate.net/publication/262311991_Characteristics_of_Wet_Coffee_Processing_Waste_and_Its_Environmental_Impact_in_Ethiopia

Getino, L., Martín, J. L., & Chamizo-Ampudia, A. (2024). A Review of Polyhydroxyalkanoates: Characterization, Production, and Application from Waste. Microorganisms, 12(10), 2028. https://doi.org/10.3390/microorganisms12102028

Gondim, F. F., Rodrigues, J. G. P., Aguiar, V. O., De Fátima Vieira Marques, M., & Monteiro, S. N. (2024). Biocomposites of Cellulose Isolated from Coffee Processing By-Products and Incorporation in Poly(Butylene Adipate-Co-Terephthalate) (PBAT) Matrix: An Overview. Polymers, 16(3), 314. https://doi.org/10.3390/polym16030314

Gracia, J., Montenegro, C., Moreno, N., & Cabeza, I. (2023). Production of Polyhydroxyalkanoates using Volatile Fatty Acids from Municipal Wastewater Treatment Plant Sludge. www.cetjournal.it. https://doi.org/10.3303/CET23100094

Guardia-Puebla, Y., Llanes-Cedeño, E., Domínguez-León, A. V., Arias-Cedeño, Q., Sánchez-Girón, V., Morscheck, G., & Eichler-Löbermann, B. (2021). Dynamic modelling of an anaerobic reactor treating coffee wet wastewater via multiple regression model. Journal of Water and Land Development, 229–239. https://doi.org/10.24425/jwld.2021.138178

Haider, T. P., Völker, C., Kramm, J., Landfester, K., & Wurm, F. R. (2018). Plastics of the Future? The impact of biodegradable polymers on the environment and on society.

Angewandte Chemie International Edition, 58(1), 50–62. https://doi.org/10.1002/anie.201805766

Hasan, H. A., Shanmugam, D. S. A., Abdullah, S. R. S., Muhamad, M. H., & Kurniawan, S. B. (2022). Potential of using Dual-Media biofilm reactors as a real coffee industrial effluent Pre-Treatment. Water, 14(13), 2025. https://doi.org/10.3390/w14132025

Hernández Sampieri, R., Fernández Collado, C., & Baptista Lucio, M. del P. (2014). Metodología de la investigación (6ª ed.). México: McGraw-Hill Education.

Hernández, L. H. (2020). Biopolímeros funcionales a partir de residuos sólidos agroindustriales. [Podcast]. Repositorio Institucional UNAD. https://repository.unad.edu.co/handle/10596/40731

Huang, J., Li, B., Xian, X., Hu, Y., & Lin, X. (2024). Efficient Bioethanol Production from Spent Coffee Grounds Using Liquid Hot Water Pretreatment without Detoxification. Fermentation, 10(8), 436. https://doi.org/10.3390/fermentation10080436

Ijanu, E. M., Kamaruddin, M. A., & Norashiddin, F. A. (2019). Coffee processing wastewater treatment: a critical review on current treatment technologies with a proposed alternative. Applied Water Science, 10(1). https://doi.org/10.1007/s13201-019-1091-9

Jang, J. H., Yeo, H. J., Kim, J., Kim, S. R., & Jung, Y. H. (2018). Glucose Production from Spent Coffee Grounds by Acid Pretreatment and Enzymatic Hydrolysis. KSBB Journal, 33(4), 247–252. https://doi.org/10.7841/ksbbj.2018.33.4.247

Janowski, G., Frącz, W., Bąk, Ł., Sikora, J. W., Tomczyk, A., Mrówka-Nowotnik, G., & Mossety-Leszczak, B. (2025). Effect of Coffee Grounds Content on Properties of PHBV Biocomposites Compared to Similar Composites with Other Fillers. Polymers, 17(6), 764. https://doi.org/10.3390/polym17060764

Johnson, E. (2016). Integrated enzyme production lowers the cost of cellulosic ethanol. Biofuels Bioproducts and Biorefining, 10(2), 164–174. https://doi.org/10.1002/bbb.1634

Kc, Y., Subba, R., Shiwakoti, L. D., Dhungana, P. K., Bajagain, R., Chaudhary, D. K., Pant, B. R., Bajgai, T. R., Lamichhane, J., Timilsina, S., Upadhyaya, J., & Dahal, R. H. (2021). Utilizing coffee pulp and mucilage for producing Alcohol-Based beverage. Fermentation, 7(2), 53. https://doi.org/10.3390/fermentation7020053

Khouri, N. G., Bahú, J. O., Blanco-Llamero, C., Severino, P., Concha, V. O., & Souto, E. B. (2024). Polylactic acid (PLA): Properties, synthesis, and biomedical applications – A review of the literature. Journal of Molecular Structure, 1309, 138243. https://doi.org/10.1016/j.molstruc.2024.138243

Koller, M., & Mukherjee, A. (2022). A new wave of industrialization of PHA biopolyesters. Bioengineering, 9(2), 74. https://doi.org/10.3390/bioengineering9020074

Liu, Z., Li, Z., Jiang, J., Meng, J., & Qin, H. (2025). Biodegradable and multifunctional PBAT/Lignin mulch films for green agriculture. ACS Applied Polymer Materials. https://doi.org/10.1021/acsapm.5c01964

Łopusiewicz, Ł., Jędra, F., & Mizielińska, M. (2018). New Poly(lactic acid) Active Packaging Composite Films Incorporated with Fungal Melanin. Polymers, 10(4), 386. https://doi.org/10.3390/polym10040386

Malarat, S., Khongpun, D., Limtong, K., Sinthuwong, N., Soontornapaluk, P., Sakdaronnarong, C., & Posoknistakul, P. (2023). Preparation of Nanocellulose from Coffee Pulp and Its Potential as a Polymer Reinforcement. ACS Omega, 8(28), 25122–25133. https://doi.org/10.1021/acsomega.3c02016

Mamani Gutiérrez, D. (2022). Investigación científica: Enfoques y metodología (2.ª ed.). Editorial INUDI. https://editorial.inudi.edu.pe/index.php/editorialinudi/catalog/download/90/133/157?inline=1

Masssijaya, S. Y., Lubis, M. a. R., Nissa, R. C., Nurhamiyah, Y., Nugroho, P., Antov, P., Lee, S., Papadopoulos, A. N., Kusumah, S. S., & Karlinasari, L. (2023). Utilization of Spent Coffee Grounds as a Sustainable Resource for The Synthesis of Bioplastic Composites with Polylactic Acid, Starch, and Sucrose. Journal of Composites Science, 7(12), 512. https://doi.org/10.3390/jcs7120512

Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial. (2010). Decreto 3930 de 2010. Departamento Administrativo de la Función Pública. https://www.funcionpublica.gov.co/eva/gestornormativo/norma.php

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

Nagarajan, S., Jones, R. J., Oram, L., Massanet-Nicolau, J., & Guwy, A. (2022). Intensification of acidogenic fermentation for the production of biohydrogen and volatile fatty Acids—A perspective. Fermentation, 8(7), 325. https://doi.org/10.3390/fermentation8070325

Nduko, J. M., & Taguchi, S. (2021). Microbial production of biodegradable Lactate-Based polymers and oligomeric building blocks from renewable and waste resources. Frontiers in Bioengineering and Biotechnology, 8. https://doi.org/10.3389/fbioe.2020.618077

Neu, A., Pleissner, D., Mehlmann, K., Schneider, R., Puerta-Quintero, G. I., & Venus, J. (2016). Fermentative utilization of coffee mucilage using Bacillus coagulans and investigation of down-stream processing of fermentation broth for optically pure l(+)-lactic acid production. Bioresource Technology, 211, 398–405. https://doi.org/10.1016/j.biortech.2016.03.122

Nnolim, N. E., & Nwodo, U. U. (2025). Insight into Global Bio-Based Plastics Development: A Bibliometric Analysis-Aided Assessment of the Past Decades' Research Exploit. Sustainability, 17(13), 5955. https://doi.org/10.3390/su17135955

Oliveros-Tascón, C. E., Sanz-Uribe, J. R., Ramírez, C. A., & Tibaduiza-Vianchá, C. A. (2013). ECOMILL ® Tecnología de bajo impacto ambiental para el lavado del café. Avances Técnicos Cenicafé, 432, 1–8. https://doi.org/10.38141/10779/0432

Paramatti, M., Romani, A., Pugliese, G., & Levi, M. (2024). PLA Feedstock Filled with Spent Coffee Grounds for New Product Applications with Large-Format Material Extrusion Additive Manufacturing. ACS Omega, 9(6), 6423–6431. https://doi.org/10.1021/acsomega.3c05669

Parida, M., Jena, T., Mohanty, S., & Nayak, S. K. (2024). Advancing sustainable agriculture: Evaluation of Poly (lactic acid) (PLA) based mulch films and identification of biodegrading microorganisms among soil microbiota. International Journal of Biological Macromolecules, 269, 132085. https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2024.132085

Pérez, V. O., Pérez, L. G. M., Fernandez-Alduenda, M. R., Barreto, C. I. A., Agudelo, C. P. G., & Restrepo, E. C. M. (2023). Chemical composition and sensory quality of coffee fruits at different stages of maturity. Agronomy, 13(2), 341. https://doi.org/10.3390/agronomy13020341

Pineda, V. M. S. (2022). *Calidad del agua residual producida en las diferentes etapas del proceso de beneficiado de café húmedo. Agua Saneamiento & Ambiente*, 16(2), 19–26. https://doi.org/10.36829/08asa.v16i2.1324

Pyrzynska, K. (2024). Useful Extracts from Coffee By-Products: A Brief Review. Separations, 11(12), 334. https://doi.org/10.3390/separations11120334

Ranakoti, L., Gangil, B., Mishra, S. K., Singh, T., Sharma, S., Ilyas, R., & El-Khatib, S. (2022). Critical review on Polylactic acid: Properties, structure, processing, biocomposites, and nanocomposites. Materials, 15(12), 4312. https://doi.org/10.3390/ma15124312

RENGIFO ALAVA, Y. J., Macias Moreira , J. C. ., Mendoza Velez , S. I. ., & Pincay Figueroa , D. M. . (2021). Evaluación de dos métodos de extracción de pectina de la cáscara de cacao (Theobroma Cacao). Revista Científica Sinapsis, 2(20). https://doi.org/10.37117/s.v2i20.550

Reyhanitash, E., Kersten, S. R. A., & Schuur, B. (2017). Recovery of Volatile Fatty Acids from Fermented Wastewater by Adsorption. ACS Sustainable Chemistry & Engineering, 5(10), 9176–9184. https://doi.org/10.1021/acssuschemeng.7b02095

Rivera-Briso, A. L., & Serrano-Aroca, Á. (2018). Poly(3-Hydroxybutyrate-CO-3-Hydroxyvalerate): Enhancement strategies for advanced applications. Polymers, 10(7), 732. https://doi.org/10.3390/polym10070732

Rodríguez Valencia, N., Sanz Uribe, J. R., Oliveros Tascón, C. E., & Ramírez Gómez, C. A. (2015). Beneficio del café en Colombia: Prácticas y estrategias para el ahorro, uso eficiente del agua y el control de la contaminación hídrica en el proceso de beneficio húmedo del café. Cenicafé. https://www.cenicafe.org/es/publications/Beneficio-del-cafe-en-Colombia.pdf

Saini, J. K., Himanshu, Hemansi, Kaur, A., & Mathur, A. (2022). Strategies to enhance enzymatic hydrolysis of lignocellulosic biomass for biorefinery applications: A review. Bioresource Technology, 360, 127517. https://doi.org/10.1016/j.biortech.2022.127517

Sampieri, G. D. G., Villa, I. G., & Salcedo-Garduño, M. G. (2022). CARACTERIZACIÓN FISICOQUÍMICA DE RESIDUOS AGROINDUSTRIALES DE CAFÉ y CAÑA DE AZÚCAR y SU POTENCIAL COMO. . . ResearchGate. https://www.researchgate.net/publication/382393581_CARACTERIZACION_FISICOQUIMICA_DE_RESIDUOS_AGROINDUSTRIALES_DE_CAFE_Y_CANA_DE_AZUCAR_Y_SU_POTENCIAL_COMO_PLASTICOS_BIOBASADOS

Sanchez-Ledesma, L. M., Ramírez-Malule, H., & Rodríguez-Victoria, J. A. (2023). Volatile fatty acids production by acidogenic fermentation of wastewater: a bibliometric analysis. Sustainability, 15(3), 2370. https://doi.org/10.3390/su15032370

Sangta, J., Ruksiriwanich, W., Chittasupho, C., Sringarm, K., Rachtanapun, P., Bakshani, C., Willats, W., & Sommano, S. (2023). Utilization of the sugar fraction from Arabica coffee pulp as a carbon source for bacteria producing cellulose and cytotoxicity with human keratinocyte. Preparative Biochemistry & Biotechnology, 54(5), 587–596. https://doi.org/10.1080/10826068.2023.2258195

Silva Vargas, M. C., & Soler Londoño, J. F. (2024). Producción de ácido láctico a partir de la fermentación de biomasa celulósica del afrecho de malta mediante bacterias lácticas [Trabajo de grado, Fundación Universidad de América]. Repositorio Institucional Lumieres. https://hdl.handle.net/20.500.11839/9422

Sosa-Martínez, J. D., Morales-Oyervides, L., Montañez, J., Contreras-Esquivel, J. C., Balagurusamy, N., Gadi, S. K., & Salmerón, I. (2024). Sustainable Co-Production of Xylanase, Cellulase, and Pectinase through Agroindustrial Residue Valorization Using Solid-State Fermentation: A Techno-Economic Assessment. Sustainability, 16(4), 1564. https://doi.org/10.3390/su16041564

Tamang, P., Arndt, C., Bruns-Hellberg, J., & Nogueira, R. (2020). Polyhydroxyalkanoates production from industrial wastewaters using a mixed culture enriched with Thauera sp.: Inhibitory effect of the wastewater matrix. Environmental Technology & Innovation, 21, 101328. https://doi.org/10.1016/j.eti.2020.101328

Teoh, T., Ong, S., Ho, L., Wong, Y., Lutpi, N. A., Oon, Y., Tan, S., Ong, Y., & Yap, K. (2022). Caffeine-containing wastewater treatment and bioelectricity generation in up-flow constructed wetland-microbial fuel cell: Influence of caffeine concentration, operating conditions, toxicity assessment, and degradation pathway. Journal of Water Process Engineering, 46, 102623. https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2022.102623

Torres, J. A., Chagas, P. M. B., Silva, M. C., Santos, C. D. D., & Corrêa, A. D. (2015). Enzymatic oxidation of phenolic compounds in coffee processing wastewater. Water Science & Technology, 73(1), 39–50. https://doi.org/10.2166/wst.2015.332

Torres-Valenzuela, L. S., Sanín-Villarrea, A., Arango-Ramírez, A., & Serna-Jiménez, J. A. (2019). Caracterización fisicoquímica y microbiológica de aguas mieles del beneficio del café. Revista ION, 32(2), 59–66. https://doi.org/10.18273/revion.v32n2-2019006

Tsang, Y. F., Kumar, V., Samadar, P., Yang, Y., Lee, J., Ok, Y. S., Song, H., Kim, K., Kwon, E. E., & Jeon, Y. J. (2019). Production of bioplastic through food waste valorization.

Environment International, 127, 625–644. https://doi.org/10.1016/j.envint.2019.03.076

Ulsido, M. D., Geleto, M., & Berego, Y. S. (2024). Waste Water Management in Wet Coffee Processing Mills and their Impact on the Water quality status of Gidabo River and its Tributaries, Southern Ethiopia. *Environmental Health Insights*, 18. https://doi.org/10.1177/11786302241260953

United Nations Environment Programme. (2023). Todo lo que necesitas saber sobre la contaminación por plásticos. UNEP. https://www.unep.org/es/noticias-y-reportajes/reportajes/todo-lo-que-necesitas-saber-sobre-la-contaminacion-por-plasticos

Van Eck, N. J., & Waltman, L. (2009). Software survey: VOSviewer, a computer program for bibliometric mapping. Scientometrics, 84(2), 523–538. https://doi.org/10.1007/s11192-009-0146-3

Vázquez-Fernández, A., Suárez-Ojeda, M. E., & Carrera, J. (2022). Review about bioproduction of Volatile Fatty Acids from wastes and wastewaters: Influence of operating conditions and organic composition of the substrate. Journal of Environmental Chemical Engineering, 10(3), 107917. https://doi.org/10.1016/j.jece.2022.107917

Velghe, I., Buffel, B., Vandeginste, V., Thielemans, W., & Desplentere, F. (2023). Review on the Degradation of Poly(lactic acid) during Melt Processing. Polymers, 15(9), 2047. https://doi.org/10.3390/polym15092047

Yang, N., Ying, L., Li, K., Chen, F., Zhao, F., Sun, Z., Feng, L., & Liu, J. (2022). Biodegradable mulching films based on polycaprolactone and its porous structure construction. Polymers, 14(24), 5340. https://doi.org/10.3390/polym14245340

Yu, W., Yuan, T., Yao, Y., Deng, Y., & Wang, X. (2023). PLA/Coffee grounds composite for 3D printing and its properties. Forests, 14(2), 367. https://doi.org/10.3390/f14020367

Zhang, B., & Bao, J. (2024). New Perspectives on Lactic Acid Production from Renewable Agro-Industrial Wastes. Fermentation, 10(10), 534. https://doi.org/10.3390/fermentation10100534

Zhang, Q., Wu, Y., Luo, J., Cao, J., Kang, C., Wang, S., Li, K., Zhao, J., Aleem, M., & Wang, D. (2020). Enhanced volatile fatty acids production from waste activated sludge with synchronous phosphorus fixation and pathogens inactivation by calcium hypochlorite stimulation. The Science of the Total Environment, 712, 136500. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.136500

Zhou, W., Bergsma, S., Colpa, D. I., Euverink, G. W., & Krooneman, J. (2023). Polyhydroxyalkanoates (PHAs) synthesis and degradation by microbes and applications towards a circular economy. Journal of Environmental Management, 341, 118033. https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2023.118033

Zhu, Y., Ai, M., & Jia, X. (2022). Optimization of a Two-Species microbial consortium for improved MCL-PHA production from Glucose–Xylose mixtures. Frontiers in Bioengineering and Biotechnology, 9. https://doi.org/10.3389/fbioe.2021.794331

Lamelas, M., Marinoni, O., De La Riva, J., & Hoppe, A. (2012). Comparison of multicriteria analysis techniques for environmental decision making on industrial location. In InTech eBooks. https://doi.org/10.5772/51222

Sitorus, F., & Brito-Parada, P. R. (2020). A multiple criteria decision making method to weight the sustainability criteria of renewable energy technologies under uncertainty. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 127, 109891. https://doi.org/10.1016/j.rser.2020.109891

Makwakwa, T. A., Moema, D. E., & Msagati, T. a. M. (2024). Multi-criteria decision analysis: technique for order of preference by similarity to ideal solution for selecting greener analytical method in the determination of mifepristone in environmental water samples. Environmental Science and Pollution Research, 31(20), 29460–29471. https://doi.org/10.1007/s11356-024-32961-3

Aguilera, Y., Consuegra, R., & Rapado, M. (1998, June 1). Treatment of coffee wastewater by gamma radiation. INIS – International Nuclear Information System. https://inis.iaea.org/records/z5q17-p5a57

Capítulo 4 sampieri. (2012, August 19). [Slide show]. SlideShare. https://es.slideshare.net/slideshow/captulo-4-sampieri/14015060

Manger, C. (2021, October 8). New EU standard for biodegradable mulch films in agriculture published. European Bioplastics e.V. https://www.european-bioplastics.org/new-eu-standard-for-biodegradable-mulch-films-in-agriculture-published/

Gricel, S. G. M., & Itzel, G. V. (2022, March 15). EVALUACIÓN DE LA CALIDAD FISICOQUÍMICA DE RESIDUOS AGROINDUSTRIALES PARA LA GENERACIÓN DE COMPUESTOS BIOPOLÍME«O3. https://rinacional.tecnm.mx/handle/TecNM/8754

Global Plastics Outlook. (2022, Junio 21). OECD. https://www.oecd.org/en/publications/global-plastics-outlook_aa1edf33-en.html

Santana, V. a. F. (2023, March 10). Los Bioplásticos y la Economía Circular. https://es.linkedin.com/pulse/los-biopl%C3%A1sticos-y-la-econom%C3%ADa-circular-victor-antonio-flores-santana

Almatia, G. (2024, September 25). Resinas biodegradables y compostables - Grupo Almatia. Grupo Almatia. https://grupoalmatia.com/blog/resinas-biodegradables/

Cavanagh, Q. (2024, December 14). Enzymatic hydrolysis of cellulose and proteins in spent coffee grounds. https://dalspace.library.dal.ca/items/8a3d8b38-fba6-4850-9b9b-939578c3a04e

Cotes, A. (2025, January 27). Colombia cierra 2024 con cifras históricas en producción y exportación de café - Solidaridad Latam. Solidaridad Latam.

https://solidaridadlatam.org/history/colombia-cierra-2024-con-cifras-historicas-en-produccion-y-exportacion-de-cafe/

Coherent Market Insights. (2025, February 18). Bioplastics MarketChallenges and Opportunities. Coherent Market Insights. https://www.coherentmarketinsights.com/market-insight/bioplastics-market-4098/market-challenges-and-opportunities

Raval, B. (2025, October 18). ASTM D5338 Determining Aerobic Biodegradation. Infinita Lab. https://infinitalab.com/astm/determining-aerobic-biodegradation-astm-d5338/

Intelligence, M. (2026, February 25). Industrial Enzymes Market Report 2031 Statistics. Mordor Intelligence. https://www.mordorintelligence.com/industry-reports/industrial-enzymes-market

Cronon, K. L. (2020a, July 14). Aguas Mieles: de Contaminante a Fertilizante Orgánico. Perfect Daily Grind Español. https://perfectdailygrind.com/es/2020/02/04/aguas-mieles-de-contaminante-a-fertilizante-organico/

7. ANEXOS

7.1. Anexo 1

AÑO	AUTOR (ES)	TÍTULO	APORTES AL TEMA	CONTEXTO DEL DOC	REFERENCIA BIBLIOGRÁFICA
2015	Xue, Yonggang; Liu, Huajie; Chen, Sisi; Dichtl, Norbert; Dai, Xiaohu; Li, Ning	Effects of thermal hydrolysis on organic matter solubilization and anaerobic digestion of high solid sludge	Metodología / Resultados.	El artículo aporta información clave sobre el aprovechamiento energético de los lodos residuales y los efectos de tratamientos térmicos previos, lo que resulta relevante para procesos de valorización de residuos orgánicos como los generados en la industria cafetera. El enfoque en la conversión de compuestos orgánicos puede extrapolarse a la recuperación de biomoléculas para bioproductos o bioplásticos.	DOI10.1016/j.cej.2014.11.005

2015	Xue, XY; Chen, DX; (...); Dai, XH	Hydrothermal and Pyrolysis Treatment for Sewage Sludge: Choice from Product and from Energy Benefit		El artículo compara pirolisis e hidrotratamiento de lodos residuales, mostrando que el tratamiento hidrotermal es más eficiente energéticamente y genera productos sólidos estabilizados con menor carga orgánica. Esto se relaciona con tu proyecto porque demuestra tecnologías termoquímicas viables para valorizar residuos húmedos, como las aguas residuales del café, en productos útiles o intermedios para biopolímeros.	DOI10.1016/j.egypro.2015.02.064
2016	Zhang, JY; Lv, C; (...); Wei, YS	Optimization and microbial community analysis of anaerobic co-digestion of food waste and sewage sludge based on microwave pretreatment	Metodología / Resultados.	Aporta a la metodología y resultados, ya que analiza el efecto del pretratamiento por microondas sobre la digestión anaerobia y la producción de metano, vinculando también la respuesta microbiana. Esto es útil para comparar estrategias térmicas o energéticas aplicables al	DOI10.1016/j.biortech.2015.10.037

				aprovechamiento de lodos agroindustriales (como los del café).	
2017	Wu, BR; Ni, BJ; (...); Mahajan, D	Occurrence State and Molecular Structure Analysis of Extracellular Proteins with Implications on the Dewaterability of Waste-Activated Sludge	Resultados	Explica cómo las proteínas extracelulares afectan la deshidratación del lodo activado y cómo los procesos de oxidación avanzada modifican su estructura para mejorar la liberación de agua.	DOI10.1021/acs.est.7b02861
2017	Ye, YY; Ngo, HH; (...); Jia, H	Insight into chemical phosphate recovery from municipal wastewater	Contexto	Aporta al contexto del estudio, ya que aborda la recuperación química de fosfato en aguas residuales municipales, destacando su importancia para la sostenibilidad y la gestión de nutrientes.	DOI10.1016/j.scitotenv.2016.10.078
2018	Li, X. W.; Chen, L. B.; Mei, Q. Q.; Dong, B.; Dai, X. H.; Ding, G. J.; Zeng, E. Y.	Microplastics in sewage sludge from the wastewater treatment plants in China	Metodologia - Resultados	Confirma que los lodos residuales son una fuente significativa de contaminación por microplásticos; aporta datos empíricos clave para evaluar el riesgo ambiental y orientar estrategias de	DOI10.1016/j.watres.2018.05.034

				manejo y tratamiento en el sector agroindustrial y sanitario.	
2018	Wang, T; Zhang, D; (...); Dai, XH	Magnetite Triggering Enhanced Direct Interspecies Electron Transfer: A Scavenger for the Blockage of Electron Transfer in Anaerobic Digestion of High-Solids Sewage Sludge	Resultados	Demuestra cómo la adición de magnetita puede mejorar la eficiencia del proceso anaerobio al facilitar la transferencia directa de electrones (DIET), aumentando la producción de metano y superando bloqueos en la digestión de lodos.	DOI10.1021/acs.est.8b00891
2018	Zhao, ZS; Li, Y; (...); Zhang, YB	Ferroferric oxide triggered possible direct interspecies electron transfer between Syntrophomonas and Methanosaeta to enhance waste activated sludge anaerobic digestion	Resultados	Evidencia que la adición de Fe_3O_4 favorece la transferencia directa de electrones entre microorganismos clave, mejorando la producción de metano y la degradación del lodo sin depender del hidrógeno.	DOI10.1016/j.biortech.2017.11.003

2018	Wang, DB; Duan, YY; (...); Yuan, ZG	Free ammonia enhances dark fermentative hydrogen production from waste activated sludge	Metodología / Resultados.	Contribuye a la metodología y resultados, ya que demuestra cómo la presencia controlada de amoníaco libre puede optimizar la fermentación oscura y la liberación de compuestos orgánicos en lodos activados, lo cual puede extrapolarse a la valorización energética de residuos agroindustriales	DOI10.1016/j.watres.2018.01.051
2018	Wang, T; Zhang, D; (...); Dai, XH	Magnetite Triggering Enhanced Direct Interspecies Electron Transfer: A Scavenger for the Blockage of Electron Transfer in Anaerobic Digestion of High-Solids Sewage Sludge	Resultados	Demuestra cómo la adición de magnetita puede mejorar la eficiencia del proceso anaerobio al facilitar la transferencia directa de electrones (DIET), aumentando la producción de metano y superando bloqueos en la digestión de lodos.	DOI10.1021/acs.est.8b00891
2019	Sun, J.; Dai, X. H.; Wang, Q. L.; van Loosdrecht, M. C. M.; Ni, B. J.	Microplastics in wastewater treatment plants: Detection, occurrence and removal	Contexto del estudio - Resultados	Referencia fundamental en el estudio de microplásticos en WWTPs, proporcionando una base científica sólida para comprender su comportamiento y orientar	DOI10.1016/j.watres.2018.12.050

				estrategias de reducción y tratamiento en procesos agroindustriales y ambientales.	
2019	Wang, XD; Li, CX; (...); Wang, Y	Effect of pyrolysis temperature on characteristics, chemical speciation and risk evaluation of heavy metals in biochar derived from textile dyeing sludge	Metodología / Resultados.	Contribuye a la metodología y resultados, al evaluar experimentalmente cómo la temperatura de pirólisis influye en la inmovilización y riesgo ambiental de metales pesados en biocarbones obtenidos de lodos industriales, lo cual es comparable al manejo térmico de lodos residuales en la industria caficultora.	DOI10.1016/j.ecoenv.2018.10.022
2019	Li, XW; Mei, QQ; Chen, LB; Zhang, HY; Dong, B; Dai, XH; He, CQ; Zhou, J	Enhancement in adsorption potential of microplastics in sewage sludge for metal pollutants after the wastewater treatment process	Contexto y resultados relacionados con la contaminación y aprovechamiento de aguas residuales.	El estudio demuestra cómo los microplásticos presentes en lodos de aguas residuales pueden adsorber metales pesados (Cd, Pb, Co), incrementando su capacidad de retención tras el tratamiento. Esto evidencia procesos fisicoquímicos de	DOI10.1016/j.watres.2019.03.069

				interacción entre materiales orgánicos e inorgánicos, relevantes para comprender la dinámica de contaminantes en matrices residuales.	
2020	Wu, Boran; Dai, Xiaohu; Chai, Xiaoli	Critical review on dewatering of sewage sludge: Influential mechanism, conditioning technologies and implications to sludge re-utilizations	Metodología - Contexto.	Aporta bases conceptuales y técnicas sobre la gestión de lodos, útiles para comprender cómo optimizar la eliminación de agua y minimizar impactos ambientales. Su enfoque en la reutilización del lodo permite conectar el tratamiento de residuos con la sostenibilidad industrial y ambiental.	DOI10.1016/j.watres.2020.115912
2020	Xu, Y; Lu, YQ ; Zheng, LK ; Wang, ZW ; Dai, XH	Perspective on enhancing the anaerobic digestion of waste activated sludge	Contexto del estudio	Ofrece una visión general sobre los factores estructurales y microbiológicos que limitan la eficiencia de la digestión anaerobia, proponiendo líneas de investigación enfocadas en mejorar la biodegradabilidad del lodo.	DOI10.1016/j.jhazmat.2019.121847

2021	Xu, Y; Gong, H and Dai, XH	High-solid anaerobic digestion of sewage sludge: achievements and perspectives	Metodología y contexto del tratamiento biológico de aguas residuales.	El artículo revisa los avances en la digestión anaerobia de alta concentración de sólidos (HS-AD) aplicada a lodos de aguas residuales. Describe factores que afectan su estabilidad, métodos de pretratamiento y co-digestión con otros residuos orgánicos, además de identificar brechas en el conocimiento actual.	DOI10.1007/s11783-020-1364-4
2022	Li, XW; Wang, X; (...); Hur, J	Changes in physicochemical and leachate characteristics of microplastics during hydrothermal treatment of sewage sludge	Resultados.	El estudio demuestra cómo el tratamiento hidrotermal del lodo influye en la degradación y transformación de microplásticos (MPs), destacando el papel de los componentes orgánicos del lodo (proteínas y carbohidratos) en la descomposición de polímeros.	DOI10.1016/j.watres.2022.118876

2022	Zhang, L; Sun, J; (...); Ni, BJ	Polyethylene terephthalate microplastic fibers increase the release of extracellular antibiotic resistance genes during sewage sludge anaerobic digestion	Resultados y discusión.	El artículo analiza cómo las fibras microplásticas de tereftalato de polietileno (PET) influyen en la liberación de genes de resistencia a antibióticos (ARGs) durante la digestión anaerobia del lodo residual. Los resultados muestran que la presencia de microplásticos incrementa la liberación de ARGs extracelulares (eARGs), lo cual implica riesgos ambientales y sanitarios asociados al manejo de lodos y residuos orgánicos tratados.	DOI10.1016/j.watres.2022.118426
2022	ang, YF; Xie, H; (...); Dai, XH	Alkaline thermal hydrolysis of sewage sludge to produce high-quality liquid fertilizer rich in nitrogen-containing plant-growth-promoting nutrients and biostimulants	Resultados y metodología.	El artículo presenta una alternativa tecnológica sostenible para la valorización del lodo residual mediante hidrólisis térmica alcalina (ATH) con hidróxido de calcio ($Ca(OH)_2$), orientada a la recuperación de nutrientes nitrogenados y compuestos bioestimulantes (como	DOI10.1016/j.watres.2021.118036

				aminoácidos, proteínas solubles y fitohormonas).	
2022	Yang, W; Cai, C and Dai, XH	Interactions between virus surrogates and sewage sludge vary by viral analyte: Recovery, persistence, and sorption	Componente ambiental y riesgos sanitarios.	Este artículo analiza cómo los virus (o sus análogos) interactúan con los lodos residuales, evaluando su recuperación, persistencia y adsorción. Aunque el estudio se centra en virus, su importancia para tu proyecto radica en que demuestra cómo los compuestos orgánicos e inorgánicos —y en general, los microorganismos— se comportan y se fijan al lodo durante el tratamiento de aguas residuales.	DOI10.1016/j.watres.2021.117995
2022	Tang, YF; Sun, J; (...); Dai, XH	Thermal Hydrolysis Pretreatment-Anaerobic Digestion Promotes Plant-Growth Biostimulants Production from Sewage Sludge by	Metodología y resultados.	Este estudio demuestra cómo el pretratamiento térmico combinado con digestión anaerobia (THP-AD) no solo mejora la degradación de materia orgánica del lodo, sino que también favorece la	DOI10.1021/acs.est.1c06506

		Upregulating Aromatic Amino Acids Transformation and Quinones Supply		transformación de aminoácidos aromáticos y la producción de compuestos bioactivos tipo biostimulantes vegetales.	
2022	Chen, RJ; Yuan, SJ; (...); Dong, B	Life-cycle assessment of two sewage sludge-to-energy systems based on different sewage sludge characteristics: Energy balance and greenhouse gas-emission footprint analysis	Metodología y resultados.	El artículo realiza una evaluación de ciclo de vida (LCA) comparando dos sistemas de conversión energética del lodo residual: digestión anaerobia + incineración (AI) versus incineración directa (DI). Analiza eficiencia energética y huella de gases de efecto invernadero (GEI), mostrando cómo la composición orgánica (VS/TS) del residuo influye directamente en el rendimiento del proceso.	DOI10.1016/j.jes.2021.04.012
2022	Dai, XH; Xu, GZ; (...); Zhang, H	Online Storage Technology of the Separate Sewage System: Demonstration Study in a Typical Plain River Network City	Metodología (manejo y control de aguas residuales).	El estudio presenta una tecnología de almacenamiento y control en tiempo real (RTC) para sistemas de alcantarillado separados, optimizando el manejo de aguas residuales y pluviales.	DOI10.3390/w14203194

2022	Chen, RJ; Dai, XH and Dong, B	Decrease the effective temperature of hydrothermal treatment for sewage sludge deep dewatering: Mechanistic of tannic acid aided	Tratamientos termoquímicos aplicados a residuos orgánicos para mejorar su aprovechamiento y reducir contaminantes.	El artículo explora cómo el tratamiento hidrotermal (HT), asistido por ácido tánico, puede mejorar la deshidratación del lodo residual y reducir la formación de compuestos refractarios y nitrógeno disuelto, problemas típicos en la gestión de aguas residuales. Además, explica los mecanismos fisicoquímicos de interacción proteína-polifenol, lo cual es clave para comprender los cambios estructurales en residuos orgánicos sometidos a calor.	DOI10.1016/j.watres.2022.118450
2023	Liu, R; Xu, Y; (...); Dai, XH	The effect of repeated energy inputs on the release profiles of extracellular organic substances in sewage sludge	Fundamento metodológico y teórico.	Este artículo aporta conocimiento sobre la liberación de sustancias orgánicas extracelulares (EOS) desde los lodos, explicando cómo su fuerza de unión (BS) y las propiedades reológicas influyen en la recuperación de materia orgánica. Este tipo de análisis es directamente	DOI10.1016/j.watres.2023.119776

				útil para tu proyecto, ya que las aguas residuales del café también contienen materia orgánica compleja (polisacáridos, proteínas, ácidos húmicos, etc.) con diferentes grados de unión y estabilidad.	
2023	Zeng, ST; Sun, J; (...); Ni, BJ	Impacts of norfloxacin on sewage sludge anaerobic digestion: Bioenergy generation and potential environmental risks	Resultados y contexto.	El artículo evalúa cómo la presencia del antibiótico norfloxacina en lodos residuales afecta la digestión anaerobia y la generación de bioenergía, sin alterar significativamente la producción de metano, pero generando riesgos ambientales por metabolitos tóxicos.	DOI10.1016/j.rineng.2023.101392
2023	Yang, W; Cai, C; (...); Dai, XH	Insights into the impact of quaternary ammonium disinfectant on sewage sludge anaerobic digestion: Dose-response, performance variation, and	Metodología y resultados.	El artículo examina cómo los compuestos de amonio cuaternario (QACs) —usados como desinfectantes— afectan la digestión anaerobia de lodos en términos de producción de metano, cambios microbianos y toxicidad según	DOI10.1016/j.jhazmat.2022.130341

		potential mechanisms		concentración y estructura química.	
2023	Chen, RJ ; Yuan, SJ; Wang, XK; Dai, XH; Guo, YL ; Li, C; Wu, HB; Dong, B	Mechanistic insight into the effect of hydrothermal treatment of sewage sludge on subsequent pyrolysis: Evolution of volatile and their interaction with pyrolysis kinetic and products compositions	Metodología y resultados.	El artículo analiza cómo el tratamiento hidrotérmico (HT) previo afecta la pirolisis de lodos residuales, estudiando las reacciones químicas, energéticas y los productos obtenidos (bio-aceite, gases, etc.).	DOI10.1016/j.energy.2022.126330
2023	Wu, BR; Yang, DH; (...); Dai, XH	A quantitative theory integrating solid surface hydrophilicity and pore structure features for non-phase-change drying of sewage sludge through gradient increase of ultrahigh filtration pressure	Innovación tecnológica en el tratamiento y deshidratación de aguas residuales.	El artículo propone un método no térmico para el secado de lodos de aguas residuales mediante ultrapresión de filtración, reduciendo el contenido de agua hasta un 28% sin recurrir al cambio de fase (evaporación). Esto disminuye el consumo energético y permite una mayor eficiencia en la separación sólido-líquido.	DOI10.1016/j.watres.2023.120765

2024	Li, C. X.; Wang, R. M.; Yuan, Z. W.; Xie, S. Y.; Wang, Y.; Zhang, Y. F.	New strategy for the efficient recovery of energy and the control of contaminants from the treatment of sewage sludge and food waste		Estudio innovador que integra recuperación energética y control de contaminantes en un solo sistema, ofreciendo un modelo viable de economía circular aplicable a procesos agroindustriales sostenibles.	DOI10.1016/j.watres.2024.122050
2024	Li, X. W.; Liu, L. L.; Zhang, X. L.; Yang, X. F.; Niu, S. Y.; Zheng, Z. Y.; Dong, B.; Hur, J.; Dai, X. H.	Aging and mitigation of microplastics during sewage sludge treatments: An overview	Contexto del estudio - Resultados	Revisión clave para entender los riesgos ambientales asociados a microplásticos en los procesos de tratamiento de lodos; aporta bases teóricas útiles para estudios sobre contaminación secundaria y alternativas de mitigación en sistemas agroindustriales.	DOI10.1016/j.scitotenv.2024.171338
2024	Wang, C.; Wei, W.; Wu, L.; Wang, Y.; Dai, X. H.; Ni, B. J.	A Novel Sustainable and Self-Sufficient Biotechnological Strategy for Directly Transforming Sewage Sludge into High-Value Liquid Biochemicals	Metodologia - Resultados	Aporta una alternativa innovadora para la valorización biotecnológica de lodos residuales, integrando recuperación de compuestos de alto valor y sostenibilidad del proceso, con potencial aplicación	DOI10.1021/acs.est.4c03165

				en biorefinerías y sistemas agroindustriales.	
2024	Liu, XG; Tan, QT; (...); Dai, XH	Pre-drying limitedly affected the yield, fuel properties, pyrolysis and combusion behavior of sewage sludge hydrochar	Metodología / Contexto.	Aunque el estudio se centra en la carbonización hidrotermal del lodo residual, sus resultados son metodológicamente relevantes para procesos termoquímicos y biotecnológicos de aprovechamiento de residuos agroindustriales. La investigación demuestra que el presecado del lodo antes del tratamiento no altera de forma significativa la calidad del producto final, lo cual permite estandarizar comparaciones y simplificar los procedimientos experimentales en el tratamiento de residuos con alto contenido de humedad —como las	DOI10.1016/j.wasman.2024.05.032

				aguas residuales del café—.	
2024	Chen, RJ; Dai, XH and Dong, B	Mechanism insights into hydrothermal-activated tannic acid (TA) for simultaneously sewage sludge deep dewatering and antibiotics removal	Metodología / Resultados.	El estudio aporta información útil sobre el uso de compuestos naturales (ácido tánico) en tratamientos hidrotermales para mejorar la deshidratación del lodo y eliminar contaminantes como antibióticos. Estos resultados son metodológicamente relevantes porque muestran cómo procesos catalíticos basados en polifenoles pueden optimizar la hidrólisis y mineralización de compuestos orgánicos, algo extrapolable al tratamiento de aguas residuales de origen	DOI10.1016/j.watres.2024.121619

				agroindustrial como las del café.	
2024	Liu, XG; Gu, JN; (...); Dai, XH	Acid-catalyzed co-hydrothermal carbonization of sewage sludge and mixed straws to produce high-quality solid fuel	Metodología / Resultados.	El estudio describe un proceso de co-carbonización hidrotermal catalizada por ácido para valorizar lodos residuales y residuos agrícolas (pajas), mejorando su poder calorífico y eficiencia de combustión. Aporta una base metodológica sólida sobre procesos termoquímicos integrados para el aprovechamiento energético de residuos orgánicos mixtos. En el contexto del proyecto, esto respalda el potencial de mezclar aguas residuales del café con otros subproductos agrícolas para optimizar su	DOI10.1016/j.renene.2024.121820

				conversión en bioproductos, como bioplásticos o biocombustibles.	
2024	Liu, R; Xu, Y; (...); Dai, XH	Effects of pH-varying thermal modification on sewage sludge: A focus on releasing nitrogen- and phosphorus-containing substances	Resultados / Aplicación.	El artículo profundiza en cómo la modificación térmica bajo diferentes condiciones de pH afecta la liberación de compuestos nitrogenados y fosforados del lodo residual. Este enfoque ayuda a entender los mecanismos de liberación y recuperación de nutrientes a partir de matrices complejas, conocimiento útil para procesos agroindustriales que busquen recuperar o transformar elementos del agua residual del café en productos con valor agregado (como	DOI10.1016/j.watres.2024.121746

				bioplásticos o biofertilizantes).	
2024	Zhou, SY; Gong, H; (...); Dai, XH	Spatial and temporal dynamics of sewage sludge phosphorus recovery potential in the cities of Yangtze River Zone in China: Implications for regional recycling policies	Contextual / Aplicación práctica.	Este estudio aborda el potencial de recuperación de fósforo (P) a partir de lodos residuales urbanos, analizando su variación espacial y temporal, y cómo puede integrarse en políticas de reciclaje regional y aprovechamiento agrícola. Aunque se centra en China, su enfoque sirve como referencia de gestión de nutrientes y sostenibilidad aplicable al aprovechamiento de aguas residuales agroindustriales, como las de la caficultura.	DOI10.1016/j.scitotenv.2024.176428

2024	Geng, H; Xu, Y; (...); Yang, DH	Abiotic and biotic roles of metals in the anaerobic digestion of sewage sludge: A review	Marco teórico y discusión.	Este artículo revisa cómo los metales presentes en los lodos (intrínsecos o añadidos) influyen tanto abiótica como bióticamente en la digestión anaerobia, afectando la actividad enzimática, la estructura del sustrato y la comunidad microbiana. Esto se relaciona directamente con tu monografía, ya que los metales también están presentes en las aguas residuales del beneficio húmedo del café, pudiendo interferir o catalizar las rutas bioquímicas en la síntesis de bioplásticos biodegradables.	DOI10.1016/j.scitotenv.2023.169313

2024	Chen, RJ; Xiao, TT; (...); Dong, B	Roles of extracellular polymeric substances in the adsorption and removal of norfloxacin during hydrothermal treatment of sewage sludge	Metodología y resultados.	El estudio demuestra cómo las sustancias poliméricas extracelulares (EPS) presentes en lodos actúan en la adsorción y degradación de contaminantes durante tratamientos térmicos. Esto aporta información útil sobre cómo los compuestos orgánicos complejos presentes en aguas residuales del café podrían comportarse o transformarse bajo condiciones de tratamiento hidrotermal o biotecnológico, lo que puede inspirar estrategias para extraer o modificar polímeros naturales en la obtención de bioplásticos.	DOI10.1016/j.watres.2023.120899
2024	Geng, H; Xu, Y; (...); Dai, XH	Magnetic porous microspheres altering interfacial thermodynamics of sewage sludge to drive metabolic cooperation for efficient methanogenesis	Resultados y metodología.	El estudio muestra cómo el uso de microsferas magnéticas porosas (MPMs) puede modificar la termodinámica interfacial del lodo y estimular la metanogénesis, mejorando el transferencia de	DOI10.1016/j.watres.2024.122022

				electrones y protones (PCET) entre fases sólida y líquida.	
2024	Xu, JY; Wang, YZ; (...); Sun, J	In-sewer iron dosing enhances bioenergy recovery in downstream sewage sludge anaerobic digestion: The impact of iron salt types and thermal hydrolysis pretreatment	Resultados y enfoque tecnológico.	El estudio demuestra cómo la adición de sales de hierro en sistemas de alcantarillado puede aumentar la recuperación de bioenergía durante la digestión anaerobia del lodo, especialmente cuando se combina con pretratamientos térmicos.	DOI10.1016/j.wroa.2024.100273
2024	Geng, H; Xu, Y; (...); Dai, XH	Cation exchange resins enhance anaerobic digestion of sewage sludge: Roles in sequential recovery of hydrogen and methane	Fundamento teórico y metodológico.	El artículo examina cómo el uso de resinas de intercambio catiónico (CER) mejora la digestión anaerobia (AD) de los lodos, potenciando la recuperación secuencial de hidrógeno y metano. Explica los mecanismos bioquímicos y fisicoquímicos involucrados, como la solubilización de materia orgánica, hidrolisis, acidificación, y la interacción iónica en la	DOI10.1016/j.watres.2023.120897

				interfaz sólido-líquido, además de detallar los cambios en la comunidad microbiana que optimizan la producción energética.	
2025	Liu, X. G.; Peng, L.; Deng, P. Y.; Xu, Y. M.; Wang, P. S.; Tan, Q. T.; Zhang, C. Q.; Dai, X. H.	Co-hydrothermal carbonization of sewage sludge and rice straw to improve hydrochar quality: Effects of mixing ratio and hydrothermal temperature	Metodologia - Resultados	Investigación sólida que demuestra la valorización conjunta de residuos agrícolas y urbanos mediante co-HTC, aportando una alternativa sostenible para la generación de bioenergía en entornos agroindustriales.	DOI10.1016/j.biortech.2024.131665
2025	Wang, H; Fu, X; (...); Dong, B	Bioenergy recovery and carbon emissions benefits of short-term bio-thermophilic pretreatment on low organic sewage sludge anaerobic digestion: A pilot-scale study	Metodología / Resultados.	El estudio presenta una alternativa de pretratamiento biotermofílico para mejorar la digestión anaerobia de lodos con bajo contenido orgánico, logrando mayor producción de metano y reducción de emisiones de carbono. Estos resultados son metodológicamente	DOI10.1016/j.jes.2023.08.022

				útiles para el proyecto porque ilustran cómo procesos de acondicionamiento térmico-biológico pueden aumentar la eficiencia energética y la biodegradabilidad de los residuos —principios aplicables al tratamiento de aguas residuales del beneficio húmedo del café para su aprovechamiento en bioprocesos.	
2025	Chen, SX; Hua, Y; (...); Dai, XH	Sewage sludge valorization via phytohormones production: Parameter regulation and process evaluation	Resultados / Metodología.	El estudio demuestra la valorización de lodos residuales mediante tratamiento hidrotermal alcalino, obteniendo fitohormonas, sustancias húmicas y nutrientes (C, N, P, K) con potencial agrícola. Es relevante porque muestra cómo transformar residuos orgánicos en bioproductos útiles, análogo al aprovechamiento de aguas residuales de la industria cafetera para generar materiales de valor	DOI10.1016/j.watres.2024.122813

				agregado como bioplásticos.	
2025	Cao, JC; Xu, Y; (...); Dai, XH	Enhancing the participation of water in the anaerobic digestion of sewage sludge for highly efficient methanogenesis	Metodología y resultados.	El estudio explica cómo el agua puede participar activamente en la metanogénesis de los lodos mediante transferencia acoplada de electrones y protones (PCET), mejorando la conversión de CO_2 a metano. Aunque se centra en lodos, el enfoque revela procesos bioquímicos clave de aprovechamiento energético de residuos orgánicos húmedos, aplicables al análisis de transformaciones en aguas residuales caficultoras para la obtención de productos biológicos de valor (como biopolímeros o bioenergía).	DOI10.1016/j.watres.2025.124047

2025	Ye, YW; Msuya, AS; (...); Wu, BR	Improving Anaerobic Digestion Process of Sewage Sludge in Terms of Energy Efficiency and Carbon Emission: Pre- or Post-Thermal Hydrolysis?	Metodología y resultados.	El estudio analiza el impacto de tratamientos térmicos aplicados antes o después de la digestión anaerobia sobre la eficiencia energética y las emisiones de carbono, empleando balances de masa y energía junto con cálculos según las directrices del IPCC.	DOI10.3390/su17136147
2025	Wang, H; Liu, SY; (...); Dai, XH	Microbial Aggregation Effect by Micron-Sized Carriers in Sewage Treatment: Insights into Interfacial Thermodynamics and Microbial Metabolism	Fundamento teórico y metodológico.	El artículo analiza cómo portadores microscópicos influyen en la agregación microbiana dentro del tratamiento de aguas residuales, enfocándose en la termodinámica interfacial y el metabolismo microbiano. Los resultados muestran mejoras en eficiencia de remoción de nitrógeno, formación de biopelículas, y procesos metabólicos acoplados (fermentación–desnitrificación).	DOI10.1021/acsestengg.5c00337

2025	ao, J. Q.; Yang, D. H.; Liu, Z. G.; Chen, X.; Wang, X. K.; Gong, H.; Dai, X. H.	Enhanced simultaneous recovery of phosphorus and metals from incinerated sewage sludge ash via combined wet-chemical extraction and cation exchange resin	Metodologia - Resultados	Estudio relevante por integrar procesos químicos y de separación iónica para la valorización sostenible de residuos; aporta bases metodológicas para la recuperación de nutrientes y metales en sistemas agroindustriales o de tratamiento de aguas.	DOI10.1016/j.cej.2025.161360