

**PRODUCCIÓN DE BIOETANOL A PARTIR DEL MUCÍLAGO DE CAFÉ
COMO ESTRATEGIA PARA LA VALORIZACIÓN DEL RESIDUO**

PRESENTADO POR:

JORGE LUIS BECERRA BURGOS

JOHN DIEGO BELTRÁN QUIROZ

MARIANA CAMILA ROMERO VILLALBA

DIRECTORA:

LUISA FERNANDA CARVAJAL DÍAZ

FACULTAD DE INGENIERÍA

UNIVERSIDAD EAN

BOGOTÁ D.C

2024

TABLA DE CONTENIDO

Resumen	5
Abstract.....	5
1. Introducción.....	6
2. Objetivos.....	8
2.1 Objetivo general	8
2.2 Objetivo específico	8
3. Planteamiento del problema	8
4. Justificación	9
5. Análisis de requerimientos	11
5.1 Materiales	11
5.2 Equipos	12
5.3 Reactivos	12
6. Marco de referencia	13
6.1 Composición física del grano de café	12
6.1.1 Cereza de Café:	13
6.1.2 Pulpa	13
6.1.3 Pergamino	13
6.1.4 Película plateada	13
6.1.5 Almendra	14
6.2 ¿Qué es el mucílago de café?	14
6.2.1 Composición química del mucílago de café	15
6.3 Impacto ambiental en fuentes hídricas	16
6.4 Desechos orgánicos	17
6.5 Producción de Bioetanol	17

6.5.1 Hidrólisis	17
6.5.2 Fermentación Alcohólica	18
6.5.2.1 Sustrato (Mucílago de Café)	18
6.5.2.2 Microorganismos	18
7. Análisis de restricciones	19
7.1 Ambientales	19
7.2 Económicas	19
7.3 Legales	21
7.4 Políticas.....	22
7.5 Salud y seguridad	22
7.6 Socioculturales.....	23
8. Metodología	24
8.1 Procedimiento experimental	25
8.1.1 Procedimiento molienda húmeda, grados Brix y pH iniciales	25
8.1.2 Hidrólisis alcalina	25
8.1.3 Fermentación	26
8.2 Destilación	26
9. Análisis de costos	27
10. Análisis de resultados	34
10.1 Relaciones y conceptos teóricos utilizados en la práctica de laboratorio N°1	34
10.1.1 Materiales y equipos	34
10.1.2 Diagrama de proceso de pretratamiento	35
10.1.3 Homogenización de la cascara.....	35
10.1.4 Lavado de grano húmedo.....	36

10.1.5 Hidrólisis alcalina	37
10.1.6 Destilación simple.....	38
10.1.7 Resultados numéricos de la práctica	39
10.1.8 Resultados destilación.....	42
10.2 Relaciones y conceptos teóricos utilizados en la práctica de laboratorio N°2	42
10.2.1 Homogenización de la cáscara	42
10.2.2 Lavado de grano húmedo	42
10.2.3 Hidrólisis alcalina	43
10.2.4 Resultados numéricos de la práctica	44
10.2.5 Resultados destilación.....	47
11. Análisis de resultados laboratorio N°1	47
12. Análisis comparativo de los laboratorios 1 y 2.....	49
13. Análisis teórico a escala piloto	51
14. Conclusiones.....	54
15. Recomendaciones	55
Referencias	56

Resumen

El mucílago de café se destaca como uno de los principales desechos producidos por la industria cafetera, y su gestión inadecuada ha resultado en su vertimiento en las fuentes hídricas del país, causando un significativo deterioro en la calidad del agua. Con el fin de abordar este problema, este proyecto se enfoca en la producción de bioetanol a partir del mucilago de café, utilizando el método de hidrólisis alcalina. Se resalta la importancia de considerar factores clave como la temperatura de destilación, el pH inicial y la concentración de levadura en este proceso. La hidrólisis alcalina se presenta como un método viable para extraer los azúcares reductores y lograr un pH adecuado para la extracción de bioetanol.

Se establece que una temperatura de destilación incorrecta puede desencadenar una descomposición química, mientras que un pH inicial óptimo de entre 4 y 4.5 favorece una mayor generación de alcohol. Además, se determina que la concentración ideal de levadura es de 2.5 gramos por 100 mililitros de solución. La hidrólisis alcalina se presenta como un método viable para extraer los azúcares reductores y alcanzar un pH adecuado para la obtención de bioetanol, lo que ofrece una solución prometedora para el manejo sostenible de los residuos de la industria cafetera.

Palabras clave: *Bioetanol, mucílago de café, contaminación, valorización de residuos*

Abstract

Coffee mucilage stands out as one of the main waste products generated by the coffee industry, and its inadequate management has resulted in its discharge into the country's water sources, causing significant deterioration in water quality. In order to address this issue, this project focuses on the production of bioethanol from coffee mucilage, using the alkaline hydrolysis method. The importance of considering key factors such as

distillation temperature, initial pH, and yeast concentration in this process is emphasized.

Alkaline hydrolysis is presented as a viable method to extract reducing sugars and achieve an appropriate pH for ethanol extraction.

It is established that an incorrect distillation temperature can trigger chemical breakdown, while an optimal initial pH between 4 and 4.5 favors higher alcohol generation.

Furthermore, it is determined that the ideal yeast concentration is 2.5 grams per 100 milliliters of solution. Alkaline hydrolysis is presented as a viable method to extract reducing sugars and reach an appropriate pH for ethanol production, offering a promising solution for the sustainable management of coffee industry waste.

1. Introducción

Colombia se destaca como uno de los principales productores de café a nivel global, ocupando el tercer puesto en términos de producción anual, siendo superado únicamente por Brasil y Vietnam. Según datos proporcionados por la Federación Nacional de Cafeteros (FNC) en su informe del año 2023, durante la temporada de cultivo, las exportaciones de café colombiano descendieron a 11.9 millones de sacos de 60 kilogramos, en comparación con los 12.36 millones de sacos del año anterior. Esta disminución se debió a varios factores, incluidos los desafíos ambientales y las fluctuaciones en la demanda global. Los principales destinos de exportación del café colombiano son Norteamérica (Estados Unidos y Canadá), que representan el 45% del total de las exportaciones, seguido de Europa con el 29%, y finalmente Asia con el 17% (Federación Nacional de Cafeteros de Colombia, 2021).

Colombia alberga departamentos donde la actividad económica principal está vinculada a la producción de café, siendo estos también los más afectados por los desafíos ambientales mencionados anteriormente. Dado que el 20% de la composición del café corresponde a la cereza, que contiene una gran cantidad de azúcar y compuestos

químicos útiles, su acumulación en grandes cantidades genera desestabilización química. Por ello, se han llevado a cabo estudios e investigaciones para reducir la cantidad de residuos y generar productos de mayor valor, como el bioetanol.

El mucílago de café, un subproducto orgánico generado durante el proceso de pretratamiento del café pergamino seco, posee un potencial significativo para convertirse en bioetanol. Su composición rica en azúcares fermentables lo convierte en una materia prima ideal para la producción de etanol, ofreciendo una solución innovadora y sostenible para mitigar los problemas asociados con su disposición.

Durante el proceso de producción del café, surge como subproducto el mucílago, cuya cantidad se estima según información proporcionada por Cenicafé en su programa de investigación científica. Según sus reportes, "Por cada millón de sacos de 60 Kg de café que Colombia exporta, se generan aproximadamente 55,500 toneladas de mucílago fresco" (Cenicafé, 2022). Esto implica que para el año 2021 se aprecia una producción de aproximadamente 682,000 toneladas de mucílago de café, y para el año 2022, alrededor de 627,000 toneladas. La mayor parte de este mucílago se descarta en fuentes hídricas y suelos, lo que contribuye a la contaminación debido a la carga biológica.

A nivel de los cultivos de café en Colombia, el mucílago de café representa un desafío ambiental considerable. Al ser desechado, este subproducto contamina los suelos y las fuentes hídricas locales, comprometiendo la calidad del agua y del suelo al agotar los niveles de oxígeno disuelto y alterar el pH y la composición química del entorno. (Castillo et al., s/f).

Con la problemática ambiental existente a partir de este subproducto, la capacidad del mucílago de café para ser convertido en bioetanol ofrece una oportunidad única para abordar estos problemas de manera integral. Explorar las posibilidades de transformar el mucílago de café en bioetanol no solo representa una estrategia para reducir las

necesidades en cuanto a los que se refiere a la adecuada gestión ambiental en los cultivos de café en Colombia, sino que también capitaliza los recursos disponibles para promover la sostenibilidad y la eficiencia en la producción cafetera.

2. Objetivos

2.1 Objetivo general

Desarrollar un proceso para la producción de bioetanol a partir de mucílago de café como alternativa sostenible para valorizar este residuo generado por la industria cafetera en Colombia

2.2 Objetivos específicos

- Aplicar el método de hidrólisis alcalina para convertir el mucílago de café en azúcares fermentables mediante pruebas de laboratorio.
- Determinar los equipos, reactivos y condiciones de operación necesarios para llevar a cabo el proceso de producción de bioetanol a escala piloto.
- Realizar un análisis económico detallado para evaluar la viabilidad financiera del proyecto, considerando costos de materias primas, equipos y potenciales ingresos por la venta de bioetanol.

3. Planteamiento del problema

La industrialización del cultivo de café tiene un impacto significativo en el medio ambiente, manifestado en la tala de la vegetación natural para la creación de plantaciones cafetaleras, el uso excesivo de agroquímicos y la contaminación del agua durante el procesamiento del café (Gmünder et al., 2020). Esta problemática se agrava por la ubicación de muchas fincas cafeteras en laderas empinadas, lo que aumenta el riesgo de erosión del suelo. Además, la alta densidad de estas fincas dificulta la

implementación de prácticas efectivas de gestión medioambiental. El vertido directo de aguas residuales sin tratar en cuerpos de agua superficiales también contribuye significativamente a la contaminación (Campos Morales & Durán Medina, 2019).

Por otro lado, el mucílago de café emerge como una fuente adicional de contaminación para el suelo y el agua en las regiones cafetaleras. Su vertido en fuentes hídricas puede reducir los niveles de oxígeno disuelto, fomentando el crecimiento excesivo de microorganismos y degradando la calidad del agua. Según un estudio realizado por Castillo y colaboradores (s/f), en 5 fincas cafeteras del sector del Huila, se determinó que anualmente se arrojan al ecosistema 56,659.4 litros de la mezcla mucílago-agua. De esta cantidad, 41,797.6 litros corresponden al agua, mientras que los restantes 14,861.8 litros representan mucílago puro.

Los residuos orgánicos descargados en los cuerpos de agua disminuyen su calidad, provocando la pérdida de biodiversidad y contaminando las aguas subterráneas. Esto afecta la salud de quienes dependen de estas fuentes de agua para su consumo, así como el recurso ambiental vital de nuestra época. Además, la contaminación del agua tiene impactos sociales, como el desplazamiento de comunidades, cambios en las áreas de residencia y enfermedades causadas por altas concentraciones biológicas presentes en los lixiviados del mucílago.

4. Justificación

La relevancia de la industria del café en el mercado colombiano se refleja en sus considerables aportes al capital nacional, como lo indica la Federación Nacional de Cafeteros (FNC), que reporta que la industria cafetera representó el 15% del PIB agropecuario del país y el 1% del PIB total. Además, la industria del café demanda más de 2,5 millones de empleos directos e indirectos en toda la cadena de producción. Esto

evidencia la importancia económica y social del sector cafetero en Colombia, especialmente en regiones como Huila, Antioquia, Tolima y Cauca, donde la siembra del cultivo ocupa áreas de más de 100.000 hectáreas en cada departamento (La tienda del café, 2023; La República, 2019).

Los subproductos resultantes del proceso de industrialización del café representan una cantidad significativa de residuos orgánicos, cuyo manejo inadecuado ocasiona importantes impactos ambientales y repercute tanto en la salud humana como en la preservación de los ecosistemas. Según Arango Acevedo & Zapata Velez (2014), solo el 9,5% del peso total del fruto de café se utiliza en la producción de bebidas, mientras que el restante 90,5% se convierte en subproductos que, al ser dispuestos o almacenados inadecuadamente, contaminan las fuentes hídricas y los suelos, generando serias afectaciones a los ecosistemas.

Esta situación revela una oportunidad desaprovechada por la industria colombiana, ya que el uso adecuado de estos residuos podría dar lugar a la creación de una nueva industria tanto a nivel local como nacional. Al utilizar el mucílago como materia prima para la producción de bioetanol, no solo se reduciría la contaminación en las fuentes hídricas, sino que también se mejorarían las condiciones económicas de los caficultores. Adicionalmente, se estima que fomentar procesos de reutilización de residuos, como la transformación del mucílago en bioetanol, podría resultar en un incremento en la generación de empleo y la creación de nuevas empresas. Este impulso no solo dinamizaría la economía local, sino que también fomentaría la innovación en los procesos industriales de la región cafetera.

La industria cafetera en Colombia ha experimentado beneficios económicos y sociales, así como también se ha visto obligado a enfrentar desafíos ambientales cada vez más significativos. El pretratamiento del café en las fincas, que implica la obtención

del grano de café verde junto con el mucílago, ha causado problemas ambientales considerables debido a la gestión inadecuada de estos subproductos, resaltando la necesidad de buscar alternativas sostenibles y respetuosas con el medio ambiente en la producción de café en el país. Es por esto que, el objetivo principal de este proyecto es ofrecer una alternativa para valorizar los residuos generados por la industria cafetera. Esta iniciativa busca proporcionar una solución práctica y sostenible para abordar la gestión de residuos de la industria, posibilitando con ello reducir los vertimientos de mucílago en las fuentes hídricas.

5. Análisis de requerimientos

Para llevar a cabo el proceso de producción de bioetanol a partir del mucílago de café de manera eficiente y efectiva, es crucial contar con una serie de materiales, reactivos y equipos específicos. A continuación, se detalla un análisis detallado de los requerimientos técnicos necesarios:

5.1. Materiales:

- Se requieren varios tipos de beakers de diferentes capacidades para la preparación y manipulación de las soluciones.
- Cajas de Petri para la realización de análisis microbiológicos.
- Frascos o botellas oscuras de 1 L para contener la solución de mucílago durante el proceso de fermentación.
- Papel filtro y embudo Büchner para la filtración del producto final.
- Probetas, matraces y pipetas para la medición precisa de volúmenes.
- Nevera de icopor grande para el almacenamiento de las botellas de fermentación.
- Airlocks para el control de la fermentación.
- Agitadores y vara magnéticos para la agitación de las soluciones.

5.2 Reactivos:

- Hidróxido de Sodio (NaOH) al 32%: Utilizado en la hidrólisis alcalina del mucílago de café.
- Sulfito de Sodio (Na₂SO₃): Empleado como agente reductor en el proceso de hidrólisis.
- Agua destilada: Utilizada como solvente y reactivo en diversas etapas del proceso.
- Mucílago de café: Materia prima principal para la producción de bioetanol.
- Levadura fresca o seca (*saccharomyce cerevisiae*): Utilizada en el proceso de fermentación para convertir los azúcares en etanol.

5.3 Equipos:

- Autoclave: Utilizado para esterilizar y preparar el mucílago de café antes de la fermentación.
- Plancha de calentamiento y agitación: Necesaria para la preparación de las soluciones y el mantenimiento de las condiciones de reacción.
- Balanza analítica: Utilizada para la medición precisa de masa de los reactivos.
- Refractómetro y potenciómetro: Empleados para la medición de la concentración de azúcares y el pH de las soluciones, respectivamente.
- Bomba de vacío: Utilizada en el proceso de filtración para acelerar el paso del líquido a través del papel filtro.
- Molino (Licuadora): Utilizado en la molienda húmeda del mucílago de café.

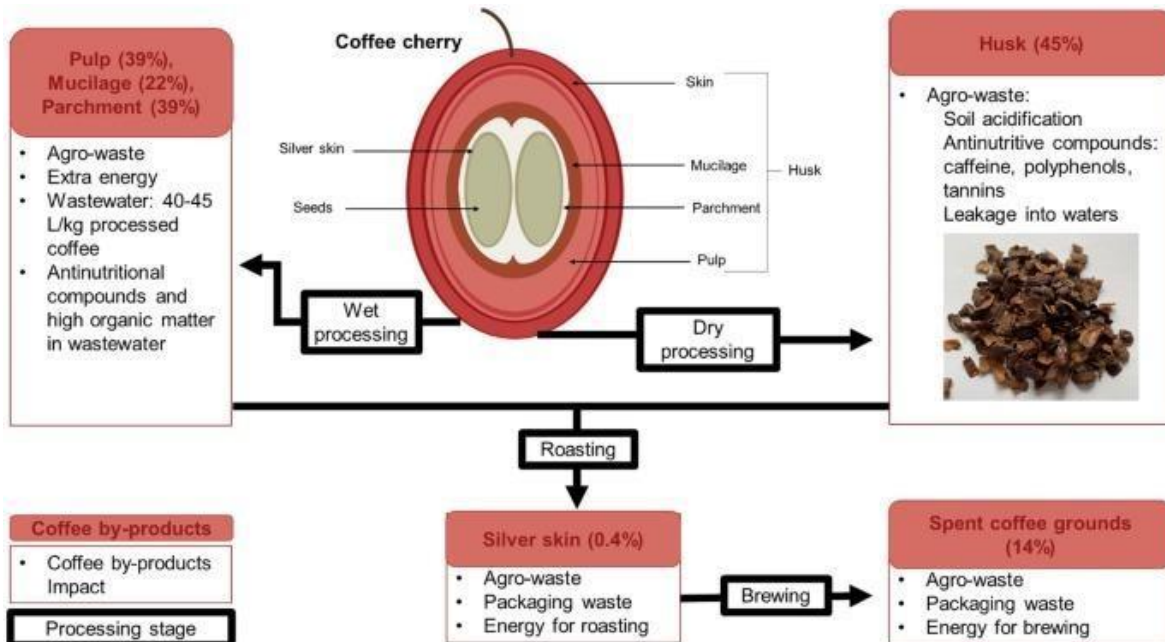
6. Marco de referencia

6.1 Composición física del grano de café

El grano de café es el fruto de la planta de café y consta de varias partes

esenciales que contribuyen a su sabor, aroma y calidad. A continuación, en la figura 1, se presenta una descripción general de su composición física.

Figura 1. Composición física del fruto de café



Fuente. Tomada de: Král, E., Rukov, J. L., & Mendes, A. C. (2023). Coffee Cherry on the

Top: Disserting Valorization of Coffee Pulp and Husk

6.1.1 Cereza de Café: fruto completo y fresco del árbol del café. (Vanegas, 2016)

6.1.2 Pulpa

Parte de la cereza del café que se elimina durante el despulpado y que se compone del exocarpio (parte externa del fruto), y la mayor parte del mesocarpio (mucílago: parte gelatinosa y azucarada). Recubre todo el exterior del fruto y es por lo general de color rojo. (Vanegas, 2016)

6.1.3 Pergamino

Membrana de celulosa o endocarpio seco del fruto del café, de consistencia dura y color amarillo que protege las semillas. Cuando el grano está seco se torna quebradiza. (Vanegas, 2016)

6.1.4 Película Plateada

Es una capa más delgada y fina que el pergamino, que se conoce como la

cubierta seca de la semilla del grano de café y/o cutícula. De ordinario tiene aspecto plateado o cobrizo. Puede permanecer adherida al grano hasta que este se tuesta. (Vanegas, 2016)

6.1.5 Almendra

Es la semilla que viene por pares en el interior del fruto. Es el término comercial que designa la semilla seca de la planta del café. Es la parte del fruto que luego de tostada y molida se utiliza en la preparación de la bebida de café. (Vanegas, 2016)

6.2 ¿Qué es el mucílago de café?

El mucílago de café es un residuo proveniente de la capa interna del fruto del café, el cual se obtiene de los procesos de pretratamiento del fruto del café, más específicamente del proceso de despulpado, se encuentra localizado entre la pulpa y el pergamino del grano de café, este residuo es de carácter semilíquido con una consistencia viscosa, alberga varios microorganismos de tipo *Serratia*, *Torulopsis* y *Citrobacter* (Orozco et al., 2013).

Por cada kg de café cereza sin seccionar se producen 91 ml de mucilago fermentado (Zambrano- Franco et al., 2006). Su producción media es de 768 kg/ha-año (Rodríguez V, et al., 2015). Y al igual que la pulpa, el mucilago representa 55.500 toneladas por cada millón de sacos de 60kg, si esto no se usa de forma adecuada representa una contaminación de excretas y orina de 310000 habitantes.

El principal residuo de interés de esta investigación es el mucilago de café para la producción de bioetanol, y según estudios realizados por (Rodríguez V. & Zambrano F., 2014) acerca de la fermentación alcohólica obtuvo un promedio de 58.37 ml de etanol partiendo de 1 kg de mucilago fresco lo cual equivale a 1.23 MJ/kg de mucilago. Por cada millón de sacos de café verde Cenicafé obtuvo unos rendimientos para la producción de bioetanol como se muestra en la tabla 1.

Tabla 1. Producción de bioetanol a partir de 1M de sacos de café verde.

Subproducto	Toneladas generadas	Litros de etanol/ tonelada de subproducto	Galones de etanol (gal L/s)
Pulpa fresa	162.900	25,17	1.083.274
Mucílago fresco	55.500	58,37	855.888
Galones de etanol/millón de sacos de café verde			1.939.162

Fuente. Tomado de: Rodríguez Valencia, N., Antonio, D., & Franco, Z. (2010). Fondo Nacional del Café LOS SUBPRODUCTOS DEL CAFÉ: FUENTE DE ENERGÍA RENOVABLE.

6.2.1 Composición química del mucílago de café:

En la Tabla 2 se presenta una descripción al detalle de cada componente y su composición:

Tabla 2. Composición química del mucilago de café (componentes)

Componente	Composición
Agua	85-91%
Pectinas	10-15%
Azúcares	6%
5trProteínas	1%
Lípidos	0,5%
Minerales	1%

Fuente. Tomado de (Puerta-Quintero & Ríos-Arias, 2011)

- **Agua:** el agua representa el componente principal del mucilago, con un contenido de entre 85% y 91%.
- **Pectinas:** las pectinas son polisacáridos que forman una matriz gelatinosa que rodea los granos de café.
- **Azúcares:** los azúcares representan alrededor del 6% del mucilago, y están compuestos principalmente de sacarosa, glucosa y fructosa.

- **Proteínas:** las proteínas representan alrededor del 1% del mucilago.
- **Lípidos:** los lípidos representan alrededor del 0,5% del mucilago.
- **Minerales:** el mucílago contiene una variedad de minerales, incluyendo potasio, calcio, fósforo, magnesio y hierro en concentraciones de 100-200mg, 20-40mg, 10-20mg, 10-20mg y 1-2 mg respectivamente por cada 100g de mucilago (Puerta-Quintero & Ríos-Arias, 2011).

6.3 Impacto ambiental en fuentes hídricas

La federación nacional de cafeteros de Colombia junto a Cenicafé se unió para concientizar a los caficultores sobre la contaminación que generaba el proceso de café, es por ello por lo que sacaron un instructivo de las prácticas para ahorrar el agua y optimizarla en las diferentes etapas. (Sanz, et al., 2015).

En este instructivo se encuentra el “Beneficio ecológico del café sin vertimientos”, este beneficio consta de diferentes procesos, el despulpado y el transporte de la pulpa se realiza sin agua, al realizar esta acción se evita el 74% de la contaminación existente, para la eliminación del mucilago se realiza de forma manual o mecánica utilizando desmucilaginosos. Lo cual permite lavar y clasificar el café con un consumo de agua inferior a 5L/kg de cps “café pergamino seco”. (esto equivale al 26% de contaminación restante).

Para la transformación del fruto en semilla se utiliza agua para las etapas del despulpado lavado y transporte con un consumo aproximado de 40 L de agua por cada kilogramo de café pergamino seco. (Rodríguez V, et al., 2015)

La DQO y DBO son parámetros que nos permiten medir la cantidad de oxígeno consumido por el proceso de degradación de la materia orgánica en las aguas residuales, para las aguas que tienen origen en el proceso de obtención del café la relación entre ambos parámetros es de 2.07 en promedio. En la cuantificación de DQO de la pulpa y el

mucilago se encuentra que por cada kg de fruto se genera aproximadamente 115.1 g de DQO (Es importante destacar que la DQO no es generada, es el resultado de la presencia de una cantidad de materia orgánica en el agua), el 73,7% proviene de la pulpa y el 26,3% proviene del mucílago (Rodríguez V, et al., 2015).

6.4. Desechos orgánicos

Solo el 5% del peso del fruto fresco del café es utilizado, el 95% se consideran desechos. La pulpa, el mucílago, el cisco, las pasillas, la borra y los tallos de café son los principales residuos del procesamiento del café. (Fernández-Cortés et al., 2020).

6.5 Producción de Bioetanol

La producción de bioetanol a partir del mucílago de café involucra un proceso de fermentación alcohólica en el que los azúcares presentes en el mucílago, principalmente sacarosa y glucosa, son convertidos en etanol y dióxido de carbono mediante la acción de microorganismos, típicamente levaduras. Posteriormente, el etanol generado se somete a un proceso de purificación y deshidratación para obtener un biocombustible de alta calidad.

Este enfoque de producción sostenible aprovecha un subproducto de la industria del café y presenta aplicaciones significativas en la fabricación de biocombustibles y productos químicos industriales. El proceso descrito anteriormente y sus variables específicas son estudiadas bajo los conceptos de hidrólisis, fermentación alcohólica y purificación de alcoholes. (Funes et al., 2012).

6.5.1 Hidrólisis

La hidrólisis es un proceso que se utiliza para romper los azúcares de gran tamaño en azúcares más pequeños, que pueden ser fermentados por las levaduras. Existen dos métodos principales de hidrólisis del mucilago de café: la hidrólisis ácida y la hidrólisis alcalina. La hidrólisis alcalina es más efectiva que la hidrólisis ácida para

descomponer los azúcares del mucílago de café. (Díaz & Ríos, 2010). Posteriormente, en el proceso de obtención de bioetanol, se lleva a cabo una serie de etapas que incluyen la molienda inicial para separar los jugos del material lignocelulósico. Esta etapa es seguida por una prueba de jarras, precipitación y filtración para eliminar impurezas. Luego, se emplea la hidrólisis alcalina, la cual implica el tratamiento de la biomasa con temperaturas específicas de ácido sulfúrico para romper la estructura cristalina de la pared celular. Durante este proceso, las enzimas, como las endoglucanasas y exoglucanasas, facilitan la hidrólisis enzimática, descomponiendo las cadenas de azúcares fermentables. Es esencial mantener un pH entre 4 y 4,5 y temperaturas de 40 a 50 °C (Rodríguez Siliceo, 2014). La etapa de hidrólisis es de suma importancia en el proceso de obtención de bioetanol.

6.5.2 Fermentación Alcohólica

La fermentación alcohólica es un proceso biológico en el cual los azúcares se convierten en etanol y dióxido de carbono bajo la influencia de microorganismos, principalmente levaduras. (Enciclopedia de la Química, 2023). En el contexto de la producción de bioetanol a partir de mucílago de café, se pueden considerar los siguientes aspectos:

6.5.2.1 Sustrato (Mucílago de Café)

El mucílago de café es una sustancia viscosa que se encuentra en la capa externa del grano de café. Contiene azúcares fermentables, como sacarosa y glucosa, que son esenciales para la fermentación alcohólica. (Cenicafé, 2012). Lo anterior lo hace una materia prima óptima para el estudio de su posible conversión en etanol.

6.5.2.2 Microorganismos

Las levaduras son los microorganismos más comúnmente utilizados en la fermentación alcohólica. La especie *Saccharomyces cerevisiae* es ampliamente

preferida debido a su eficiencia en la conversión de azúcares en etanol y su resistencia a condiciones adversas. (Herrera et al., 2019).

7. Análisis de Restricciones

Es crucial identificar las potenciales dificultades que podrían surgir durante la investigación y la implementación de la solución en el contexto colombiano. Para ello, es fundamental definir las principales restricciones que podrían afectar el proceso de obtención de bioetanol a partir del mucílago de café.

7.1 Ambientales

La afectación de los cultivos de café es considerable, ya que disminuyen las posibilidades de recuperación de las fuentes hídricas, la restauración de los suelos y la preservación de la biodiversidad. Durante el proceso de obtención del beneficio del café, se emplean alrededor de 40 litros de agua por cada kilogramo de café seco (Rodríguez V, et al., 2015), lo que resulta en la generación de agua residual de difícil reutilización. Además, la pulpa, como subproducto del café, altera las quebradas debido a su descomposición natural, provocando cambios en el pH del suelo y desequilibrios en los nutrientes.

En 2012, se realizaron pruebas de evapotranspiración con el objetivo de secar la pulpa de café utilizando la tecnología ECOMILL, mediante un secador solar parabólico. Los resultados indicaron que los residuos sólidos tienen potencial para ser utilizados como biofertilizantes, aditivos de biogás, alimento para consumo animal, aglomerantes para la construcción y en la producción de plásticos biodegradables (Cenicafe, 2013).

7.2 Económicas

A lo largo del proceso experimental, se han identificado diversas restricciones económicas que deben ser consideradas para la transformación del mucílago de café en

bioetanol. En primer lugar, se ha considerado el costo de los materiales y recursos utilizados, extrapolándolos al contexto macroeconómico. Aunque el mucílago de café se considera una materia prima gratuita al ser un residuo de la industria cafetera, otros materiales como la levadura *Saccharomyces cerevisiae*, (5 g - \$29.010,06), hidróxido de sodio (1 kg - \$52.943,92) y sulfito de sodio (500 g - \$52.967,85), estos reactivos representan costos significativos debido a su alta pureza necesaria para resultados fiables en laboratorio.

Se han identificado los costos asociados a la mano de obra, transporte y posibles gastos imprevistos durante el proceso experimental, como la adquisición de guantes, tapabocas, marcadores, esferos, entre otros. Teniendo en cuenta un salario mínimo de \$5,532 por hora, el costo del transporte en Transmilenio de \$5,900 (ida y vuelta), y un estimado de gastos imprevistos de \$5,000, se calcula un total aproximado de \$151,352 para toda la experimentación.

Considerando esta información, se establecen las siguientes restricciones económicas: en primer lugar, a pesar de que el mucílago de café no tenga un costo fijo, es necesario evaluar los costos relacionados con su recolección, transporte y almacenamiento. En segundo lugar, los altos costos de las materias primas como la levadura *Saccharomyces cerevisiae*, el hidróxido de sodio y el sulfito de sodio podrían afectar el proceso de obtención de bioetanol. Por lo tanto, se requiere encontrar alternativas más económicas a nivel industrial que permitan obtener bioetanol de calidad a un precio más accesible.

Finalmente, los precios del bioetanol son variables y dependen de la fuente de origen y su calidad. Por lo tanto, la última barrera económica radica en que el bioetanol obtenido a partir del mucílago de café sea competitivo en el mercado colombiano, manteniendo una calidad similar al bioetanol producido a partir de caña de azúcar y

maíz, y que su precio permita cubrir todos los gastos mencionados anteriormente.

(Mahecha et al.,2022)

7.3 Legales

Las autoridades regionales encargadas de los recursos naturales en Colombia son responsables de coordinar la disposición final de los materiales ambientales. La Federación Nacional de Cafeteros de Colombia (FNCC) ha implementado programas en el sector cafetalero, como beneficios ecológicos, manejo forestal y potabilización del agua, con el fin de mejorar los procesos. Por otro lado, el Ministerio de Medio Ambiente y Sostenibilidad (MADS) está colaborando con la Unión Agrícola Sueca para desarrollar directrices en varios sectores agrícolas como parte de la "Política Ambiental Nacional para la Producción Limpia", con el propósito de fomentar prácticas sostenibles. La Ley 99 de 1993 estableció el Sistema Ambiental Nacional (SINA) para coordinar actividades y regulaciones que mejoren la calidad y disposición de los residuos, incluidos los residuos de café.

De acuerdo con estas leyes, es posible identificar las restricciones legales que podrían surgir en el futuro, siendo las siguientes las más relevantes para el proyecto:

- La Ley 693 de 2001 establece normas sobre el uso de alcoholes carburantes y crea estímulos para su producción, comercialización y consumo. Es crucial seguir los lineamientos del Ministerio de Minas y Energía para garantizar que el bioetanol cumpla con los estándares de calidad.
- Ley 9 de 1991 por el cual dicta “Normas generales sobre cambios internaciones y medidas complementarias- contribución cafetera”. (FNC, 2002)
- La RESOLUCIÓN No. 18 0687 DE JUNIO 17 DE 2003 regula la producción, acopio, distribución y puntos de mezcla de los alcoholes carburantes y su uso en

los combustibles nacionales e importados. Esto limita el alcance del bioetanol a base de mucílago en el mercado colombiano.

- La RESOLUCIÓN No. 18 1069 DE AGOSTO 18 DE 2005 establece requisitos para los productores de alcohol carburante, incluyendo la obtención de certificados de conformidad y licencias emitidas por la Autoridad Ambiental Competente.
- La RESOLUCIÓN No. 789 DE SEPTIEMBRE 20 de 2016 califica las mezclas con bioetanol como riesgo alto para la salud pública y el medio ambiente, lo que exige a los productores de biocombustibles obtener una certificación de conformidad de producto de tercera parte.

7.4 Políticas

No se han identificado restricciones políticas para la implementación de esta solución en territorio colombiano. Por un lado, los gobiernos nacionales fomentan la producción de bioetanol mediante incentivos fiscales, mientras que, el crecimiento exponencial en la producción de bioetanol en los últimos años no sugiere un impacto negativo en el consumo. En este contexto, la solución propuesta seguirá la tendencia de producción de biocombustibles en el país y agregará valor al utilizar residuos de la producción de café como materia prima.

7.5 Salud y Seguridad

A lo largo de la investigación, se han establecido los pasos necesarios para obtener el mucílago de café, que incluyen la extracción del mucílago de los granos de café, la fermentación del mucílago con levaduras y la purificación del bioetanol mediante destilación. En términos generales, ninguno de estos procesos presenta riesgos significativos para la salud de las personas involucradas, las comunidades o el medio

ambiente. Sin embargo, es importante destacar que el manejo del bioetanol como producto final requiere precauciones más estrictas que la gasolina tradicional.

Por otro lado, el bioetanol es soluble en agua, a diferencia de otros combustibles como el biodiesel y la gasolina, lo que dificulta su recuperación en caso de vertidos en cuerpos de agua. Además, la mezcla de agua y bioetanol puede volverse altamente corrosiva, lo que aumenta la necesidad de precaución durante el almacenamiento y transporte en contenedores metálicos.

Según la empresa LEA Consultores en Ingeniería de Riesgos y Valuaciones (2018), el bioetanol es altamente inflamable y su combustión produce humo que no es perceptible para el ojo humano. Incluso una mezcla de tan solo un 10% de bioetanol en agua puede volverse inflamable. Por lo tanto, en caso de incendio, los bomberos deben usar espumas especiales tipo ATC (Alcohol Type Concentrate) en lugar de los AFFF (Aqueous Film-Forming Foam) utilizados en extintores convencionales. Se necesita entre dos y cuatro veces más cantidad de espuma para extinguir un incendio de bioetanol que uno de gasolina. (Mahecha et al.,2022)

7.6 Socioculturales

El artículo 5 de la Ley N° 1715 de 2014 regula la integración de fuentes de energía renovables no convencionales en el sistema energético nacional. Según esta ley, se considera energía de biomasa a cualquier energía obtenida de la degradación espontánea o inducida de cualquier tipo de materia orgánica cuyo origen directo sea resultado de procesos biológicos (Congreso de Colombia, 2014). En línea con esta regulación, el bioetanol se reconoce como una fuente de energía renovable en la región, y el gobierno nacional incentiva su producción y comercialización mediante políticas como las establecidas en la COP 21.

La Unidad de Planificación Minero-Energética (UPME), junto con el Ministerio de Minas y Energía, ha desarrollado una serie de incentivos fiscales enfocados en promover las fuentes de energía renovables no convencionales (FN CER), permitiendo a los colombianos beneficiarse económicamente de la producción de biocombustibles como el bioetanol. Además, la participación de los biocombustibles en el proceso de transición energética está vinculada al Plan de Acción Indicativo para el Uso Racional de la Energía 2021-2030 (PAI-Proure), que establece una hoja de ruta para su uso en el sector del transporte.

8. Metodología

Considerando las características de la problemática estudiada durante la investigación, se adopta una metodología que combina enfoques cualitativos y cuantitativos. Esta elección se fundamenta en la necesidad de emplear la investigación cualitativa para comprender el proceso de hidrólisis y fermentación del mucílago de café, así como los efectos de diversas variables en dicho proceso. Por otro lado, la investigación cuantitativa se empleará para determinar la cantidad de bioetanol que puede extraerse a partir del mucílago de café.

Se busca contribuir a la valorización de los residuos generados por la industria cafetalera en Colombia, promoviendo así prácticas más sostenibles en el sector agroindustrial y avanzando hacia una economía más circular y consciente del medio ambiente. El desarrollo de un proceso para la producción de bioetanol a partir de mucílago de café se presenta como una oportunidad clave para lograr este propósito. Se ha determinado que el mucílago de café es una fuente factible para la obtención de bioetanol. Lo anterior es posible mediante una serie de procesos: hidrólisis alcalina con el compuesto hidróxido de sodio, fermentación de azúcares mediante la implementación

de un microorganismo (la levadura *Saccharomyces cerevisiae*) y destilación mediante un montaje de destilación simple.

8.1 Procedimiento experimental

8.1.1 Procedimiento molienda húmeda, grados Brix y pH iniciales

Para iniciar el proceso, se procede a pesar 500 g de mucílago de café y cáscara, los cuales se añaden al molino, preferiblemente una licuadora. Luego, se añaden aproximadamente de 300 a 500 mL de agua destilada al molino junto con los ingredientes. Se procede a moler la mezcla durante aproximadamente 1 minuto o hasta que tanto el mucílago como la cáscara alcancen un tamaño de partícula adecuado. Una vez logrado este paso, se traslada la mezcla al beaker de 1000 mL. A continuación, se extrae una muestra de la solución resultante y se le miden los grados brix utilizando un refractómetro. En caso de utilizar un refractómetro digital, es necesario realizar el proceso de ajuste con agua destilada antes de tomar la lectura.

8.1.2 Hidrólisis alcalina

1. Para preparar la solución de NaOH al 0.25% de pureza 32%, primero se pesan 0.25 g de NaOH al 32% en una balanza analítica. Luego, se mide 100 mL de agua destilada en una probeta de 250 mL y se transfiere a un beaker de 200 mL. Posteriormente, se agregan los 0.25 g de NaOH al 32% y se diluyen hasta lograr una mezcla homogénea utilizando una plancha de calentamiento y agitación, junto con un agitador magnético.
2. Se añade la cantidad necesaria de la solución de NaOH al 0.25% (pureza 32%) al volumen de mucílago de café con cáscara tratado, utilizando 7.8 mL por cada 1L de mucílago, y se mezcla completamente con un agitador.

3. Luego, se agrega la cantidad necesaria de sulfito de sodio (Na_2SO_3), al volumen tratado de mucílago de café con cáscara, utilizando 7.5 g por cada 1L de mucílago, y se mezcla cuidadosamente con un agitador.
4. El beaker de 1000 mL con el mucílago de café se lleva a la autoclave y se deja durante 1 hora a 100°C . Se debe llenar la autoclave con agua destilada hasta la indicación de uso.
5. Después del autoclave, se retira el beaker utilizando guantes de protección y se deja enfriar hasta alcanzar la temperatura ambiente. Luego, se mide el pH y se extrae una muestra de la solución con una pipeta pasteur para medir el °Brix.
6. Se ajusta el pH a un rango de 3.9 a 4.7 utilizando ácido clorhídrico, ácido nítrico o cualquier otro ácido disponible en el laboratorio con la concentración necesaria.

8.1.3 Fermentación

El mucílago de café se transfiere a un vaso de precipitado de 500 mL, en este caso, se adiciona un 2.5% de levadura (*Saccharomyces cerevisiae*), lo que equivale a 25 gramos por cada litro de solución de mucílago y se agita durante 30 minutos. Luego, el vaso de precipitado se coloca en una incubadora a 22°C durante 72 horas. Pasado este tiempo, se retiran los sólidos utilizando un papel filtro y un embudo Büchner para filtración al vacío.

8.2 Destilación

Para la destilación del producto resultante de la fase anterior, es crucial alcanzar una temperatura superior a los 70°C , ya que es necesaria para que el etanol pueda ser destilado. Por encima de esta temperatura, se destilan los productos no deseados, considerando que la temperatura de ebullición del etanol es de 78°C , aunque algunos estudios sugieren que puede llegar hasta los 85°C .

El mucílago de café se dispone en balones de 250 mL o 500 mL, los cuales se colocan sobre una manta calefactora y se aumenta la temperatura gradualmente hasta alcanzar el punto de destilación requerido. Los vapores resultantes se recogen y condensan para obtener el producto final.

9. Análisis de costos

En cuanto al análisis de costos, es necesario realizar un escalamiento del proceso de nivel de laboratorio a nivel industrial. Según la base de datos EMIS pro, el consumo promedio de bioetanol en Colombia es de 544,25 millones de litros, considerando los datos de consumo desde 2014 hasta 2022. Aunque esta cifra parece elevada, la empresa Bioenergía en Colombia es capaz de suministrar el 25% del consumo total de bioetanol en el país.

El análisis de costos nos permitirá conocer la viabilidad económica de este proyecto y su crecimiento a nivel industrial. Según Jorge Bendeck, presidente de la Federación de Biocombustibles de Colombia, en el año 2022 la demanda de biocombustibles aumentó a 20.400 litros diarios entre bioetanol y biodiesel, consolidándose como un sector económico robusto con una producción anual de 7.446.000 litros (Bendeck, 2022).

Con base en esta información, en el análisis de costos de materia prima, es fundamental considerar el costo del mucílago de café, que representa el principal insumo para la producción de bioetanol. Además, se deben evaluar los costos de los equipos necesarios para llevar a cabo el proceso de fermentación y destilación, incluyendo fermentadores, destiladores, tanques de almacenamiento, entre otros. Por otro lado, los costos indirectos a tener en cuenta son aquellos relacionados con el personal, mantenimiento de equipos, energía eléctrica y otros gastos administrativos que inciden en la producción. Los resultados de este análisis se presentan en la Tabla 3.

Tabla 3. Costos del proceso de producción de Bioetanol

COSTO MATERIA PRIMA ANUAL			
Materia prima	Cantidad (Kg)	Costo (Kg)	Costo total en pesos Colombianos
Mucílago de café	258.216	\$536	\$138.326.000
Cáscara de café	112.800	\$536	\$60.426.000
NaOH	1.200	\$150.000	\$180.000.000
Levadura	2.582	\$26.785	\$69.163.000
COSTO EQUIPOS MENSUAL			
Equipo	Costo	Vida útil	Costo total en pesos Colombianos
Reactor de fermentación	\$175.000.000	20 años	\$729.167
Columna de destilación	\$140.000.000	15 años	\$777.778
Tanques de almacenamiento	\$12.600.000	10 años	\$84.000
Molino triturador	\$35.000.000	11 años	\$212.121
COSTO SERVICIOS			
Servicio	Cantidad	Costo (mensual)	Costo total en pesos colombianos
Agua (L)	226.000	\$642.840	\$7.714.000
Electricidad (Kwh)	13.211	\$1.000	\$13.211.000
Arriendo fábrica	N/A	N/A	\$180.000.000
Empaques (L)	50.242	\$536	\$26.914.000
COSTO PERSONAL			
PERSONAL			\$257.000.000
COSTO TOTAL			\$934.076.296

Fuente. Elaboración propia

Como se puede observar, para realizar una inversión de esta magnitud, es fundamental llevar a cabo un análisis económico más profundo que incluya la evaluación de la utilidad

neta del proyecto, las ganancias por la venta del producto, y los gastos fijos del periodo de producción, entre otros valores.

En este análisis económico se evaluará la viabilidad financiera del proyecto de producción de bioetanol a partir del mucílago de café, considerando los ingresos proyectados desde el año 2024 hasta el 2035. Como se puede observar en la Tabla 4 proporciona una visión detallada de la producción anual de alcohol, el precio del litro de alcohol al 90% de pureza, y los ingresos anuales generados por la venta del alcohol producido. A lo largo del periodo de análisis, se observa un incremento constante tanto en el precio del alcohol como en los ingresos anuales, reflejando el crecimiento potencial del mercado y la rentabilidad del proyecto. Esta evaluación permitirá identificar las tendencias de ingresos y proyectar la sostenibilidad económica del proyecto a largo plazo.

Tabla 4. Proyección de Producción e Ingresos de Bioetanol

Año	Producción alcohol (L/año)	Precio litro de alcohol 90% (COP)	Ingresos alcohol (COP/año)	Total Ingresos (COP/año)
2024		\$ 19.736,8		
2025	50242,5	\$ 21.146,1	\$ 1.062.431.320	\$ 1.062.431.320
2026	50242,5	\$ 22.655,9	\$ 1.138.288.916	\$ 1.138.288.916
2027	50242,5	\$ 24.273,5	\$ 1.219.562.745	\$ 1.219.562.745
2028	50242,5	\$ 26.006,6	\$ 1.306.639.524	\$ 1.306.639.524
2029	50242,5	\$ 27.863,5	\$ 1.399.933.587	\$ 1.399.933.587
2030	50242,5	\$ 29.853,0	\$ 1.499.888.845	\$ 1.499.888.845
2031	50242,5	\$ 31.984,5	\$ 1.606.980.908	\$ 1.606.980.908
2032	50242,5	\$ 34.268,2	\$ 1.721.719.345	\$ 1.721.719.345
2033	50242,5	\$ 36.714,9	\$ 1.844.650.106	\$ 1.844.650.106
2034	50242,5	\$ 39.336,4	\$ 1.976.358.124	\$ 1.976.358.124
2035	50242,5	\$ 42.145,0	\$ 2.117.470.094	\$ 2.117.470.094

Fuente. Elaboración propia

Es esencial considerar los costos asociados a la materia prima a lo largo del tiempo. La siguiente tabla (Tabla 5), presenta una proyección detallada de los costos anuales de las materias primas necesarias, incluyendo mucílago de café, cáscara de café, levadura y

NaOH, desde el año 2024 hasta el año 2035. Estos costos se basan en precios estimados y cantidades requeridas para mantener una producción constante y eficiente de bioetanol.

Tabla 5. Proyección de Costos de Materia Prima para la Producción de Bioetanol

Cantidad de mucilago (kg/año)	Precio del mucilago de café (COP/kg)	Cascara de café (kg/año)	Precio de la cascara de café (COP/kg)	Costos Mucilago (COP/año)	Cantidad de Levadura (kg/año)	Precio de levadura (COP/kg)	Costos levadura (COP/año)	Costos NAOH	Total costos materia prima (COP/año)
	\$ 500					\$ 25.000			
258216,0	\$ 536	112800	\$ 60.426.960	\$ 138.326.311	2582,2	\$ 26.785	\$ 69.163.156	\$ 180.000.000	\$ 447.916.427
258216,0	\$ 574	112800	\$ 64.741.445	\$ 148.202.810	2582,2	\$ 28.697	\$ 74.101.405	\$ 192.852.000	\$ 479.897.660
258216,0	\$ 615	112800	\$ 69.363.984	\$ 158.784.490	2582,2	\$ 30.746	\$ 79.392.245	\$ 206.621.633	\$ 514.162.353
258216,0	\$ 659	112800	\$ 74.316.573	\$ 170.121.703	2582,2	\$ 32.942	\$ 85.060.852	\$ 221.374.417	\$ 550.873.545
258216,0	\$ 706	112800	\$ 79.622.776	\$ 182.268.393	2582,2	\$ 35.294	\$ 91.134.196	\$ 237.180.551	\$ 590.205.916
258216,0	\$ 756	112800	\$ 85.307.842	\$ 195.282.356	2582,2	\$ 37.814	\$ 97.641.178	\$ 254.115.242	\$ 632.346.618
258216,0	\$ 810	112800	\$ 91.398.822	\$ 209.225.516	2582,2	\$ 40.514	\$ 104.612.758	\$ 272.259.070	\$ 677.496.167
258216,0	\$ 868	112800	\$ 97.924.698	\$ 224.164.218	2582,2	\$ 43.406	\$ 112.082.109	\$ 291.698.368	\$ 725.869.393
258216,0	\$ 930	112800	\$ 104.916.521	\$ 240.169.543	2582,2	\$ 46.506	\$ 120.084.772	\$ 312.525.631	\$ 777.696.467
258216,0	\$ 997	112800	\$ 112.407.561	\$ 257.317.648	2582,2	\$ 49.826	\$ 128.658.824	\$ 334.839.962	\$ 833.223.995
258216,0	\$ 1.068	112800	\$ 120.433.461	\$ 275.690.129	2582,2	\$ 53.384	\$ 137.845.064	\$ 358.747.535	\$ 892.716.189

Fuente. Elaboración propia

En tabla 6 se presenta una proyección de los costos asociados con los servicios y empaques necesarios para la producción de bioetanol a partir del mucílago de café. Esta proyección, incluye detalles sobre el número de empaques requeridos, el costo unitario de los empaques, el consumo de energía y sus costos, los costos del agua, así como el precio anual del arriendo. Esta información es fundamental para evaluar la viabilidad económica del proyecto, identificar posibles áreas de optimización y planificar de manera adecuada los recursos financieros necesarios para sostener la operación a largo plazo.

Tabla 6. Proyección de Costos de Servicios y Empaques para la Producción de Bioetanol

Cantidad de empaques al año	Precio del empaque (COP/uni)	Costos empaques (COP/año)	Consumo de energía (kWh/año)	Precio energía (COP/kWh)	Costos electricidad (COP/año)	Precio base del agua (COP/mes)	Costos agua (COP/año)	Precio anual arriendo (COP)	Total costos servicios (COP/año)	Total costos unitarios (COP/año)
	\$ 500					\$ 600.000		\$ 180.000.000		
50242,5	\$ 536	\$ 26.914.927	13211,57	\$ 1.000	\$ 13.211.570	\$ 642.840	\$ 7.714.080	\$ 192.852.000	\$ 240.692.577	\$ 688.609.004
50242,5	\$ 574	\$ 28.836.653	13211,57	\$ 1.071	\$ 14.154.876	\$ 688.739	\$ 8.264.865	\$ 206.621.633	\$ 257.878.027	\$ 737.775.686
50242,5	\$ 615	\$ 30.895.590	13211,57	\$ 1.148	\$ 15.165.534	\$ 737.915	\$ 8.854.977	\$ 221.374.417	\$ 276.290.518	\$ 790.452.870
50242,5	\$ 659	\$ 33.101.535	13211,57	\$ 1.230	\$ 16.248.353	\$ 790.602	\$ 9.487.222	\$ 237.180.551	\$ 296.017.661	\$ 846.891.205
50242,5	\$ 706	\$ 35.464.984	13211,57	\$ 1.318	\$ 17.408.486	\$ 847.051	\$ 10.164.610	\$ 254.115.242	\$ 317.153.322	\$ 907.359.237
50242,5	\$ 756	\$ 37.997.184	13211,57	\$ 1.412	\$ 18.651.452	\$ 907.530	\$ 10.890.363	\$ 272.259.070	\$ 339.798.069	\$ 972.144.687
50242,5	\$ 810	\$ 40.710.183	13211,57	\$ 1.513	\$ 19.983.165	\$ 972.328	\$ 11.667.935	\$ 291.698.368	\$ 364.059.651	\$ 1.041.555.818
50242,5	\$ 868	\$ 43.616.890	13211,57	\$ 1.621	\$ 21.409.963	\$ 1.041.752	\$ 12.501.025	\$ 312.525.631	\$ 390.053.510	\$ 1.115.922.903
50242,5	\$ 930	\$ 46.731.136	13211,57	\$ 1.736	\$ 22.938.635	\$ 1.116.133	\$ 13.393.598	\$ 334.839.962	\$ 417.903.331	\$ 1.195.599.798
50242,5	\$ 997	\$ 50.067.739	13211,57	\$ 1.860	\$ 24.576.453	\$ 1.195.825	\$ 14.349.901	\$ 358.747.535	\$ 447.741.629	\$ 1.280.965.624
50242,5	\$ 1.068	\$ 53.642.576	13211,57	\$ 1.993	\$ 26.331.212	\$ 1.281.207	\$ 15.374.484	\$ 384.362.109	\$ 479.710.381	\$ 1.372.426.569

Fuente. Elaboración propia

La tabla 7 proporciona una proyección detallada de los costos de mantenimiento y mano de obra, así como el cálculo de los costos fijos y totales asociados con la producción de bioetanol a partir del mucílago de café para el periodo comprendido entre 2024 y 2035. Esta información es fundamental para entender la evolución de los costos operativos a lo largo del tiempo y para la planificación financiera del proyecto. La proyección incluye incrementos anuales en los costos de mantenimiento y mano de obra, reflejando la inflación y el aumento en los salarios, asegurando así una evaluación precisa de la sostenibilidad económica del proyecto.

Tabla 7. Proyección de Costos de Mantenimiento, Mano de Obra y Costos Fijos para la Producción de Bioetanol

Mantenimiento (COP/año)	Mano de obra (COP/año)	Total costos fijos (COP/año)	Total costos (COP/año)
\$ 2.400.000	\$ 240.000.000		
\$ 2.571.360	\$ 257.136.000	\$ 259.707.360	\$ 948.316.364
\$ 2.754.955	\$ 275.495.510	\$ 278.250.466	\$ 1.016.026.152
\$ 2.951.659	\$ 295.165.890	\$ 298.117.549	\$ 1.088.570.419

\$ 3.162.407	\$ 316.240.734	\$ 319.403.142	\$ 1.166.294.347
\$ 3.388.203	\$ 338.820.323	\$ 342.208.526	\$ 1.249.567.763
\$ 3.630.121	\$ 363.012.094	\$ 366.642.215	\$ 1.338.786.902
\$ 3.889.312	\$ 388.931.157	\$ 392.820.469	\$ 1.434.376.287
\$ 4.167.008	\$ 416.700.842	\$ 420.867.850	\$ 1.536.790.753
\$ 4.464.533	\$ 446.453.282	\$ 450.917.815	\$ 1.646.517.613
\$ 4.783.300	\$ 478.330.046	\$ 483.113.347	\$ 1.764.078.971
\$ 5.124.828	\$ 512.482.812	\$ 517.607.640	\$ 1.890.034.209

Fuente. Elaboración propia

La siguiente tabla (Tabla 8) ofrece una proyección detallada de las utilidades reales antes de impuestos, la depreciación anual, la depreciación acumulada, el valor en libros al final y al inicio del año, así como el valor en libros del patrimonio durante el periodo 2024-2035. Esta información es importante para evaluar la rentabilidad y el desempeño financiero del proyecto de producción de bioetanol a partir de mucílago de café. La tabla refleja cómo la depreciación acumulada afecta el valor en libros del patrimonio y cómo las utilidades reales evolucionan a lo largo del tiempo, proporcionando una visión integral de la viabilidad financiera y la gestión de activos a largo plazo.

Tabla 8. Proyección de Utilidades, Depreciación y Valor en Libros del patrimonio

Utilidades reales antes de impuestos (COP/año)	Depreciación (COP/año)	Depreciación Acumulada (COP/año)	VLIw (COP/año)	Valor en libros patrimonio (COP/año)
			\$ 60.000.000	
\$ 114.114.956	\$ 60.000.000	\$ 60.000.000	\$ 64.284.000	\$ 484.284.000
\$ 122.262.764	\$ 60.000.000	\$ 120.000.000	\$ 68.873.878	\$ 428.873.878
\$ 130.992.325	\$ 60.000.000	\$ 180.000.000	\$ 73.791.472	\$ 373.791.472
\$ 140.345.177	\$ 60.000.000	\$ 240.000.000	\$ 79.060.184	\$ 319.060.184
\$ 150.365.823	\$ 60.000.000	\$ 300.000.000	\$ 84.705.081	\$ 264.705.081
\$ 161.101.943	\$ 60.000.000	\$ 360.000.000	\$ 90.753.023	\$ 210.753.023
\$ 172.604.622	\$ 60.000.000	\$ 420.000.000	\$ 97.232.789	\$ 157.232.789
\$ 184.928.592	\$ 60.000.000	\$ 480.000.000	\$ 104.175.210	\$ 104.175.210
\$ 198.132.493	\$ 60.000.000	\$ 540.000.000	\$ 111.613.321	\$ 51.613.321
\$ 212.279.153	\$ 60.000.000	\$ 600.000.000	\$ 119.582.512	-\$ 417.488
\$ 227.435.884	\$ 60.000.000	\$ 660.000.000	\$ 128.120.703	-\$ 51.879.297

Fuente. Elaboración propia

El análisis financiero del proyecto incluye la evaluación del Valor Presente Neto (VPN) acumulado a lo largo de varios años. El VPN es una medida que permite determinar la viabilidad y rentabilidad de un proyecto, considerando los flujos de caja futuros descontados a una tasa específica. En este caso, la Tasa Interna de Retorno (TIR) es del 9%, lo cual refleja la tasa de descuento implícita que iguala el valor presente de los flujos de caja futuros con la inversión inicial. La siguiente tabla muestra el VPN anual y su acumulado a lo largo de los años del proyecto.

Tabla 9. Valor Presente Neto (VPN) Acumulado

Valor presente neto (COP/año)	VPN Acumulado
-\$ 14.980.377	-\$ 14.980.377
-\$ 19.181.386	-\$ 34.161.763
-\$ 14.162.564	-\$ 48.324.327
-\$ 1.296.169	-\$ 49.620.496
\$ 18.211.840	-\$ 31.408.656
\$ 43.303.093	\$ 11.894.437
\$ 73.050.118	\$ 84.944.555
\$ 106.641.461	\$ 191.586.016
\$ 143.368.423	\$ 334.954.439
\$ 182.613.252	\$ 517.567.690
\$ 223.838.618	\$ 741.406.308

Fuente. Elaboración propia

El análisis del Valor Presente Neto (VPN) acumulado a lo largo de los años revela una tendencia significativa hacia la rentabilidad del proyecto después de los primeros años de pérdidas. A pesar de los valores negativos iniciales, el proyecto comienza a generar un VPN positivo a partir del quinto año, indicando una recuperación y crecimiento sostenido.

La Tasa Interna de Retorno (TIR) del 9% sugiere que el proyecto tiene una rentabilidad moderada. En general, aunque el proyecto muestra pérdidas en los primeros años, la tendencia positiva a partir del quinto año y la TIR del 9% indican un potencial de

crecimiento y rentabilidad a largo plazo, aunque se requerirán ajustes y optimizaciones para mejorar la recuperación de la inversión inicial.

10. Análisis de resultados

10.1 Relaciones y conceptos teóricos utilizados en la práctica de laboratorio N°1:

Para realizar la práctica de laboratorio, es importante tener en cuenta las relaciones y fundamentos teóricos pertinentes para determinar las cantidades necesarias de materiales y los equipos requeridos en la experimentación. Las descripciones matemáticas que se presentan a continuación pueden variar o diferir de la teoría expuesta en secciones previas del documento. Esto se lleva a cabo con el propósito de explorar diversas condiciones y cantidades, con el fin último de optimizar al máximo el rendimiento del proceso.

10.1.1 Materiales y equipos

A continuación, se detallan los materiales, equipos y reactivos utilizados en el laboratorio:

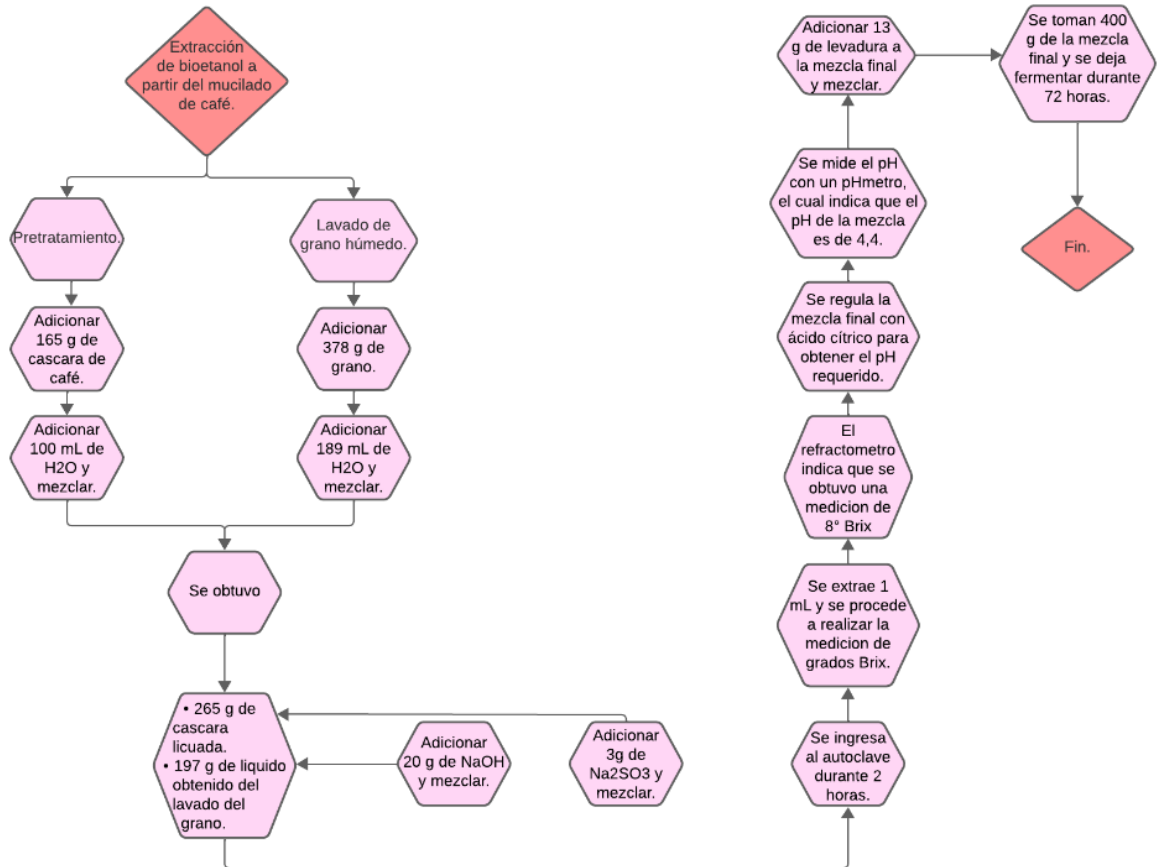
Tabla 4. Materiales, equipos y reactivos.

Materiales	Equipos	Reactivos
Cajas petri	Autoclave	Hidróxido de sodio (NaOH)
Botella oscura 1L	Plancha de calentamiento y agitación	Sulfito de sodio (Na ₂ SO ₃)
Papel filtro y embudo Büchner	Balanza analítica	Agua destilada
Probetas, matraces y pipetas	Refractómetro y potenciómetro	Mucílago de café
Airlocks	Bomba de vacío	Levadura activa seca
Agitadores y vara magnética	Molino (licuadora)	Ácido clorhídrico

Fuente. Elaboración propia

10.1.2 Diagrama de proceso de pretratamiento

Figura 3. Diagrama de proceso de pretratamiento



Fuente. Elaboración propia

10.1.3 Homogenización de la cascara:

Figura 4. Cascara licuada



Fuente. Elaboración propia.

- ❖ Cantidad de agua para homogenización de la cáscara:

50% la masa de la cáscara (Densidad del agua en Bogotá a temperatura ambiente: 0,998 g/ml) Dato experimental propio.

$$Cantidad\ agua\ (ml) = \frac{Masa\ de\ la\ cascara * 0,5}{densidad\ del\ agua} \quad (1)$$

- ❖ El valor utilizado en la práctica fue de 100 ml de agua tras evidenciar dificultades para moler la cascara con el nivel de agua inicial (82 ml)

10.1.4 Lavado de grano húmedo:

Figura 5. Grano húmedo separado después de lavado



Fuente. Elaboración propia.

- ❖ Cantidad de agua para lavado de grano húmedo:

50% la masa del grano

$$Cantidad\ agua\ (ml) = \frac{Masa\ del\ grano * 0,5}{densidad\ del\ agua} \quad (2)$$

- ❖ Densidad del líquido obtenido y su composición teórica:

Después de emplear el picnómetro para determinar la densidad precisa del líquido, se aplica el método de regresión lineal utilizando la siguiente información

Tabla 5. Porcentaje mucilago vs densidad del líquido obtenido tras lavado

Densidad del líquido obtenido (g/ml)	% mucilago
1,1	100%
1,0898	90%
1,0796	80%
1,0694	70%
1,0592	60%
1,049	50%
1,0388	40%
1,0286	30%
1,0184	20%
1,0082	10%
0,998	0%

Fuente. Elaboración propia.

10.1.5 Hidrólisis alcalina:

- ❖ Cantidad de hidróxido de sodio:

37,5 g de NaOH (98% pureza) por cada 1000 g de cascara + grano húmedo usado.

$$Cantidad\ NaOH\ (g) = \frac{(Masa\ grano + Masa\ cascara) * 37,5}{1000} \quad (3)$$

- ❖ Cantidad de sulfito de sodio:

7,5 g de Na₂SO₃ (98% pureza) por cada 1000 ml de agua utilizado en homogeneización de cascara y lavado del grano.

$$Cantidad\ Na_2SO_3\ (g) = \frac{(Vol\ de\ agua\ cascara + Vol\ agua\ grano) * 7,5}{1000} \quad (4)$$

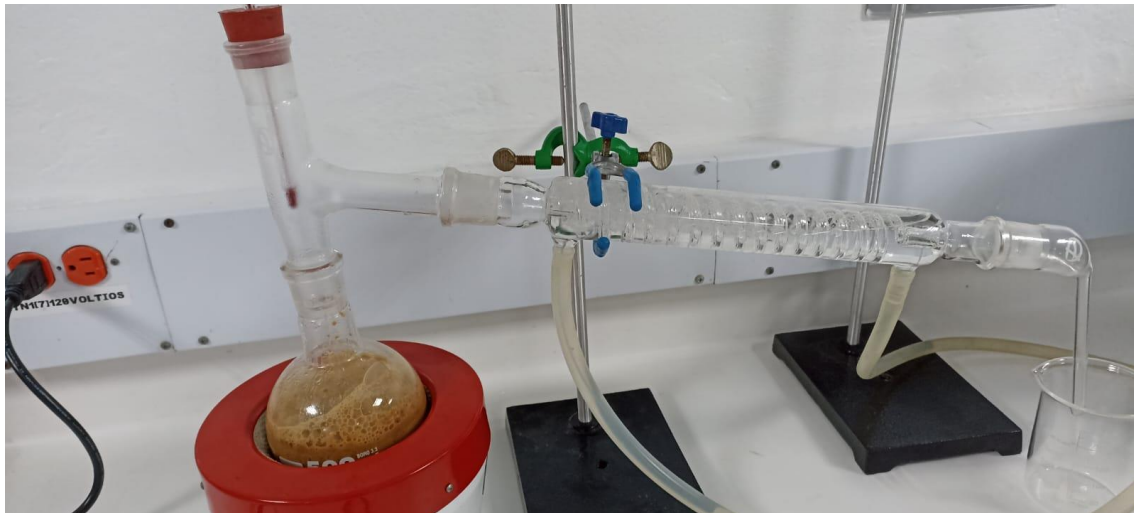
- ❖ Cantidad de levadura:

25 g por cada 1000 g de cascara + grano húmedo usado.

$$Cantidad\ Levadura\ (g) = \frac{(Masa\ grano + Masa\ cascara) * 25}{1000} \quad (5)$$

10.1.6 Destilación simple:

Figura 6. Montaje de destilación simple.



Fuente. Elaboración propia.

La destilación simple del etanol a partir del mucílago de café implica calentar el mucílago en un matraz de destilación bajo condiciones controladas de temperatura, manteniéndola entre 75°C y 80°C. El vapor generado se conduce a través de un tubo refrigerante, donde se condensa, obteniendo un destilado compuesto principalmente de etanol y agua. La temperatura se controla con un termómetro y se ajusta la fuente de calor según sea necesario. Una vez recolectado el destilado deseado, se detiene el calentamiento y se almacena adecuadamente.

Para determinar la cantidad de alcohol utilizando la densidad, se emplea el Picnómetro para obtener una densidad precisa del destilado, luego se utiliza el método de regresión lineal con la siguiente información:

Tabla 6. Porcentaje etanol vs densidad del destilado

Densidad del destilado (g/ml)	% etanol
0,998	0%
0,9771	10%
0,9562	20%
0,9353	30%

0,9144	40%
0,8935	50%
0,8726	60%
0,8517	70%
0,8308	80%
0,8099	90%
0,789	100%

Fuente. Elaboración propia.

10.1.7 Resultados numéricos de la práctica

A continuación, se presentan los resultados numéricos obtenidos durante la práctica de laboratorio, los cuales detallan las cantidades de materia prima y los valores medidos en diferentes etapas del proceso experimental. Estas tablas ofrecen una visión cuantitativa de las etapas clave, desde la preparación inicial de las materias primas hasta la determinación de las características del líquido obtenido después del lavado del grano.

- La tabla 7 muestra las cantidades iniciales de materia prima utilizadas en el experimento, específicamente la cantidad de café en grano, cáscara y grano con mucílago.

Tabla 7. Cantidades iniciales de materia prima

Cantidades iniciales	
Variable	Valor
Cantidad de café en grano (g)	709,5
Cascara (g)	331
Grano con mucilago (g)	378,5

- En esta etapa, se detalla la cantidad de grano con mucílago, el agua utilizada para el lavado, y la masa total de la mezcla resultante.

Tabla 8. Cantidades iniciales del lavado del grano

Lavado de grano	
Grano con mucilago (g)	378,5
Agua utilizada (ml)	189,6
Masa mezcla (g)	567,8

Fuente. Elaboración propia.

- La tabla 9 proporciona las cantidades resultantes después del lavado del grano, diferenciando entre la masa del grano lavado y la masa del líquido.

Tabla 9. Cantidades después del lavado del grano

Separación	
Masa grano lavado (g)	367,145
Masa del líquido (g)	200,6
Total (g)	567,8

Fuente. Elaboración propia.

- Aquí se presenta la densidad del líquido obtenido post-lavado, utilizando un picnómetro, junto con su composición teórica en términos de porcentaje y masa de mucílago y agua.

Tabla 10. Densidad del líquido obtenido después de lavado del grano y su composición teórica

Densidad mezcla líquida	
Masa muestra picnómetro (g)	5,054
Volumen picnómetro (ml)	4,931
Densidad del líquido (g/ml)	1,0249
Composición del líquido (teórica)	
Porcentaje Mucilago (%m)	26,42%
Masa mucilago (g)	52,99
Masa agua (g)	147,61
Total (g)	200,61

Fuente. Elaboración propia.

- Esta tabla (Tabla 11), detalla las cantidades iniciales de cáscara y agua adicional utilizadas durante la homogenización de la cáscara.

Tabla 11. Cantidades iniciales en la homogenización de la cascara

Cáscara	
Cascara (g)	166,7
Agua adicional (ml)	83,5
Total (g)	250

Fuente. Elaboración propia.

Las siguientes tablas presentan las estimaciones teóricas y los resultados experimentales relacionados con la producción de alcohol a partir del lavado de grano y la cáscara, así como los resultados obtenidos en el proceso de destilación. Estas tablas proporcionan una visión detallada de los cálculos teóricos y los datos experimentales que respaldan el análisis del proceso de fermentación y destilación, fundamentales para la producción de alcohol.

- Esta tabla muestra las estimaciones teóricas de la cantidad de alcohol producido a partir del lavado de grano y la cáscara. Los cálculos incluyen la cantidad de azúcares fermentables, el porcentaje de fermentación, y la cantidad resultante de etanol puro y de 70% pureza.

Tabla 12. Estimaciones teóricas para determinar la cantidad de alcohol producido

Estimación (teórica) a partir del lavado		Estimación (teórica) a partir de la cáscara	
Grados brix	7	Grados brix	7
Masa mezcla (g)	200,61	Masa mezcla (g)	250
Cantidad de azúcares fermentables (g)	14,04	Cantidad de azúcares fermentables (g)	17,51
Porcentaje de fermentación	70%	Porcentaje de fermentación	70%
Peso molecular glucosa (g/mol)	180,15	Peso molecular glucosa (g/mol)	180,15
Moles azúcares	0,0779	Moles azúcares	0,0972
Reacción		Reacción	
Moles azúcar	0,02338443	Moles azúcar	0,029153893
Moles etanol	0,109127338	Moles etanol	0,136051499
Moles CO ₂	0,109127338	Moles CO ₂	0,136051499
Peso molecular etanol (g/mol)	46	Peso molecular etanol (g/mol)	46
Cantidad de etanol puro (g)	5,02	Cantidad de etanol puro (g)	6,26
Cantidad etanol 70% pureza (g)	7,17	Cantidad etanol 70% pureza (g)	8,94

Fuente. Elaboración propia.

- La tabla 13 presenta los resultados obtenidos tras el proceso de destilación, incluyendo la masa inicial, el rango de temperatura, el tiempo, el volumen y la densidad del destilado, y la composición teórica del destilado en términos de porcentaje de agua y masa de alcohol.

10.1.8 Resultados destilación

Tabla 13. Resultados y estimaciones post destilación

Destilación	
Masa inicial (g)	400
Rango de temperatura (°C)	75-85
Tiempo (h)	0,75
Volumen destilado (ml)	20
Densidad del destilado (g/ml)	0,9966
Masa del destilado (g)	19,93
Composición del destilado (teórica)	
Porcentaje Agua (%m)	99,31%
Masa Agua (g)	19,79
Masa alcohol (g)	0,14
Total (g)	19,93

Fuente. Elaboración propia.

10.2 Relaciones y conceptos teóricos utilizados en la práctica de laboratorio N°2:

10.2.1 Homogenización de la cascara:

- ❖ Cantidad de agua para homogenización de la cáscara:

200% la masa de la cáscara (Densidad del agua en Bogotá a temperatura ambiente:

0,998 g/ml) Dato experimental propio.

$$Cantidad\ agua\ (ml) = \frac{Masa\ de\ la\ cascara * 2}{densidad\ del\ agua} \quad (6)$$

10.2.2 Lavado de grano húmedo:

- ❖ Cantidad de agua para lavado de grano húmedo: 200% la masa del grano

$$Cantidad\ agua\ (ml) = \frac{Masa\ del\ grano * 2}{densidad\ del\ agua} \quad (7)$$

- ❖ Densidad del líquido obtenido y su composición teórica:

Después de emplear el picnómetro para determinar la densidad precisa del líquido,

se aplica el método de regresión lineal utilizando la siguiente información

Tabla 14. Porcentaje mucilago vs densidad del líquido obtenido tras lavado

Densidad del líquido obtenido (g/ml)	% mucilago
1,1	100%
1,0898	90%
1,0796	80%
1,0694	70%
1,0592	60%
1,049	50%
1,0388	40%
1,0286	30%
1,0184	20%
1,0082	10%
0,998	0%

Fuente. Elaboración propia.

10.2.3 Hidrólisis alcalina:

- ❖ Cantidad de hidróxido de sodio:

37,5 g de NaOH (98% pureza) por cada 1000 g de cascara + grano húmedo usado.

$$Cantidad\ NaOH\ (g) = \frac{(Masa\ grano + Masa\ cascara) * 37,5}{1000} \quad (3)$$

- ❖ Cantidad de sulfito de sodio:

7,5 g de Na₂SO₃ (98% pureza) por cada 1000 ml de agua utilizado en homogeneización de cascara y lavado del grano.

$$Cantidad\ Na_2SO_3\ (g) = \frac{(Vol\ de\ agua\ cascara + Vol\ agua\ grano) * 7,5}{1000} \quad (4)$$

- ❖ Cantidad de levadura:

25 g por cada 1000 g de cascara + grano húmedo usado.

$$Cantidad\ Levadura\ (g) = \frac{(Masa\ grano + Masa\ cascara) * 25}{1000} \quad (5)$$

- La tabla 15 muestra la relación entre la densidad del destilado y el porcentaje de etanol. Este dato es crucial para determinar la concentración de etanol en el destilado, lo cual es fundamental para evaluar la eficiencia del proceso de destilación

Tabla 15. Porcentaje etanol vs densidad del destilado

Densidad del destilado (g/ml)	% etanol
0,998	0%
0,9771	10%
0,9562	20%
0,9353	30%
0,9144	40%
0,8935	50%
0,8726	60%
0,8517	70%
0,8308	80%
0,8099	90%
0,789	100%

Fuente. Elaboración propia.

10.2.4 Resultados numéricos de la práctica

- La tabla 16 detalla las cantidades iniciales de materia prima utilizadas en el experimento. Se incluyen los valores del café en grano, la cáscara y el grano con mucílago.

Tabla 16. Cantidades iniciales de materia prima

Cantidades iniciales	
Variable	Valor
Cantidad de café en grano (g)	1001
Cascara (g)	470,47
Grano con mucilago (g)	530,53

Fuente. Elaboración propia.

- En la tabla 17 se muestran las cantidades iniciales del lavado del grano, incluyendo la masa del grano con mucílago y la cantidad de agua utilizada en el proceso.

Tabla 17. Cantidades iniciales del lavado del grano

Lavado de grano	
Grano con mucilago (g)	530,53
Agua utilizada (ml)	1063,2
Masa mezcla (g)	1591,6

Fuente. Elaboración propia.

- La tabla 18 presenta los valores obtenidos después del lavado del grano, incluyendo la masa del grano lavado y la masa del líquido resultante.

Tabla 18. Cantidades después del lavado del grano

Separación	
Masa grano lavado (g)	514,6141
Masa del líquido (g)	1077,0
Total (g)	1591,6

Fuente. Elaboración propia.

- Esta tabla detalla la densidad del líquido obtenido tras el lavado del grano y su composición teórica en términos de masa de mucílago y agua.

Tabla 19. Densidad del líquido obtenido después de lavado del grano y su composición teórica

Densidad mezcla líquida	
Masa muestra picnómetro (g)	5,035
Volumen picnómetro (ml)	4,931
Densidad del líquido (g/ml)	1,0211
Composición del líquido (teórica)	
Porcentaje Mucilago (%m)	22,64%
Masa mucilago (g)	243,81
Masa agua (g)	833,17
Total (g)	1077,0

Fuente. Elaboración propia.

- Esta tabla (Tabla 20), muestra las cantidades iniciales utilizadas en la homogenización de la cáscara, incluyendo la masa de la cáscara y el agua adicional.

Tabla 20. Cantidades iniciales en la homogenización de la cascara

Cáscara	
Cascara (g)	470,5
Agua adicional (ml)	942,8
Total (g)	1411

Fuente. Elaboración propia.

- En la tabla 21 se presentan las estimaciones teóricas de la cantidad de alcohol producido a partir del lavado del grano y de la cáscara. Se incluyen datos como los grados Brix, la masa de la mezcla, la cantidad de azúcares fermentables y la cantidad de etanol puro y de 70% pureza.

Tabla 21. Estimaciones teóricas para determinar la cantidad de alcohol producido

Estimación (teórica) a partir del lavado		Estimación (teórica) a partir de la cáscara	
Grados brix	11	Grados brix	12
Masa mezcla (g)	1077,0	Masa mezcla (g)	1411
Cantidad de azúcares fermentables (g)	118,47	Cantidad de azúcares fermentables (g)	169,37
Porcentaje de fermentación	70%	Porcentaje de fermentación	70%
Peso molecular glucosa (g/mol)	180,15	Peso molecular glucosa (g/mol)	180,15
Moles azúcares	0,6576	Moles azúcares	0,9402
Reacción		Reacción	
Moles azúcar	0,197281181	Moles azúcar	0,282046961
Moles etanol	0,92064551	Moles etanol	1,316219151
Moles CO ₂	0,92064551	Moles CO ₂	1,316219151
Peso molecular etanol (g/mol)	46	Peso molecular etanol (g/mol)	46
Cantidad de etanol puro (g)	42,35	Cantidad de etanol puro (g)	60,55
Cantidad etanol 70% pureza (g)	60,50	Cantidad etanol 70% pureza (g)	86,49

Fuente. Elaboración propia.

10.2.5 Resultados destilación

- La tabla 22 resume los resultados y las estimaciones obtenidas después del proceso de destilación, incluyendo la masa inicial, el rango de temperatura, el tiempo, el volumen destilado y la composición teórica del destilado.

Tabla 22. Resultados y estimaciones post destilación

Destilación	
Masa inicial (g)	2488,4
Rango de temperatura (°C)	75-85
Tiempo (h)	3
Volumen destilado (ml)	99,535436
Densidad del destilado (g/ml)	0,8517
Masa del destilado (g)	84,77
Composición del destilado (teórica)	
Porcentaje Agua (%m)	70,00%
Masa Agua (g)	59,34
Masa alcohol (g)	25,43
Total (g)	84,77

Fuente. Elaboración propia.

11. Análisis de resultados laboratorio N°1

La práctica de laboratorio demostró que la homogeneización de la cáscara y el lavado del grano fueron efectivos, aunque se usó más agua de la inicialmente calculada para garantizar la eficiencia del proceso, lo que resalta la necesidad de ajustes prácticos frente a los valores teóricos. La densidad del líquido post-lavado fue de 1,0249 g/ml, resultando en una composición teórica del 26,42% de mucílago, crucial para determinar la cantidad de azúcares fermentables. En la hidrólisis alcalina, se emplearon las cantidades necesarias de NaOH y Na₂SO₃, y se agregó la levadura según lo calculado, asegurando condiciones óptimas para la fermentación. Las estimaciones teóricas predijeron la producción de etanol con una pureza del 70%, pero los resultados post-destilación indicaron una baja concentración de etanol (0,14 g), sugiriendo una menor eficiencia de la esperada en esta fase, probablemente debido a pérdidas durante la transferencia y destilación. En general, los resultados sugieren áreas de mejora, especialmente en la destilación y la eficiencia de conversión de azúcares a etanol. La comparación de los datos teóricos y experimentales permitió identificar desviaciones y ajustar parámetros para maximizar la producción de

bioetanol, proporcionando una base sólida para futuras investigaciones y escalamiento del proceso.

Para proporcionar una evaluación detallada y focalizada de los resultados obtenidos en el proceso de producción de etanol a partir de mucílago de café, se ha optado por dividir el análisis en secciones, destacando y abordando con mayor énfasis cada aspecto relevante del procedimiento como se muestra a continuación:

11.1 Cantidad de agua utilizada:

Las cantidades de agua empleadas tanto para el lavado del grano húmedo como para la homogeneización de la cáscara pueden ser insuficientes para crear un medio acuoso óptimo para la fermentación. Por lo tanto, se propone ajustar las proporciones a 1 litro de agua por cada 500 g de cáscara y 1 litro de agua por cada 500 g de grano húmedo, respectivamente.

11.2 Cantidad y preparación de reactivos en la Hidrólisis:

Luego de observar un bajo incremento en los grados brix luego de la hidrólisis (de 5,5 a 7), se sugieren modificaciones en las cantidades y el procedimiento de preparación de los reactivos:

- Para la cáscara, se recomienda preparar 1000 ml de solución de NaOH 1M por cada 1000 g de cáscara, añadiéndola a la mezcla de cáscara después de su preparación.
- Para el líquido obtenido del lavado del grano, se aconseja preparar 500 ml de solución de NaOH 1M por cada 1000 g de grano, y luego agregarla al líquido.

11.3 Tiempo en Autoclave:

Se sugiere aumentar el tiempo en la autoclave de 2 a 3 horas, dentro de un rango de temperatura de 100 a 125°C, para mejorar la eficiencia del proceso.

11.4 Tiempo y condiciones de Fermentación:

Es necesario mejorar las condiciones de temperatura y protección contra la luz, manteniendo la fermentación en un rango de 20 a 25°C y prolongándola durante 5 días para obtener mejores resultados.

11.5 Porcentaje de Alcohol obtenido en la Destilación:

El análisis de densidades reveló que después de la destilación, solo se obtuvo un líquido de 20 g, de los cuales aproximadamente 0,14 g corresponden a alcohol. Estos resultados confirman la existencia de deficiencias en el procedimiento en general.

12. Análisis comparativo de los laboratorios 1 y 2

En esta sección se presenta un análisis comparativo de los resultados obtenidos en los Laboratorios 1 y 2, con el fin de evaluar las diferencias y similitudes en los procesos y los resultados de producción y destilación de etanol.

12.1 Homogenización de la Cáscara

En el laboratorio N°1, se determinó que la homogeneización de la cáscara y el lavado del grano fueron efectivos, aunque se utilizó más agua de la inicialmente calculada para asegurar la eficiencia del proceso. Se usaron 100 ml de agua frente a los 82 ml teóricos para lograr una correcta homogenización. Sin embargo, en el laboratorio N°2, se empleó una proporción de agua mucho mayor, equivalente al 200% de la masa de la cáscara, lo que facilitó la homogenización y probablemente mejoró la extracción de componentes deseados.

12.2 Lavado del Grano Húmedo

En el laboratorio N°1, el agua utilizada para el lavado del grano fue el 50% de la masa del grano, mientras que en el laboratorio N°2, esta cantidad fue del 200%. El aumento de agua en el laboratorio N°2 permitió un lavado más exhaustivo del mucílago,

lo que se reflejó en una menor densidad del líquido obtenido (1,0211 g/ml frente a 1,0249 g/ml en el laboratorio N°1) y una menor concentración de mucílago (22,64% frente a 26,42% en el laboratorio N°1).

12.3 Hidrólisis Alcalina

En el laboratorio N°1, se siguieron los cálculos teóricos para la adición de NaOH y Na₂SO₃, resultando en un incremento moderado en los grados Brix (de 5,5 a 7). En el laboratorio N°2, se realizaron modificaciones en las cantidades y el procedimiento de preparación de los reactivos. Para la cáscara, se prepararon 1000 ml de solución de NaOH 1M por cada 1000 g de cáscara, y para el líquido obtenido del lavado del grano, se prepararon 500 ml de solución de NaOH 1M por cada 1000 g de grano. Estas modificaciones resultaron en un incremento más significativo en los grados Brix, alcanzando un valor de 12, lo cual indica una mayor cantidad de azúcares fermentables disponibles para la fermentación.

12.4 Resultados de Destilación

Los resultados de destilación también mostraron diferencias significativas. En el laboratorio N°1, se obtuvo un destilado con una baja concentración de etanol, mientras que en el laboratorio N°2, la masa inicial fue considerablemente mayor y se logró una mayor concentración de alcohol en el destilado (70% de alcohol). Este resultado sugiere una optimización del proceso en el laboratorio N°2, incluyendo un mayor volumen inicial de material y posiblemente mejores condiciones de destilación.

12.5 Evaluación Global y Propuestas de Mejora

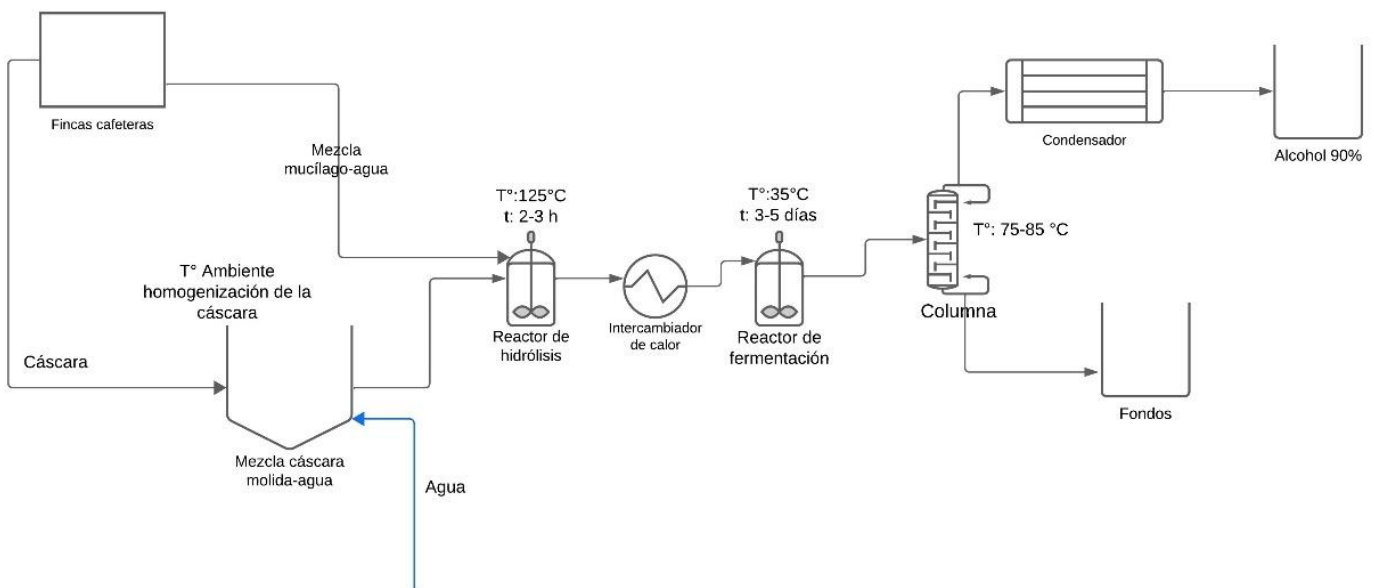
El análisis global del laboratorio N°1 sugiere la necesidad de varios ajustes para mejorar la eficiencia del proceso. Se recomendó aumentar la cantidad de agua utilizada para la homogenización y el lavado, así como ajustar las cantidades y procedimientos de los reactivos en la hidrólisis. También se propuso aumentar el tiempo de autoclave y mejorar

las condiciones de fermentación. En comparación, el laboratorio N°2 mostró una aplicación efectiva de estas modificaciones, resultando en una mayor producción de etanol y eficiencia del proceso en general.

13. Análisis teórico a escala piloto

13.1 Diagrama de proceso

Figura 7. Diagrama de proceso



Fuente. Elaboración propia

El proceso para la producción de alcohol a partir de residuos de café implica varias etapas clave que incluyen la mezcla de mucílago y agua, la mezcla de cáscara molida y agua, la hidrólisis, la fermentación y finalmente la destilación. A continuación, se presenta un análisis detallado de cada una de estas etapas basado en los datos anuales proporcionados.

13.1 Mezcla mucílago-agua (anual)

Componentes:

- Agua: 199,760 kg
- Mucílago puro: 58,456 kg

- Total: 258,216 kg

En esta etapa, se combina mucílago puro, un subproducto del procesamiento del café, con agua. El mucílago es rico en azúcares que serán cruciales para las etapas posteriores de fermentación.

13.2 Mezcla cáscara molida-agua (anual)

Componentes:

- Agua: 225,600 kg
- Cáscara: 112,800 kg
- Total: 338,400 kg

En esta etapa, la cáscara de café, otra fracción de los residuos del café se mezcla con agua. Este paso facilita la manipulación y posterior procesamiento de la cáscara.

13.3 Reactor de hidrólisis (anual)

Componentes:

- Agua: 425,360 kg
- Cáscara: 112,800 kg
- Mucílago puro: 58,456 kg
- NaOH: 1,200 kg
- Total: 597,816 kg

La mezcla de cáscara molida y agua, junto con el mucílago y una adición de NaOH, se somete a hidrólisis. Esta etapa se lleva a cabo a 125°C durante 2-3 horas, descomponiendo los componentes complejos en azúcares más simples, que son necesarios para la fermentación.

13.4 Reactor de fermentación (anual)

Componentes:

- Agua: 425,360 kg
- Cáscara: 112,800 kg
- Mucílago puro: 58,456 kg
- NaOH: 1,200 kg
- Levadura: 2,582 kg
- Total: 600,398 kg

En esta etapa, la mezcla resultante de la hidrólisis se fermenta a 35°C durante 3-5 días utilizando levadura. La fermentación convierte los azúcares en alcohol y otros subproductos.

13.5 Destilación

Componentes del Destilado:

- Alcohol: 36,430.62 kg
- Agua: 4,069.38 kg
- Total Destilado: 40,500 kg

Componentes de los Fondos:

- Agua: 421,290.93 kg
- Orgánicos: 134,825 kg
- NaOH: 1,200 kg
- Total Fondos: 559,898 kg

La mezcla fermentada se destila, separando el alcohol del resto de los componentes. El destilado contiene principalmente alcohol y una pequeña cantidad de agua. Los fondos de la destilación contienen agua, materiales orgánicos no fermentables y restos de NaOH.

14. Conclusiones

El proceso de hidrólisis alcalina ha demostrado ser una estrategia efectiva para convertir el mucílago de café en azúcares fermentables, lo que representa un avance significativo en la valorización de este residuo. Sin embargo, se identificaron áreas de mejora, especialmente en las cantidades de reactivos utilizados. Ajustes en la preparación de la solución de NaOH podrían aumentar la cantidad de azúcares disponibles para la fermentación. Además, se observó que la cantidad de agua empleada en la homogeneización de la cáscara y el lavado del grano húmedo fue mayor de lo calculado inicialmente, sugiriendo la necesidad de ajustar las proporciones para optimizar el proceso. Respecto a la destilación, se evidenció una baja eficiencia en la obtención de etanol puro, lo que subraya la importancia de revisar y mejorar las condiciones y equipos utilizados en esta etapa.

El análisis económico realizado permitió identificar los costos asociados al proceso y evaluar su viabilidad financiera, aspecto crucial para considerar la escalabilidad y sostenibilidad del proyecto a nivel industrial. A pesar de los desafíos identificados, el desarrollo de este proceso de producción de bioetanol a partir de mucílago de café representa una alternativa prometedora y sostenible para la valorización de este residuo. Los resultados obtenidos demuestran su potencial, aunque requiere ajustes y mejoras para maximizar su eficiencia y viabilidad económica.

En cuanto a la viabilidad del proyecto, los análisis económicos indican que, con una tasa de interna de retorno del 9%, sigue siendo económicamente viable. Además, los impactos ambientales son mínimos en comparación con los beneficios para las fuentes hídricas locales, respaldando su sostenibilidad. A nivel social, se espera una mejora en la calidad de vida de las comunidades cercanas a las fincas cafeteras y a las fuentes hídricas donde se vierte el mucílago.

Finalmente, este estudio resalta la factibilidad técnica, económica y ambiental de la producción de bioetanol a partir del mucílago de café, enfatizando su potencial como una alternativa sostenible en el mercado colombiano y la necesidad de seguir investigando e innovando en este campo. Los resultados obtenidos son prometedores y sugieren que el proceso puede ser perfeccionado en el futuro, lo que abre oportunidades de investigación y desarrollo en el área de biocombustibles.

15. Recomendaciones

Se sugieren una serie de recomendaciones para investigaciones futuras similares. En primer lugar, es fundamental realizar un proceso de pretratamiento para descomponer las moléculas de lignocelulosa y celulosa presentes en el mucílago de café, lo que facilitaría el crecimiento de la levadura y aumentaría la cantidad de azúcares disponibles. Además, se recomienda analizar el efecto de la temperatura en el proceso de destilación, ya que se observaron indicios de que podría influir en la obtención de bioetanol. Asimismo, sería beneficioso evaluar la eficiencia de diferentes tipos de pretratamiento de materiales lignocelulósicos, como la hidrólisis enzimática, para identificar métodos más viables.

Para mejorar la eficiencia del proceso, se recomienda aumentar el tiempo de autoclave y mejorar la preparación de los reactivos, como preparar 1000 ml de solución de NaOH 1M por cada 1000 g de cáscara y 500 ml por cada 1000 g de grano, lo que aumentaría los azúcares fermentables. Además, mantener la fermentación en un rango de temperatura de 20 a 25°C y prolongarla durante 5 días podría mejorar la producción de etanol. Para escalar el proceso, se sugiere realizar un análisis teórico a escala piloto, considerando los ajustes realizados en el laboratorio y su impacto en la producción a gran escala. Es importante invertir en equipos y tecnologías que mejoren la eficiencia del proceso de

destilación y fermentación, como destiladores más eficientes y sistemas de control de temperatura y luz durante la fermentación.

Además, se propone llevar a cabo estudios adicionales sobre el impacto económico y social de la implementación de la producción de bioetanol a partir del mucílago de café en las comunidades cafetaleras, para asegurar beneficios a largo plazo y la creación de empleo. Estas recomendaciones podrían contribuir significativamente a optimizar el proceso y maximizar sus beneficios económicos y sociales.

Referencias bibliográficas

Arango Acevedo, H. G., & Zapata Velez, J. A. (2014). MANEJO DE RESIDUOS SÓLIDOS PRODUCIDOS AL TRANSFORMAR CAFÉ CEREZA A PERGAMINO SECO.

Benavides Machado, P., Gil-Palacio, Z., Constantino, L. M., Villegas García, C., & Giraldo-Jaramillo, M. (2013). Plagas del café: Broca, minador, cochinillas harinosas, arañita roja y monalunion. En Federación Nacional de Cafeteros de Colombia, Manual del cafetero colombiano: Investigación y tecnología para la sostenibilidad de la caficultura (Vol. 2, pp. 215–260). Cenicafé. https://doi.org/10.38141/cenbook0026_24

Castillo, N. V., Duran, Y. M. V., Rosero, J. J., & Pardo, L. M. F. (s/f). Optimización de la hidrólisis enzimática de la fracción sólida del mucílago de café. Nuevo Panorama de la Ciencia, la Tecnología y la Innovación.

Cenicafé. (2009). COMPOSICIÓN QUÍMICA DEL MUCÍLAGO DE CAFÉ, SEGÚN EL TIEMPO DE FERMENTACIÓN Y REFRIGERACIÓN.

Díaz, J. A., & Ríos, A. (2010). Aprovechamiento del mucilago de café para la producción de bioetanol. Cenicafé, 61(1), 1-12.

Enciclopedia de la Química. (2023). Fermentación alcohólica. Recuperado de https://www.quimica.es/enciclopedia/Fermentaci%C3%B3n_alcoh%C3%B3lica.html

Estadísticas de producción de café en Colombia 2022. (s/f). lattenda-co. Recuperado el 25 de agosto de 2023, de <https://latiendadelcafe.co/blogs/cafe-colombiano/estadisticas-de-produccion-de-cafe-en-colombia-2022>

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. <https://doi.org/10.22507/pml.v15n1a7>

Funes, C. M. R., Banegas, C. L., Maradiaga Gonzales, H., Osorio, R. M. E., Henríquez, F. N. D., Eloy, N., & Mejía, N. (2012). Producción de bioetanol a partir del mucilago de café (*Coffea arabica*. L). Revista Ciencia y Tecnología, 10.

Gmünder, S., Toro, C., Rojas Acosta, J. M., & Rodríguez-Valencia, N. (2020). Huella Ambiental del Café en Colombia. In Huella Ambiental del Café en Colombia. <https://doi.org/10.38141/cenbook-0007>

Guzmán Salazar M.,Guillermo Mahecha N.,Rozo Perdomo S.(2022,agosto,02).Determinación de las variables óptimas para la producción de bioetanol a partir del mucilago de café con el propósito de reducir el vertimiento de los desechos provenientes del pretratamiento del café en las fuentes hídricas del municipio de Pitalito [Proyecto de grado,Universidad Ean].

Herrera, J., León, L., Torres, Y., Cano, N., Herrera, A., y Cuenca, M. (2019). Evaluación y selección de levadura comercial para el proceso de fermentación alcohólica de hidromiel. Publicaciones e Investigación, 13(2), 23-30.

Král, E., Rukov, J. L., & Mendes, A. C. (2023). Coffee Cherry on the Top: Disserting Valorization of Coffee Pulp and Husk. Food Engineering Reviews. <https://doi.org/10.1007/s12393-023-09352-4>

Rodríguez Valencia N., Zambrano Franco D. (2010, marzo). Los subproductos del café: fuente de energía renovables. [Investigación científica, Federación Nacional de Cafeteros de Colombia]. Avances técnicos cenicafe

Ríos, S., & Puerta, G. I. (2011). Composición Química Del Mucílago De Café, Según El Tiempo De Fermentación Y Refrigeración. *Cenicafé*, 2(62).

Orozco, L. F., Castro-Ríos, K., & Taborda Ocampo, G. (2013). Reducción de la demanda química de oxígeno, coliformes, mohos y levaduras en mucílago de café mediante electrocoagulación. *Revista de Investigación Agraria y Ambiental*, 4(1), 13. <https://doi.org/10.22490/21456453.975>

Puerta Quintero, G. I. (2000). Beneficie correctamente su café y conserve la calidad de la bebida. *Cenicafé*, 276(1).

Puerta Quintero, G. I., & Ríos Arias, S. (2020). COMPOSICIÓN QUÍMICA DEL MUCÍLAGO DE CAFÉ, SEGÚN EL TIEMPO DE FERMENTACIÓN Y REFRIGERACIÓN. repository.unad.edu

RODRÍGUEZ V., N.; QUINTERO Y., L. V. (2015). Índice de manejo del agua en el proceso de beneficio húmedo del café. *Disciplina Gestión de Recursos Naturales y Conservación*. 2015.

Sanz Uribe, J. R., Rodríguez Valencia, N., Oliveros Tascón, C. E., & Ramírez Gómez, C. A. (2015). Beneficio del café en Colombia prácticas y estrategias para el ahorro y uso eficiente del agua y el control de la contaminación hídrica en el proceso de beneficio húmedo del café. *Cenicafé*.

NAVARRETE PUYO, A. F., & SACRISTÁN DELGADO, U. S. (s/f). *Extracción de Bioetanol a partir de residuos de café con potencial de uso como biocombustible aditivo en motores tradicionales*. Universidad EAN.

Vanegas, F. (2016, junio 5). COMPOSICIÓN DEL FRUTO DEL CAFÉ. | *Coffee Media*
✓. <https://www.yoamoelcafedecolombia.com/2016/06/05/composicion-del-fruto-del-cafe/>