



**DETERMINACIÓN DE LAS VARIABLES ÓPTIMAS PARA LA PRODUCCIÓN DE
BIOETANOL A PARTIR DE MUCÍLAGO 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.**

MATEO GUZMÁN SALAZAR

NICOLAS GUILLERMO MAHECHA VEGA

SERGIO ENRIQUE ROZO PERDOMO

UNIVERSIDAD EAN

FACULTAD DE INGENIERÍA

BOGOTÁ D.C

2 DE AGOSTO 2022



Tabla de contenido

| | |
|---|----|
| Resumen | 5 |
| Abstract | 6 |
| 1. Introducción | 7 |
| 2. Objetivos..... | 8 |
| 2.1 Objetivo general | 8 |
| 2.2 Objetivos específicos..... | 8 |
| 3. Planteamiento del problema | 9 |
| 4. Definición del problema..... | 10 |
| 5. Justificación | 11 |
| 6. Marco teórico..... | 12 |
| 6.1 ¿Qué es el café?..... | 12 |
| 6.1.1 Anatomía del café..... | 13 |
| 6.2 Importancia del cultivo de café en Colombia | 14 |
| 6.3 Procesamiento del café | 15 |
| 6.3.1 Plantación..... | 16 |
| 6.3.2 Cosecha | 16 |
| 6.3.3 Procesamiento | 17 |
| 6.3.4 Clasificación..... | 18 |



| | |
|--|----|
| 6.3.5 Tueste..... | 18 |
| 6.3.6 Envasado y comercialización..... | 19 |
| 6.4 Obtención del mucílago de café..... | 19 |
| 6.4.1 Fermentación..... | 19 |
| 6.4.2 Desmucilaginado mecánico | 20 |
| 6.5 El mucílago de café y su impacto ambiental | 20 |
| 6.6 Estrategias de reutilización del mucílago de café | 23 |
| 6.7 Importancia, características y métodos de producción de bioetanol..... | 27 |
| 7. Análisis de requerimientos | 31 |
| 7.1 Alcance..... | 33 |
| 7.2 Especificaciones de diseño y requerimientos | 33 |
| 7.3 Descripción del proceso..... | 34 |
| 8. Metodología..... | 35 |
| 8.1 Tipo de metodología..... | 36 |
| 8.2 Método de investigación..... | 36 |
| 8.2.1 Pretratamiento mediante hidrólisis alcalina | 37 |
| 8.2.2 Adición de la levadura | 37 |
| 8.2.3 Fermentación..... | 38 |
| 8.2.4 Destilación | 38 |
| 8.3 Tipo de investigación | 38 |



| | | |
|------|---|----|
| 9. | Análisis de restricciones | 38 |
| 9.1 | Restricciones ambientales..... | 39 |
| 9.2 | Restricciones económicas..... | 39 |
| 9.3 | Restricciones legales | 41 |
| 9.4 | Restricciones de salud y seguridad..... | 43 |
| 9.5 | Restricciones socioculturales | 44 |
| 10. | Análisis de resultados..... | 45 |
| 10.1 | Análisis de la influencia del pH en el proceso de elaboración de Bioetanol | 46 |
| 10.2 | Análisis de la influencia de la concentración de levadura en la solución rica en azúcares..... | 49 |
| 10.3 | Análisis de la influencia del pretratamiento del mucílago de café en la obtención de bioetanol..... | 52 |
| 11. | Análisis de impactos | 53 |
| 12. | Análisis de costos..... | 55 |
| 13. | Conclusiones y recomendaciones | 59 |
| 14. | Recomendaciones..... | 60 |
| | Referencias | 61 |



Resumen

El mucílago de café es uno de los principales desechos producidos por la industria cafetera, su mal manejo ha conllevado a su vertimiento en las fuentes hídricas del país, lo cual ha generado un deterioro significativo en la calidad del agua. Esta problemática se ve reflejada en todo el territorio colombiano, siendo el municipio de Pitalito, ubicado en el departamento del Huila, uno de los más afectados, ya que en la actualidad cuenta con un nivel alto y medio de contaminación por materia orgánica en 5 de sus fuentes hídricas producto de vertimientos del sector cafetero. El mucílago representa un 20% del peso total del fruto de café y es rico en azúcares y otras sustancias útiles, debido a esto, ha sido objeto de estudio en diferentes investigaciones para la producción de recubrimientos biodegradables, concentrados animales y biocombustibles.

La presente investigación tiene como finalidad determinar y especificar las variables óptimas para la producción de bioetanol a partir del mucílago de café, así mismo, se pretende analizar su viabilidad como una estrategia de negocio sostenible. A lo largo de la investigación se logró identificar las variables más importantes para la obtención de bioetanol, siendo estas: el pH, la concentración de levadura y el pretratamiento del mucílago de café. De esta forma se estableció que: primero, es necesario llevar a cabo una hidrólisis básica a 121 grados Celsius durante 3 horas para aumentar la concentración de azúcares en el producto final, segundo, se debe trabajar con un pH ácido de entre 3,98 y 4,72, y tercero la concentración de levadura debe ser de 2,5 gramos por cada 100 mililitros de solución, con todas estas pautas, se logró obtener una concentración de alcohol entre un 80 y un 90%. Los resultados de la investigación demostraron el potencial del mucílago de café como materia prima para la producción de bioetanol de calidad como una estrategia para reducir los niveles de contaminación en el país.



Abstract

Coffee mucilage is one of the main wastes produced by the coffee industry, its mismanagement has led to its dumping in the country's water sources, which has generated a significant deterioration in water quality. This problem is reflected throughout the Colombian territory, being the municipality of Pitalito, located in the department of Huila, one of the most affected, since it currently has a high and medium level of contamination by organic matter in 5 of its water sources consequence of discharges from the coffee sector. The mucilage represents 20% of the total weight of the coffee fruit and is rich in sugars and other useful substances, due to this, it has been the object of study in different investigations to produce biodegradable recoveries, animal concentrates and biofuels.

The purpose of this research is to determine and specify the optimal variables to produce bioethanol from coffee mucilage, likewise, it is intended to analyze its viability as a sustainable business strategy. Throughout the investigation it will be possible to identify the most important variables for obtaining bioethanol, these being: the pH, the yeast concentration, and the pretreatment of the coffee mucilage. In this way, it is established that: first, it is necessary to carry out a basic hydrolysis at 121 degrees Celsius for 3 hours to increase the concentration of sugars in the final product, second, it is necessary to work with an acid pH between 3.98 and 4.72, and third, the yeast concentration must be 2.5 grams per 100 milliliters of solution, with all these guidelines, an alcohol concentration between 80 and 90% will be obtained. The research results demonstrated the potential of coffee mucilage as a raw material to produce quality bioethanol as a strategy to reduce pollution levels in the country.

Palabras clave: *Café, mucílago, bioetanol, biocombustibles, medio ambiente, contaminación.*



1. Introducción

Colombia es uno de los países con mayor importancia en cuanto a producción de café a nivel mundial, situándose como el tercer país con mayor producción anual de café, siendo solo superado por Brasil y Vietnam. Según la Federación Nacional de Cafeteros (FNC) en su informe de gestión afirman que durante el año 2021 las exportaciones de café colombiano verde ascendieron a 12,6 millones de sacos de 60 kilogramos, de las cuales 12,4 millones de sacos fueron destinados a las exportaciones. Los principales mercados de exportación del café colombiano son: Norteamérica (Estados Unidos y Canadá) con una participación del 45% de las exportaciones totales, seguido de Europa con una participación del 29% y finalmente Asia con una participación del 17% (Federación Nacional de Cafeteros de Colombia, 2021)

Colombia cuenta con aproximadamente 974.000 hectáreas dedicadas exclusivamente al cultivo de café y para el año 2021 la producción de café colombiano alcanzó un valor por \$10.8 billones de pesos, razón por la cual la actividad cafetera representa un 15% del PIB agropecuario del país (Federación Nacional de Cafeteros de Colombia, 2021). Uno de los municipios con mayor aporte a la producción de café es Pitalito, ubicado en el departamento del Huila, el municipio cuenta con cerca de 20.000 hectáreas destinadas a la producción de café, las cuales producen cerca de 26.000 toneladas de café por año, convirtiendo a Pitalito en el municipio colombiano con la mayor producción de café (Alcaldía de Pitalito, 2020).

La siembra y cosecha de café es una de las principales actividades económicas de este municipio, sin embargo, Pitalito cuenta con un nivel de calificación entre el 56 y el 72% del índice de contaminación por materia orgánica o por sus siglas ICOMO, en 5 de sus principales fuentes hídricas, es decir que las fuentes hídricas cuentan con un nivel alto y medio de contaminación por



materia orgánica debido a la descarga de aguas residuales agrícolas provenientes principalmente del proceso de tratamiento del grano de café (Trujillo-Zapata et al., 2021).

Cabe resaltar que la principal materia orgánica depositada en las fuentes hídricas es el mucílago de café, ya que este residuo representa el 55% de la huella hídrica gris del sector agrícola, el mucílago al tratarse de una materia orgánica atraviesa un proceso de descomposición que incrementa la demanda de oxígeno en los ríos, lo cual repercute en la proliferación de plagas, malos olores y el deterioro en la calidad del agua (Arévalo et al., 2011).

Para hacer frente a esta problemática se tiene por objetivo aumentar la eficiencia en el proceso de producción de bioetanol a partir de mucílago de café, mediante el análisis e identificación de las variables más relevantes en los procesos de secado, fermentación y destilación del mucílago.

Este proceso permitirá mejorar la calidad de vida de los caficultores, ya que es una posible nueva fuente de ingresos económicos al vender el mucílago de café para la producción de bioetanol, mitigar las emisiones de CO₂, preservar la flora y fauna de las fuentes hídricas e incentivar a los agricultores a incursionar en prácticas sostenibles, además de la posible apertura a una nueva industria de carácter sostenible que permitirá reutilizar los residuos del proceso de café brindándole a la industria cafetera un factor diferenciador en la economía mundial.

2. Objetivos

2.1 Objetivo general

Determinar las variables óptimas para la producción de bioetanol partiendo de mucílago de café como materia prima con el propósito de reducir el vertimiento de los desechos provenientes de la transformación del fruto del café en las fuentes hídricas del municipio de Pitalito.

2.2 Objetivos específicos



- Especificar las condiciones óptimas para el proceso de producción de bioetanol, partiendo de mucílago de café como materia prima, con el fin de evitar el vertimiento directo en las fuentes hídricas.
- Analizar la viabilidad económica, social y ambiental en el proceso de producción de bioetanol, partiendo de mucílago de café como materia prima.
- Proponer una estrategia que permita incrementar la eficiencia el proceso de producción de bioetanol, partiendo de mucílago de café como materia prima.
- Validar el proceso de obtención a partir de mucílago de café como materia prima.

3. Planteamiento del problema

En Pitalito, el café se cultiva en pequeñas explotaciones familiares y se procesa en molinos húmedos tradicionales, siendo la industria del café una de las fuentes de empleo más importantes del municipio, con más de la mitad de la población involucrada directa o indirectamente en la producción de café. Del mismo modo, el proceso de industrialización del café conlleva impactos ambientales negativos debido a la tala de la vegetación natural para las plantaciones de café, el uso de agroquímicos y la contaminación del agua por el procesamiento del café (Gmünder et al., 2020).

En Pitalito, los impactos ambientales se ven agravados por el hecho de que la mayoría de las fincas de café están ubicadas en laderas empinadas, donde la erosión es un problema grave. Además, el municipio tiene una alta densidad de fincas cafeteras, con un promedio de 2,5 fincas cafeteras por kilómetro cuadrado (García, 2020). Esta alta densidad de fincas cafeteras da lugar a un gran número de pequeños cafetales aislados, lo que dificulta la aplicación de prácticas eficientes de gestión medioambiental, por otro lado, el procesamiento del café genera grandes cantidades de aguas residuales, que a menudo se vierten directamente en los cuerpos de agua



superficiales sin tratamiento (Campos Morales & Durán Medina, 2019). Estas aguas residuales contienen varios subproductos de la industrialización del café, como granos, cáscaras y hojas de cafeto, así como productos químicos potencialmente dañinos utilizados en el procesamiento y la fumigación de los cafetales, como pesticidas y fertilizantes.

La contaminación de los recursos hídricos superficiales y subterráneos en Pitalito debido a la producción de café es un grave problema ambiental que tiene graves consecuencias para la salud de los habitantes del municipio. Como consecuencia, Pitalito cuenta con un nivel de calificación del índice ICOMO del 56% y el 72%, en 5 de sus principales fuentes hídricas. Entre las más afectadas se encuentra el río Caney y Maralla (Trujillo-Zapata et al., 2021). En particular, la ingesta de agua contaminada con agroquímicos se ha relacionado con una variedad de problemas de salud, incluyendo cáncer, defectos de nacimiento y problemas reproductivos. Además, el vertimiento de aguas residuales no tratadas procedentes del procesamiento del café puede provocar la propagación de enfermedades transmitidas por el agua, como el cólera y la disentería, según UNICEF.

El problema de la contaminación del agua relacionada con el café en Pitalito se ve agravado por el hecho de que el municipio no cuenta con una planta de tratamiento de agua centralizada. En consecuencia, la gran mayoría de los habitantes del municipio dependen de pozos o manantiales para obtener agua potable. Esta dependencia de los pozos y manantiales privados dificulta la vigilancia y el control de la calidad del suministro de agua, y hace más probable que se consuma agua contaminada.

4. Definición del problema



¿Cuáles son las variables óptimas para la producción de bioetanol a partir de mucílago de café con el propósito de reducir el vertimiento de los desechos provenientes del pretratamiento de café en las fuentes hídricas del municipio de Pitalito?

5. Justificación

Los subproductos resultantes del proceso de industrialización del fruto de café son residuos orgánicos que debido a su mal manejo generan importantes afectaciones ambientales tanto para la salud humana como al cuidado de los ecosistemas. Sumando a esto, los subproductos resultantes son abrumadores en proporción del fruto seco que es empleado como producto final, así lo afirman Arango Acevedo & Zapata Velez (2014):

En la agroindustria cafetera solamente se utiliza el 9,5 por ciento del peso total del fruto en la preparación de bebidas y el 90.5% son subproductos resultantes del beneficio, los cuales son dispuestos o almacenados inadecuadamente, contaminando los cuerpos de aguas y los suelos, generando afectación de los ecosistemas.

Como se observa la industria colombiana está desaprovechando un residuo que puede ser utilizado para generar un nuevo tipo de industria en el municipio y en Colombia, es decir que el aprovechamiento de este residuo no solo reduciría la contaminación en las fuentes hídricas del municipio, por tanto, se mejora la calidad del agua y esto permite que las personas de la comunidad la utilicen sin que se generen efectos secundarios, además, se generaría un nuevo ingreso monetario para los gremios cafeteros, ya que el mucílago no se convertiría un residuo, sino en un subproducto, este ingreso permitiría mejorar las condiciones de los cultivadores de café.

Por otra parte, al florecer estos procesos de reutilización de residuos aumentaría la generación de empleos debido a la creación de nuevas empresas encargadas de transformar el mucílago en bioetanol, esta creación de empresas y empleos permitirían una dinamización de la



economía y de la innovación en los procesos industriales de lavado, generando así un antes y un después en la industria cafetera colombiana.

Para solventar esta problemática se han llevado a cabo diferentes estrategias que permitan implementar el mucílago de café como una materia prima en industrias ajenas a la cafetera, una de las estrategias más prominentes es la obtención de bioetanol a partir del mucílago de café, tal y como afirman Funes et al. (2012):

El principio activo del mucílago del café son los grados Brix, que son los que actúan en el proceso de fermentación en el cual los carbohidratos son transformados en azúcares simples por medio de la levadura del género *Saccharomyces*, que lo convierten en etanol pasando luego por el proceso de destilado y así obtener bioetanol como producto final.

Sin embargo, aunque es una de las mejores alternativas, carece de rendimiento y viabilidad debido al poco estudio de las variables que se ha realizado, por esta razón la presente investigación tiene por objetivo determinar las variables que intervienen en la eficiencia de la obtención de bioetanol a partir del mucílago de café. De esta manera, se pretende comprobar la viabilidad de la estrategia en las pequeñas explotaciones cafeteras de Pitalito como una solución frente a los vertimientos del mucílago en las fuentes hídricas del municipio.

6. Marco teórico

6.1 ¿Qué es el café?

El cafeto (*Coffea*) pertenece a la familia de las rubiáceas y es originario de África tropical. La planta fue descrita por primera vez por Linneo en 1753. El café es un arbusto leñoso de hoja perenne que puede alcanzar los 10 m de altura. Las hojas son opuestas, simples y de forma elíptica, con márgenes lisos. Las flores son blancas y nacen en racimos. El fruto es una drupa que



contiene dos semillas, conocidas como granos de café (Farah & Dos Santos, 2015; Herrera & Lambot, 2017).

Se cree que el café es originario de Etiopía, donde se conoce como "bunna". La leyenda cuenta que un pastor de cabras llamado Kaldi descubrió el café tras observar que sus cabras se volvían más enérgicas después de comer las bayas de un determinado arbusto. Kaldi compartió su descubrimiento con los monjes locales, que comenzaron a preparar una bebida con las bayas para mantenerse despiertos durante sus oraciones nocturnas. Desde Etiopía, el café se extendió a Egipto y a la Península Arábiga. En el siglo XVI se abrieron las primeras cafeterías en Estambul (entonces Constantinopla). El café se extendió entonces a Europa, donde se popularizó rápidamente. El café se introdujo en Norteamérica a mediados del siglo XVIII (Smith, 1985).

En la actualidad, el café se cultiva en más de 70 países de todo el mundo. Brasil es el mayor productor de café, seguido de Vietnam, Indonesia y Colombia. Estados Unidos es el cuarto productor de café.

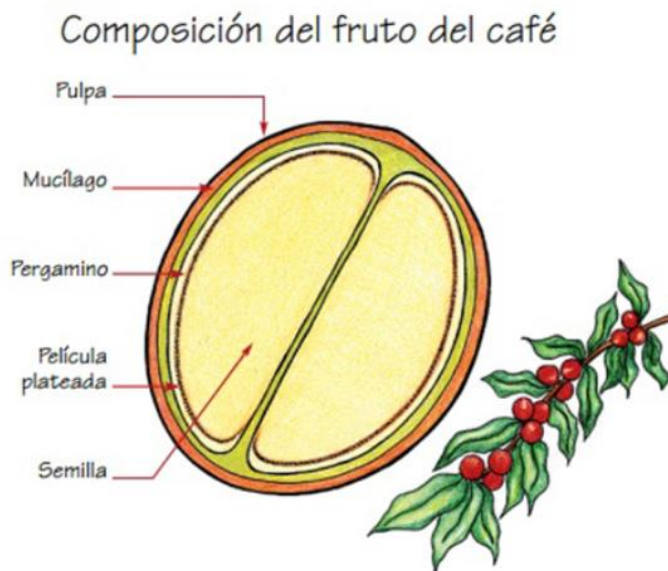
6.1.1 Anatomía del café

El fruto del café es también llamado cereza, dado su forma similar a este fruto, siendo el nombre general que recibe fruto con cada una de sus partes. A la capa más externa del fruto se le conoce como piel, es la parte visible del fruto y es la primera que se debe retirar para iniciar el procesamiento del café, la siguiente capa es llamada pulpa, compone aproximadamente el 40% del peso de la cereza del café y es altamente rica en azúcares, debajo de la pulpa se encuentra el mucílago, compuesto igualmente por azúcares, sustancias pécticas y agua. Después del mucílago viene el llamado pergamino del café, el cual la película plateada y la semilla del fruto, así la anatomía del café queda ejemplificada en la figura 1.

Figura 1



Composición del fruto del café.



Nota. Adaptado de Manual de producción sostenible de café en la República Dominicana, (p.13) IICA, 2019, Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura.

6.2 Importancia del cultivo de café en Colombia

El cultivo del café en Colombia es una de las actividades agrícolas más importantes del país. Es la principal fuente de divisas y da empleo a gran parte de la población. El sector cafetero genera un gran número de empleos indirectos en actividades relacionadas como el transporte, la comercialización y el procesamiento (Peña et al., 2014)

El café es una de las principales exportaciones de Colombia y representa una fuente muy importante de divisas para el país. En 2017, las exportaciones de café ascendieron a 1.700 millones de dólares, lo que representó el 11,4% de las Exportaciones Agrícolas Totales y el 3,4% de las Exportaciones Totales de Colombia. Los principales destinos del café colombiano son Estados Unidos, Japón, Alemania e Italia (Barrios et al., 2016).

El cultivo de café en Colombia es una importante fuente de empleo. En 2016, el sector cafetero empleó a cerca de 500.000 personas, tanto en empleos directos como indirectos. El 70%



de los empleos se encuentran en las zonas rurales y el 30% en las urbanas. La mayoría de los puestos de trabajo en el sector del café se encuentran en el cultivo y la cosecha de los granos de café (Federación Nacional de Cafeteros de Colombia, 2017).

El cultivo del café en Colombia tiene una larga tradición y es una parte importante de la cultura del país. La producción de café en Colombia comenzó a principios del siglo XVIII. Las primeras plantaciones de café se establecieron en el departamento de Antioquia. La producción de café en Colombia se ha concentrado tradicionalmente en los departamentos de Antioquia, Caldas, Risaralda y Quindío (McCook, 2006).

El sector del café en Colombia ha sufrido una gran transformación en los últimos años. La superficie cultivada de café ha disminuido y la producción de café se ha desplazado a regiones de menor altitud. El uso de la tecnología ha aumentado en el sector cafetero y muchos cultivadores han cambiado a variedades de café más eficientes (Harvey et al., 2021).

El futuro del cultivo del café en Colombia está ligado al desarrollo de la economía del país y a la expansión del mercado mundial del café. El crecimiento de la economía y el aumento de la población conducirán a un aumento del consumo interno de café. La expansión del mercado mundial del café ofrecerá a los caficultores colombianos la oportunidad de aumentar sus exportaciones.

6.3 Procesamiento del café

Durante el proceso previo a la obtención del grano de café como producto final, es necesario que los frutos del árbol de café sean sometidos a una serie de rigurosos procesos divididos en varias etapas, donde se remueven los componentes ajenos al grano del café y se prioriza el preservar e intensificar las características aromáticas y de sabor particulares del grano.

Estas etapas pueden dividirse en:



- Plantación
- Cosecha
- Procesamiento
- Clasificación
- Tueste
- Envasado y comercialización

6.3.1 Plantación

Es considerada como la primera etapa y la más importante dentro de la producción del café, la misma varía dependiendo del tipo de grano y de las condiciones climatológicas de la región, sin embargo, se considera que los rangos óptimos para la plantación de café se comprenden en altitudes entre los 600 a 1400 metros sobre el nivel del mar, temperatura entre los 19 °C a 21 °C, precipitaciones anuales de 1500 a 2000 milímetros y un pH en el suelo de 5 a (MINISTERIO DE AGRICULTURA Y GANADERÍA, 2020). Se estima que la vida aproximada de un arbusto de cafeto se encuentra entre los 20 y los 25 años, alcanzando la máxima productividad entre los 6 y los 8 años, lo anterior dependiendo de las condiciones climatológicas y genéticas de la semilla de café (Arcila Pulgarín, 2007).

6.3.2 Cosecha

Esta etapa es una de las más críticas que condicionan la calidad del producto final, se produce una vez al año cuando los frutos del cafeto se encuentren maduros. Para llevar a cabo la recolección de los frutos existen dos técnicas principales, el *picking* y el *stripping*. El método *picking* consiste en una cuidadosa selección y recolección manual por parte de los cafeteros, es una técnica lenta y meticulosa que requiere de un personal altamente capacitado para identificar las características de un fruto de alta calidad, lo cual da como resultado una cosecha de alta calidad.



Por otro lado, el método *stripping* es un proceso masivo de recolección donde todos los granos son cosechados, puede ser un proceso manual o mecanizado, este método es más eficiente, pero requiere de un tamizado posterior para seleccionar los frutos de mayor calidad (Ocampo-López et al., 2017).

6.3.3 Procesamiento

La etapa de procesamiento, también conocida como beneficiado del café, es la etapa donde el fruto de café cereza es sometido a diferentes procesos con el objetivo de separar y remover las capas externas al grano de café, como lo son el mucílago y la cascara, estos procesos son esenciales para determinar la calidad final café.

Los tipos de procesamiento varían de acuerdo con la especie del café, el tipo de cultivo e incluso la región geográfica donde se realizó el cultivo. Según AMECAFÉ (2012) los principales métodos para el procesamiento del fruto de café son los siguientes:

6.3.3.1 Beneficio húmedo

El beneficio húmedo es ampliamente utilizado en países como Colombia, Costa Rica y Guatemala, se caracteriza por ser el procesamiento más complejo y costoso en comparación con otros beneficios debido a que requiere de múltiples etapas y de la presencia de agua, como resultado es empleado con los granos de mejor calidad, ya que refuerza las propiedades más apreciadas en el grano de café, como lo son el sabor, el aroma y la acidez. El beneficio húmedo comprende los procesos de despulpado, desmucilaginado, lavado y secado. El proceso de despulpado consiste en desprender la pulpa del fruto, la pulpa es dispuesta para su tratamiento mientras que el fruto continúa hacia el proceso de desmucilaginado, este proceso puede llevarse a cabo mediante fermentación o remoción, a continuación, el grano de café es lavado para evitar que los remanentes de mieles afecten el sabor del grano, finalmente en el proceso de secado sirve para



eliminar el excedente de humedad del café y permitir una mejor conservación (Puerta Quintero, 2000).

6.3.3.2 Beneficio seco

El beneficio seco es uno de los más simples y se divide en las etapas de secado y trillado de los granos, además no requiere de agua, por lo que es una opción atractiva en zonas que carecen de este recurso. Este tipo de beneficio suele ser común en diferentes países de África y en Brasil, su principal ventaja es otorgar al café un sabor más complejo y afrutado gracias al azúcar de la pulpa y el mucílago. La primera etapa, el secado, consiste en dejar secar los frutos de café al sol hasta que la humedad interna disminuya considerablemente, después, en el proceso de trillado, se procede retirar la cáscara o descascarillar los frutos.

6.3.4 Clasificación

El café se clasifica en función de su tamaño, número de defectos, apariencia o densidad, dependiendo de la vía de beneficiado anterior, posteriormente los granos son empaquetados en sacos de fibra preferentemente, donde son almacenados en proporciones de 60 o 70 kg para ser transportados más adelante. Es importante recalcar que los granos deben estar secos al momento del almacenamiento, independientemente del tipo de beneficiado, se espera que los granos no posean una humedad superior al 12% con el objetivo de evitar la proliferación de hongos (Puerta Quintero, 2000).

6.3.5 Tueste

El tueste del café es el tratamiento mediante el cual los granos adquieren el tamaño, sabor, color y aroma característicos, este proceso se lleva a cabo en tostadoras especiales, donde los granos se mantienen en constante movimiento para adquirir un tostado uniforme. Durante el



tostado se logran los cambios más significativos, el volumen del grano se hace más grande, la humedad disminuye a aproximadamente el 2% y el peso también se ve reducido.

6.3.6 Envasado y comercialización

Finalmente, la última etapa en el procesamiento de café es el envasado, durante esta etapa el café se puede reservar en grano o molido, utilizando un molinillo de café en el segundo caso. Dependiendo del comercializador y sus preferencias, el café se puede almacenar y vender en envases de vidrio o plásticos.

6.4 Obtención del mucílago de café

El mucílago del café se obtiene durante el procesamiento del café mediante la vía de beneficio húmedo. Específicamente, la etapa de desmucilaginado es en donde la capa de mucílago adherida al grano de café es removida después de haber pasado por el proceso de despulpado. El desmucilaginado se puede realizar mediante dos vías diferentes:

6.4.1 Fermentación

La fermentación del mucílago de café tiene como principal objetivo degradar la estructura del mucílago para que, en la etapa de lavado, posterior al desmucilaginado en la vía de beneficio húmedo, el mucílago pueda ser retirado con facilidad del grano, así mismo, las fermentaciones son procesos destinados a la transformación de compuestos complejos como azúcares en sustancias más simples mediante la acción de una levadura. “Durante la fermentación del mucílago actúan bacterias, levaduras y enzimas, que transforman los compuestos pépticos y azúcares, en alcoholes y ácidos orgánicos” (Peñuela-Martínez et al., 2010). La fermentación es el método más empleado actualmente, pues no requiere de maquinaria especializada, se puede realizar en tanques, cubiertos o sin cubierta, a temperatura ambiente y durante periodos de entre 12 a 36 horas, dependiendo de



las características ambientales y del grano, siendo que las zonas con menores temperaturas necesitan más tiempo para llevar a cabo una fermentación completa.

6.4.2 Desmucilaginado mecánico

El desmucilaginado mecánico consiste en remover el mucílago por medios físicos, es decir, requiere de un equipo rotatorio que permite retirar el mucílago del grano mediante fricción. A diferencia de la fermentación, el desmucilaginado mecánico tiene la ventaja de reducir la cantidad de agua empleada durante el proceso de lavado y no requiere de la presencia de levaduras ni de las condiciones ambientales para su óptima realización, sin embargo, se considera un proceso más costoso, pues es necesario la adquisición de un desmucilaginador mecánico como el DRV-1000 o el DESLIM-1000.

Este procedimiento se realiza mediante el desprendimiento del mucílago por acción mecánica, los desmucilaginadores cuentan con una cámara rotativa donde los son dispuestos los granos con despulpados, aquí el esfuerzo constante producido por la fricción resulta en el desprendimiento del mucílago (EMPRESA CONSULTORA CONSULSANTOS S.R.L, 2010).

6.5 El mucílago de café y su impacto ambiental

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 localizada entre la pulpa y el pergamino del grano de café, representa cerca de un 20% del total del peso del fruto y este compuesto por una mezcla de agua, azúcares y sustancias pécticas (Ríos & Puerta, 2011). Este residuo es de carácter semilíquido con una consistencia viscosa, alberga varios microorganismos de tipo Serratia, Torulopsis y Citrobacter (Orozco et al., 2013).



Dentro de su composición química podemos encontrar principalmente glucosa, galactosa, lactosa, proteínas y siringaldehído, por otra parte, se pueden encontrar en menores proporciones ciertos minerales como arsénico, potasio, hierro, cobre, magnesio y sodio, entre otros componentes (Pérez Sariñana et al., 2015). Una descripción más detallada se puede encontrar en la Tabla 1 y en la Tabla 2.

Tabla 1

Composición química del mucílago de café (Componentes).

| Componentes | Concentración (g/L) |
|----------------|---------------------|
| Glucosa | 35,65 |
| Galactosa | 37,67 |
| Lactosa | 1,06 |
| Proteínas | 0,119 |
| Siringaldehído | 0.61 |

Nota. Adaptado de Optimization of bioethanol production from coffee mucilage (p.4) B. Pérez-Sariñana et al., 2015, BioResources.

Tabla 2

Composición química del mucílago de café (Minerales).

| Minerales | Concentración (mg/L) |
|-----------|----------------------|
| Fósforo | 41,55 |
| Azufre | 30,19 |



| | |
|----------|-------|
| Silicio | 1,58 |
| Calcio | 37,08 |
| Hierro | 0,65 |
| Potasio | 239,8 |
| Magnesio | 10,05 |
| Sodio | 7,18 |

Nota. Adaptado de Optimization of bioethanol production from coffee mucilage (p.4) B. Pérez-Sariñana et al., 2015, BioResources.

Gracias a estas características físicas y químicas, se puede decir que el mucílago de café es un residuo complejo que puede causar un índice alto de contaminación, ya que al generarse aguas residuales con alto contenido de mucílago se puede generar un índice de demanda química de oxígeno (DQO) que varía desde los 1500 a los 101200 mgO₂/L (Orozco et al., 2013). Debido a su composición, cuando el mucílago de café entra en contacto con los diferentes cuerpos de agua, se lleva a cabo un proceso de fermentación, el cual repercute en el deterioro de la calidad de agua para su consumo y en afectaciones directas sobre la fauna y flora local.

Es decir, este contaminante rico en materia orgánica que se vierte directamente en las fuentes hídricas, es de carácter ácido debido a que su pH ronda entre un pH 3 y un pH 4, al verter este residuo las plantas y los animales se ven afectados cuando se exponen a ellas, ya que estos cambios bruscos en las condiciones del medio, causan que los organismos vivos entren en contacto con un medio con condiciones físicas y químicas diferentes, lo que conlleva a que las plantas o



animales del medio hídrico empiecen a disminuir su población drásticamente (Banti & Abraham, 2021).

En este caso los azúcares que contiene el mucílago de café se someten a un proceso de fermentación debido a los microorganismos que poseen las fuentes hídricas, este proceso de fermentación trae como resultado la obtención de ácidos orgánicos y ácido acético de allí viene que las aguas residuales sean muy ácidas, a su vez esto trae como consecuencia que en la superficie se forme se forma una costra que favorece a las condiciones anaeróbicas, es decir que se aumenta la cantidad de oxígeno necesaria para oxidar la materia orgánica e inorgánica presente en las fuentes hídricas (Aumento de la demanda química de oxígeno) (Banti & Abraham, 2021).

6.6 Estrategias de reutilización del mucílago de café

Teniendo en cuenta que el mucílago de café debe ser considerado como un subproducto en vez de un residuo, debido a su amplia cantidad de propiedades físicas y químicas que permiten darle un nuevo tipo de utilidad en la industria, se han presentado diversos proyectos en los cuales se proponen nuevas maneras de transformación para obtener así productos totalmente diferentes, dentro de estas metodologías propuestas encontramos las que se describen a continuación.

En primer lugar, el estudio titulado “Biodegradable Electrospayed Pectin Films: An Alternative to Valorize Coffee Mucilage” aborda un proceso de transformación al mucílago de café como fuente principal de obtención de pectina para la elaboración películas y/o recubrimientos biodegradables mediante la electropulverización. Los resultados de este estudio denotan que el mucílago del café es una opción factible para la extracción de pectina y su posterior transformación en una película biodegradable, cuya característica principal es la estructuración de una columna vertebral formada por homogalacturonano con sustituciones de xilogalacturonano o rhamnogalacturo-nano, esto quiere decir que la implementación de esta película es viable para



diferentes aplicaciones en alimentos, y la producción de películas y recubrimientos, esta validación permitió aportar a la reducción del impacto ambiental y contribuyó a la diversificación de las materias primas para la elaboración de películas biodegradables.

En segundo lugar, encontramos el trabajo titulado “Desarrollo de un Concentrado a Base de Mucílago de Café *Coffea Arabica*” siendo un proyecto que busca darle una nueva vida útil al mucílago de café mediante la transformación de este subproducto en concentrado para animales, este estudio consto de una metodología de tres fases, en este caso su fase inicial es la caracterización de la materia prima con la que se trabajó la cual es mucílago de café, después de caracterizar de manera correcta la materia prima inicia la fase 2 en la cual se centran en la elaboración del concentrado del mucílago por medio de diferentes procesos de transformación como fermentación, secado, filtración, entre otros, finalmente la etapa de culminación del proyecto se centra en caracterizar fisicoquímicamente el concentrado obtenido. Los resultados del proyecto muestran que se logró obtener un concentrado rico en polifenoles (22,87%) y antioxidantes (17,78%), es decir, se logró obtener un producto viable para la utilización en productos agroindustriales.

Por último, encontramos el trabajo titulado “Producción de bioetanol a partir del mucílago de café (*Coffea arabica*. L). CURC. UNAH. Comayagua. Honduras. 2011” este artículo tiene como objetivo es evaluar el proceso de fermentación anaeróbica para la obtención de bioetanol para la reducción de la contaminación mediante la utilización adecuada del mucílago de café, en este caso se obtuvo el mucílago de café fresco y se le realizó una caracterización de sus propiedades, luego se realizó un proceso de pasteurización para eliminar los contaminantes presentes en la muestra, como paso a seguir se realizó el proceso de inoculado de la levadura *Saccharomyces Cerevisae* y se comenzó con el proceso de fermentado, finalmente se realizó una



destilación fraccionada, en esta investigación se logró obtener bioetanol partiendo de mucílago de café como materia prima con un rendimiento más alto en mucílago con poca concentración de agua, además de la utilización de la *Saccharomyces Cerevisae* como organismo fermentador, finalmente el proyecto recomienda que el proceso de destilación fraccionada se lleve a cabo a temperaturas superiores a 70 °C ya que a temperaturas inferiores a 70 °C se destila metanol.

Dado que en este proyecto se busca determinar las variables óptimas para la producción de bioetanol partiendo de mucílago de café como materia prima, es necesario plantear los estudios que se han enfocado en el estudio de las diferentes variables que influyen el proceso de obtención de bioetanol a partir de mucílago de café.

En este caso uno de los estudios que más sobresale es “Optimization and Scale-Up of Coffee Mucilage Fermentation for Ethanol Production” elaborado por David Orrego y Arley David Zapata-Zapata en el año 2019, este proyecto busca cuantificar la influencia el pH, la temperatura y la concentración inicial de azúcar del mucílago del café, en el proceso de producción de bioetanol, para ello primero realizaron la recolección y tratamiento del mucílago de café, proceso en el cual se esterilizó el mucílago de café a 121 °C durante 15 min, posteriormente se tamizó sobre una malla Mesh 20, y se ajustó el pH de 4,0 a 7,0.

Después de la etapa de pretratamiento del mucílago, se prepararon los organismos encargados de la fermentación (*Saccharomyces cerevisiae* NRRL Y-1546). Durante el proceso de fermentación se tomaron varias muestras de 250 mL a las cuales se les adicionó la levadura y se llevaron a condiciones experimentales óptimas (28 °C, pH 4,0). Como parte de los resultados de la investigación se determinó que la temperatura de incubación y fermentación son factores clave para la conversión de azúcares fermentables en el mucílago del café en etanol, además se establece



que el mucílago de café crudo no requiere ningún proceso de pretratamiento antes de la fermentación.

Otro de los proyectos que nos permite establecer los lineamientos para determinar qué variables son las más óptimas para la obtención de bioetanol tenemos un artículo titulado “Optimization of Bioethanol Production from Coffee Mucilage”, en este caso también se evalúa como influyen las variables como la temperatura, el pH, entre otras en la obtención de bioetanol, para realizar esta validación se realizó un proceso de extracción y neutralización del mucílago de café en el cual se pasteurizó a 65 °C durante 25 min, luego se prepararon los organismos encargados de la fermentación (*Saccharomyces cerevisiae* NRRL Y-2034) en un agar YPD (1% p/v extracto de levadura, 2% p/v peptona, 2% p/v glucosa y 2% p/v agar), finalmente se determinaron varias temperaturas para las diferentes muestras de 100 ml en el proceso de fermentación.

El resultado más sobresaliente del estudio mencionado anteriormente son las condiciones óptimas para el proceso de producción de bioetanol, ya que se menciona que las mejores condiciones son: pH 5,1, temperatura 32 °C, concentración inicial de azúcar de 61,8 g/L, BP de 15,02 g/L y PP de 0,31 g/L, bajo estas condiciones, se obtuvieron 16,29 g/L. Se nos recomienda optimizar las condiciones del medio de cultivo para maximizar la producción de bioetanol.

Por otra parte, el trabajo final que nos permite plantear algunas bases para la determinación de las variables que afectan drásticamente la obtención de bioetanol partiendo de mucílago de café es el artículo titulado “A Simple Method to Determine Bioethanol Production from Coffee Mucilage, Verified by HPLC” en el cual se llevó a cabo la siguiente metodología para obtener bioetanol y evaluar la concentración de etanol obtenida: como primer paso se pretrató el mucílago de café y se llevó a un pH óptimo para realizar a inoculación de la levadura *Saccharomyces*



cerevisiae, luego de este paso se llevó a cabo el proceso de fermentación, donde se llevaron a cabo diferentes preparaciones con varias concentraciones de azúcar reductora (26,486 g/L, 49,043 g/L y 68.,35 g/L), cada muestra se fermentó con un pH 5 y temperatura de 30 °C con agitación constante a 150 RPM durante 16 horas.

Para la verificación de la concentración de bioetanol obtenida se utilizó el método del picnómetro, para este caso fue necesario realizar un blanco y adicionar alcohol etílico al 99,9%. Para realizar una curva de calibración, en este caso se tomó otra muestra para tener concentraciones de etanol de 0 a 50 g/L, adicionalmente se determinaron los pesos y densidades determinados por medio balanza analítica y un picnómetro. Finalmente, para calcular la concentración de alcohol presente en las muestras se utilizó la curva de calibración. En cuanto al resultado, con base a las concentraciones iniciales de azúcar reductor se obtuvieron rendimientos de 88.740%, 72.794% y 73.731% respectivamente.

6.7 Importancia, características y métodos de producción de bioetanol

Como se observa en las diferentes estrategias de reutilización del mucílago de café, este proyecto se enfoca principalmente en la obtención de bioetanol mediante los procesos de fermentación, sin embargo es de vital importancia entender que es bioetanol, como se produce industrialmente, qué tipos existen y cuáles son sus propiedades principales.

Para comenzar el bioetanol es alcohol etílico el cual está constituido por dos átomos de carbono unidos por un enlace sencillo, a uno de estos carbonos se le une un grupo hidroxilo generando así una estructura simplificada ($\text{CH}_3\text{-CH}_2\text{OH}$), pero de donde viene el etanol, este alcohol puede ser obtenido mediante un proceso de fermentación y/o la descomposición de los azúcares de carácter reductor presentes en vegetales, frutas, biomasa, entre otras materias primas,



en este caso, se denomina bioetanol al alcohol al etanol obtenido de fuentes renovables que en este caso son fuentes vegetales (Rodríguez Siliceo, 2014).

Es de resaltar que el bioetanol se divide en tres grandes familias, en este caso tenemos el bioetanol de primera generación, el cual se obtiene de cultivos con alta concentración de azúcar los cuales sirven para la alimentación humana y/o animal, algunos ejemplos son la caña de azúcar, el maíz y la remolacha, es decir el bioetanol de primer orden se obtiene de cultivos ricos en almidón. Por otra parte, el bioetanol de segunda generación tiene su origen en materias primas que pueden ser ricas en celulosa, por ejemplo, los residuos de la madera, o de cultivos alimenticios como los desechos del maíz, el mucílago y la cascarilla de café, etc. Finalmente, se tiene al bioetanol de tercera generación, el cual es obtenido de plantas específicamente cultivadas para producir biocombustibles (Rodríguez Siliceo, 2014).

Ahora que se presentó una descripción acerca de los tipos de bioetanol, surge la siguiente pregunta ¿Cuál es la importancia del bioetanol? En primera instancia es de resaltar que en actualidad las problemáticas ambientales se han agravado debido a la sobreexplotación en la obtención de combustibles fósiles, debido a la situación anterior, diversos investigadores se han enfocado en encontrar un combustible más ecológico, de obtención natural y sobre todo de carácter renovable dentro de los principales combustibles que cumplen estas características tenemos al bioetanol y al biodiésel, la producción en este caso del biodiésel genera un aporte a la agricultura fomentando el desarrollo rural y mitiga el impacto debido a la reducción de las emisiones de gases efecto invernadero (Silva Rubio et al., 2012).

La característica más sobresaliente del bioetanol es su potencia energética, ya que es comparable a los combustibles de carácter no renovable como la gasolina, por otra parte, el bioetanol genera menos emisiones de gases de efecto invernadero, al tener estas características tan



peculiares ha sido tomado tan en cuenta que en la actualidad se utiliza en mezclas con gasolina con concentraciones del 5% y 10% (Silva Rubio et al., 2012).

Otro aspecto por resaltar sobre la importancia del bioetanol es que la implementación de los biocombustibles disminuiría en gran medida el nivel de importaciones de petróleo, es decir, se reduciría el impacto producido por las variaciones del precio del petróleo, lo anterior recae en la posibilidad de impulsar la economía local e incentivar a los agricultores y emprendedores a formar parte de esta nueva industria (Khan et al., 2021).

Ya que se revisó la importancia del bioetanol, es el momento de especificar sus diferentes procesos de producción en la industrial actual. En primera instancia tenemos el proceso de obtención de bioetanol de primera generación, dentro de los procesos de obtención tenemos varios sistemas enfocados en la extracción de los azúcares presentes en la materia prima seleccionada, para ello se utiliza un proceso de Molienda, la cual es la encargada de separar todo el material lignocelulósico del jugo rico en azúcares, después de este proceso el jugo es sometido a un proceso de coagulación, floculación y precipitación con el fin de retirar las impurezas que posteriormente se retiran en un filtro (Rodríguez Siliceo, 2014).

Posteriormente, este jugo se dirige a múltiples evaporadores que van a ser los encargados de aumentar la concentración de azúcar retirando la humedad, en este caso el azúcar pasa por un proceso de cristalización, ahora para la producción de etanol es necesario realizar un proceso de fermentación, en este proceso el azúcar pasa a una serie de tanques de fermentación donde se les adiciona la levadura, en este caso las levaduras más utilizadas son las de la especie *Saccharomyces cerevisiae*, este proceso de fermentación dura entre 8 a 12 horas, lo que se obtiene en este proceso es una mezcla de varias sustancias con bioetanol y para obtenerlo en una mayor concentración es



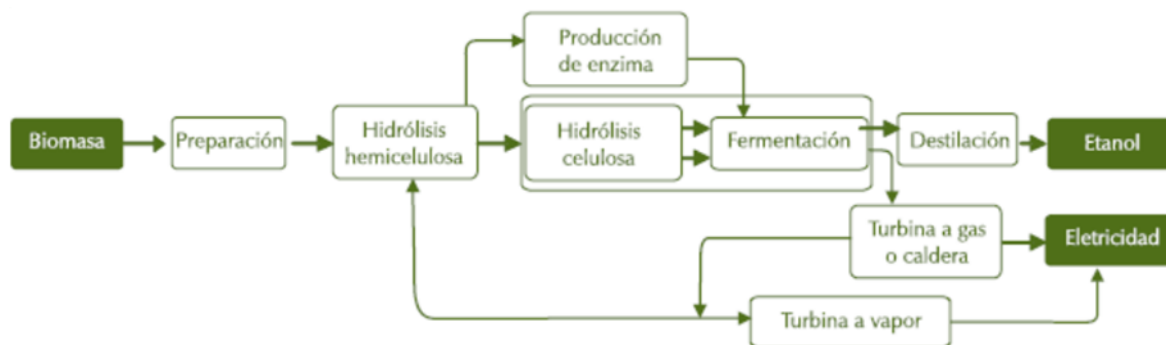
necesario realizar procesos de operaciones unitarias, en este caso el proceso es la destilación (Rodríguez Siliceo, 2014).

Para el proceso de obtención de bioetanol de segunda generación como primer paso se deben romper las moléculas de lignina para así obtener los polisacáridos de la biomasa, una vez obtenidos estos polisacáridos es necesario adicionar enzimas capaces de romper los enlaces β -1,4-glucosídicos de la celulosa para así tener una solución rica en glucosa a este proceso se le denomina hidrólisis (Rodríguez Siliceo, 2014).

Una vez terminado el proceso de hidrólisis ya contamos con los azúcares necesarios para el proceso de fermentación donde se utiliza la levadura *Saccharomyces cerevisiae*, la cual tiene un tiempo activo de fermentación entre 8 y 12 horas, finalmente se realiza un proceso de destilación para obtener una mezcla bioetanol-agua con una alta concentración de bioetanol, (Rodríguez Siliceo, 2014). El proceso anterior se puede apreciar en la figura 2.

Figura 2

Proceso de obtención de bioetanol de segunda generación.



Nota: El diagrama ejemplifica los procesos necesarios para la obtención de bioetanol de segunda generación a partir de biomasa. Adaptado de Análisis De La Productividad Industrial De Bioetanol (p.51), por M. Siliceo Rodríguez, 2014, UNIVERSIDAD VERACRUZANA.



Finalmente, para obtener bioetanol de tercera generación industrialmente se debe realizar como paso inicial un pretratamiento de las macroalgas, ya que estas macroalgas son ricas en celulosa, esta sustancia tiene una alta concentración de polisacáridos los cuales se pueden degradar para obtener azúcares fermentables, dentro de estos procesos de pretratamiento tenemos la molienda, la hidrólisis básica, la hidrólisis alcalina, la oxidación humedad, etc. En este caso el método más utilizado es la hidrólisis básica cuyo principio es tratar la biomasa procedente de las macroalgas con ácido sulfúrico a una temperatura determinada, la ventaja de este proceso es que se logra romper esa estructura cristalina de la pared celular para que las enzimas puedan penetrar al material y logren realizar la hidrólisis enzimática la cual permite romper las cadenas de azúcares en glucosa mediante la utilización de enzimas de tipo endoglucanasas y exoglucanasas y b-glucosidasas, cabe resaltar que estas enzimas deben estar en un medio con pH de 4 a 4,5 y se deben manejar temperaturas entre 40 y 50 °C. Después del proceso de obtención de azúcares se comienza con el proceso de fermentación la cual es realizado por levaduras las cuales producen energía a partir de los azúcares fermentables, este proceso se rige bajo la siguiente reacción:



Este proceso finaliza con la operación unitaria de destilación mencionada anteriormente (Rodríguez Siliceo, 2014).

7. Análisis de requerimientos

Para producir bioetanol a partir del mucílago del café, hay que tener en cuenta una serie de factores a la hora de establecer las especificaciones de diseño y el alcance de la solución de ingeniería. El primer factor es el tipo de cafeto del que se obtendrá el mucílago. Hay dos tipos principales de cafetos, Arábica y Robusta, siendo el Arábica el que representa alrededor del 60% de la producción mundial de café (Rodríguez Siliceo, 2014). El tipo de cafeto afectará a la



composición del mucílago, ya que el mucílago de Arábica suele contener más glucosa y menos xilosa que el de Robusta (Arya & Rao, 2010). Esto repercutirá en la eficiencia del proceso de fermentación y en el rendimiento del bioetanol.

El segundo factor para considerar es el método de extracción del mucílago. Hay dos formas principales de extraer el mucílago del café, mediante beneficiado húmedo y beneficiado seco. El beneficiado húmedo consiste en sumergir las cerezas de café en agua para aflojar el mucílago, que luego se lava. El beneficio seco consiste en dejar que las cerezas de café se sequen al sol o en secadores mecánicos, tras lo cual el mucílago puede ser simplemente frotado del grano (Pereira et al., 2020). El método de extracción influye en la pureza del mucílago y en el rendimiento del bioetanol.

Una vez obtenido y extraído el mucílago del café, el tercer factor consiste en fermentar el mucílago para producir bioetanol. Para ello se pueden utilizar diferentes microorganismos, como levaduras, bacterias y hongos. La elección del microorganismo influirá en el rendimiento y el tipo de bioetanol producido. Por ejemplo, la levadura suele producir más etanol con un menor porcentaje de otros productos de fermentación, como el dióxido de carbono y el agua (Wyman, 1994; Wyman & Goodman, 1993).

Tras la fermentación, el bioetanol debe destilarse para eliminar las impurezas, este viene a ser el cuarto y último factor a tener en cuenta. El proceso de destilación también aumentará la concentración de etanol.

A la hora de establecer la solución de ingeniería para la producción de bioetanol a partir del mucílago del café, hay que tener en cuenta cada uno de los factores descritos pues influirán en el rendimiento y la calidad del bioetanol obtenido: el tipo de cafeto, el método de extracción, los microorganismos utilizados para la fermentación y el proceso de destilación.



7.1 Alcance

La solución de ingeniería para la producción de bioetanol a partir del mucílago del café implicará el desarrollo de un proceso eficiente para la extracción del mucílago de los granos de café, seguido de la fermentación del mucílago para producir bioetanol. El proceso tendrá que ser diseñado para ser económicamente viable y para producir un alto rendimiento de bioetanol. Los límites del proyecto son la obtención de bioetanol y la caracterización de este. En este caso, a lo largo del proyecto se llevarán a cabo varias pruebas a nivel de laboratorio donde se obtendrá bioetanol a partir de mucílago de café, durante estas pruebas se realizarán modificaciones en las variables del proceso de obtención, tales como tiempo de fermentación, control de pH, temperatura de fermentación, cantidades de levadura, entre otras. Estas pruebas se resumen en 18 experimentaciones en las cuales se modificarán 3 variables de las anteriormente mencionadas, finalmente el estudio finalizaría con la caracterización y el análisis del bioetanol obtenido en las diferentes pruebas.

7.2 Especificaciones de diseño y requerimientos

Para que el proceso sea económicamente viable, el coste de extracción del mucílago de los granos de café debe ser bajo. El proceso de extracción también debe ser escalable para poder producir grandes cantidades de bioetanol.

El proceso de fermentación debe ser diseñado para producir un alto rendimiento de bioetanol. El proceso de fermentación también debe ser escalable para poder producir grandes cantidades de bioetanol.

- El proceso debe estar diseñado para ser respetuoso con el medio ambiente.
- El proceso debe estar diseñado para que su funcionamiento sea seguro.



En cuanto a las principales características que debe tener el bioetanol obtenido es de resaltar que debe estar limpio y sin impurezas, además de tener un aspecto incoloro, su acidez total no debe superar los 30 mg/L, debe tener un grado alcohólico mínimo del 60%, adicionalmente no puede tener concentraciones superiores a los 5.5 mg/Kg de hierro, 2.2 mg/Kg de Sodio y 0.07 mg/Kg de Cobre, por otra parte, debe tener una densidad de 791.5 Kg/m³, estos requerimientos están establecidos por las normas ASTM: D1613, D-1125, D4052, D512 y D5501.

Adicionalmente, el bioetanol para ser considerado como combustible debe tener un poder calorífico similar a 5,2 kW/h, por otra parte, el mucílago de café como materia prima debe tener un pH cercano a 5,3, una densidad similar a 1,12 g/mL, además de contar con buena refrigeración al momento de su implementación para evitar que el mucílago se fermente debido a la presencia de microorganismos.

En cuanto a los requerimientos del proceso de obtención de bioetanol, es necesario contar con:

- Mucílago de café (4 litros)
- Levadura Tipo *Saccharomyces Cerevisiae* (165 gramos)
- Fosfato trisódico (102 gramos)
- Cloruro férrico (2 gramos)
- Sulfato de magnesio (2 gramos)
- Urea (213 gramos)
- Agua destilada (2 litros)

7.3 Descripción del proceso

El proceso propuesto para la producción de bioetanol a partir del mucílago del café incluirá los siguientes pasos:



- Extracción del mucílago de los granos de café: El mucílago se extraerá de los granos de café mediante un proceso mecánico. Los granos de café se triturarán y el mucílago se separará de los fragmentos del grano.
- Fermentación del mucílago: El mucílago se fermentará para producir bioetanol. El proceso de fermentación se llevará a cabo en un recipiente sellado para evitar el escape de vapores o gases.
- Purificación del bioetanol: El bioetanol se purificará mediante un proceso de destilación. El bioetanol purificado cumplirá las especificaciones establecidas por la Unión Europea para los biocombustibles.
- Protección del medio ambiente: El proceso se diseñará para minimizar la emisión de gases de efecto invernadero y otros contaminantes.
- Seguridad: El proceso se diseñará para que su funcionamiento sea seguro. Se establecerán medidas de seguridad adecuadas para proteger a los trabajadores y al medio ambiente.

8. Metodología

Con el objetivo de brindar una respuesta al problema planteado, se desarrolla el siguiente diseño de investigación para identificar las variables óptimas para la producción de bioetanol a partir de mucílago 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. Así mismo, se propone una estrategia que permita incrementar la eficiencia del proceso de producción de bioetanol para poder incrementar la competitividad de esta fuente de energía renovable.



El presente proyecto pretende evaluar el comportamiento de las variables que afectan el proceso de producción de bioetanol partiendo de mucílago de café con pruebas a nivel de laboratorio modificando las variables de pH, cantidad de levadura y tiempo de pretratamiento.

8.1 Tipo de metodología

Con base en las características de la problemática estudiadas a lo largo de la investigación, se realiza la implementación de una metodología con un enfoque cualitativo y cuantitativo. Se realizó este proceso de selección debido a que la investigación cualitativa se utilizará para entender el proceso de hidrolización y fermentación de la cáscara de café y los efectos de las diferentes variables en el proceso, mientras que la investigación cuantitativa se utilizará para determinar la cantidad de bioetanol que se puede extraer de la cáscara de café.

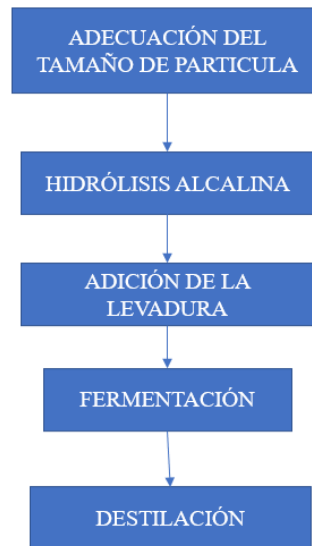
8.2 Método de investigación

Con base a los diferentes estudios revisados a lo largo del proyecto, 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.

A fines de ilustrar de forma clara el proceso, se presenta un diagrama de flujo en la figura 3.

Figura 3

Planteamiento general del proceso de laboratorio.



Nota: Elaboración propia.

8.2.1 Pretratamiento mediante hidrólisis alcalina

Las cáscaras de café utilizadas a lo largo del estudio son obtenidas de una planta local de procesamiento de café. Las cáscaras son molidas mediante un molinillo hasta alcanzar un tamaño de partícula de < 1 mm. Posteriormente se añaden 500 g de cáscara de café a un reactor que contiene 500 mL de NaOH 1M, para después agitar la mezcla. A continuación, el vaso de precipitado es sellado y posicionado en una autoclave a una temperatura de 121 °C por 20 minutos.

8.2.2 Adición de la levadura

La muestra obtenida del pretratamiento del café es dividida en volúmenes iguales en tres vasos de precipitado de 500 mL, con el fin de adicionar la levadura correspondiente a cada una de las muestras. En este caso se optó por recurrir a tres concentraciones diferentes de levadura en el proceso, siendo estas: 7,5%, 5% y 2,5% (donde el porcentaje es igual a la masa de levadura dividido el volumen de solución). Posteriormente se calcula la cantidad de levadura para el



volumen de cada muestra y se procede a pesar la cantidad en una balanza analítica, para culminar con la etapa se adiciona la levadura a la muestra.

8.2.3 Fermentación

Las cáscaras de café son transferidas a un vaso de precipitado de 500 mL, al vaso se adiciona la levadura (*Saccharomyces cerevisiae*) y seguidamente es agitado por 30 minutos. Posteriormente, el vaso de precipitado es colocado en una incubadora a 22 °C durante 72 horas. Transcurrido este tiempo se retiran los sólidos, utilizando un papel filtro y un Embudo Büchner para filtración al vacío.

8.2.4 Destilación

Para destilar el producto de la fase anterior, la temperatura debe ser superior a 70 °C, para que el etanol pueda ser destilado. Por encima de esta temperatura, se destila productos no deseados, teniendo en cuenta que la temperatura de ebullición del etanol es de 78 °C. Sin embargo, otros estudios afirman que puede llegar hasta los 85 °C.

Las cáscaras de café son dispuestas en balones de 250 mL o 500 mL que se colocan en una manta calefactora y se aumenta la temperatura hasta que se alcanza la temperatura necesaria para la destilación. Los vapores que se producen se recogen y condensan para obtener el producto final.

8.3 Tipo de investigación

El tipo de investigación para este proyecto es experimental. Esto se debe a que el investigador manipulará las variables del experimento, como la cantidad de agua utilizada, la temperatura del agua y el tiempo de fermentación. De este modo, el investigador podrá determinar las condiciones óptimas para la extracción de bioetanol de la cáscara de café.

9. Análisis de restricciones



Una vez que ha sido definida la metodología que se va a emplear para dar solución a la problemática seleccionada, véase: mejorar la eficiencia en los métodos de obtención del bioetanol a partir del mucílago de café para evitar sus vertimientos en los cuerpos de agua y las posteriores afectaciones a la salud y a los ecosistemas circundantes. Es necesario identificar las posibles dificultades que podrán presentarse a lo largo de la investigación y en la implementación de la solución en el contexto de Colombia, para esto es necesario definir las principales restricciones pueden afectar al proceso de obtención de bioetanol a partir de mucílago de café.

9.1 Restricciones ambientales

Las principales restricciones ambientales tienen relación con el uso de los suelos, el vertimiento de desechos a cuerpos de agua y las emisiones de GEI (gases de efectos invernadero) a la atmósfera. De esta manera, y tomando en cuenta que el proyecto se lleva a cabo en la ciudad de Bogotá, es necesario recurrir al SDA (Secretaría Distrital de Ambiente) siendo la entidad encargada de expedir las licencias ambientales pertinentes en la ciudad. De esta manera, las restricciones ambientales presentes en el proyecto serían las siguientes: primero, adquisición de una licencia ambiental que certifique a los proyectos que requieren un diagnóstico ambiental de alternativas. Segundo, permiso para vertimientos, debido a que a lo largo del proceso de transformación de mucílago de café a bioetanol se producen residuos que terminarán como aguas residuales o en los suelos, según sea el caso. Tercero, certificado de conservación ambiental, necesario en caso de que las actividades para la obtención del bioetanol atiendan contra la preservación de la fauna y flora locales. Cuarto, una modelación de emisiones con el objetivo de verificar el cumplimiento de las normas de emisiones, lo cual es indispensable para cuantificar el total de emisiones de GEI resultado de la implementación del proyecto.

9.2 Restricciones económicas



A lo largo de la experimentación se identificaron diferentes restricciones económicas para llevar a cabo la transformación del mucílago de café en bioetanol. Debido a que todo el proceso se ha llevado a cabo a nivel de laboratorio, se tomaron en cuenta los precios de los materiales y recursos utilizados y posteriormente se extrapoló al contexto macroeconómico.

Para empezar, se asume que la materia prima, véase el mucílago de café, puede ser obtenida sin ningún costo, puesto que se trata de un residuo no deseado de la industria cafetera y usualmente es vertido a los cuerpos de agua. Otras materias que son necesarias en los procesos de pretratamiento y fermentación del mucílago son: 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 tienen un costo elevado debido a su alta pureza, necesaria para asegurar resultados de laboratorio fiables al finalizar la investigación.

En segundo lugar, se toman en cuenta los costos de los equipos, calculados mediante el tiempo de operación y el costo de estos. El costo total, a nivel de laboratorio, fue de \$162,216 incluyendo cada uno de los equipos utilizados, así como la potencia de cada uno en Kilovatios-hora y la cantidad de agua necesaria para cada uno de los procesos y la limpieza de los aparatos de laboratorio. La información relacionada anteriormente se encuentra con mayor detalle en el Anexo 2.

Por último, se identifican los costos de mano de obra, transportes y costos imprevistos que pueden surgir a lo largo del proceso (guantes, tapabocas, marcadores, bolígrafos, etc.) Tomando en cuenta un salario mínimo de \$4,167 la hora, precio de Transmilenio de \$5,300 (ida y vuelta) y gastos imprevistos de \$3,000 se estima un aproximado de \$148,523 a lo largo de toda la experimentación.



Con base en la información anterior es posible establecer las siguientes restricciones económicas: primero, a pesar de que el mucílago de café no tenga un costo fijo, es necesario cuantificar los costos relacionados con la recolección, transporte y almacenamiento a nivel macroeconómico. Segundo, otras materias primas como la levadura *Saccharomyces cerevisiae*, el hidróxido de sodio y el sulfito de sodio poseen costes elevados que podrían afectar significativamente el proceso de obtención de bioetanol, por tal motivo, es necesario encontrar sustitutos a estos reactivos a nivel industrial, los cuales permitan obtener bioetanol de calidad a un precio más económico. Tercero, lo que respecta a la mano de obra y los gastos de transporte se encuentran fuertemente regulados a nivel industrial, por lo tanto, los trabajadores recibirán un pago superior al salario mínimo legal vigente, además de una ARL y EPS en caso de ser necesario, mientras que los gastos de transporte correrán por cuenta de los individuos, así mismo, los gastos de imprevistos resultaron ser menores a lo esperado, dicho esto, si el proceso requiere de un alto volumen de trabajadores es posible que la inversión no llegue a superar las ganancias a nivel empresarial.

Finalmente, los precios del bioetanol se encuentran en constante cambio, dependiendo de la fuente de origen y la calidad de este, por lo tanto, la última barrera económica se encontraría en que el bioetanol a base de mucílago de café sea competitivo en el mercado colombiano con una calidad similar al bioetanol a base de caña de azúcar y a base de maíz y que además tenga un precio que permita solventar todos los gastos anteriormente descritos.

9.3 Restricciones legales

La UPME (Unidad de Planeación Minero-Energéticas) y el Ministerio de Minas y Energías establecen las principales leyes, que deben cumplirse con respecto a la producción, calidad y comercialización del bioetanol en territorio colombiano. De acuerdo con estas leyes es posible



establecer las restricciones legales que podrán aparecer a futuro, siendo las leyes que tienen mayor impacto en el proyecto las siguientes:

- LEY 693 DE 2001 “Por la cual se dictan normas sobre el uso de alcoholes carburantes, se crean estímulos para su producción, comercialización y consumo, y se dictan otras disposiciones.” El párrafo 1 especifica que la calidad y cantidad del etanol carburante en biocombustibles serán establecidos por el Ministerio de Minas y Energías. Por tanto, es imperioso seguir dichos lineamientos con el objetivo de que el bioetanol obtenido cumpla con los estándares de calidad.
- RESOLUCIÓN No. 18 0687 DE JUNIO 17 DE 2003 “Por la cual se expide la regulación técnica prevista en la Ley 693 de 2001, en relación con la producción, acopio, distribución y puntos de mezcla de los alcoholes carburantes y su uso en los combustibles nacionales e importados.” El título 3 expone los porcentajes específicos admitidos por los Ministerios de Minas y Energías, de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial que deberán ser utilizados en las mezclas de gasolina y bioetanol. Esto limita el alcance del bioetanol a base de mucílago en el mercado colombiano.
- LEY 939 DE 2004 “por medio de la cual se subsanan los vicios de procedimiento en que incurrió en el trámite de la Ley 818 de 2003 y se estimula la producción y comercialización de biocombustibles de origen vegetal o animal para uso en Motores Diesel y se dictan otras disposiciones.” El artículo 7 señala que los biocombustibles podrán ser utilizados en motores Diesel según reglamentación. Lo anterior abre la posibilidad a realizar más experimentaciones con el objetivo de



obtener un bioetanol con los parámetros necesarios para que no perjudique los motores Diesel y permita una combustión correcta.

- RESOLUCIÓN No. 18 1069 DE AGOSTO 18 DE 2005 “Por la cual se modifica la Resolución 18 0687 del 17 de junio de 2003 y se establecen otras disposiciones” En el artículo 4 se establece que los productores de alcohol carburante deberán obtener un certificado de conformidad, así como las licencias, permisos y/o autorizaciones emitidas por la Autoridad Ambiental Competente. En caso de no contar con estos documentos, la aplicación del proyecto a nivel industrial no será posible.
- RESOLUCIÓN No. 789 DE SEPTIEMBRE 20 de 2016 “Por la cual se modifica la Resolución 898 de 1995 en lo relacionado con los parámetros y requisitos de calidad del Etanol Anhidro Combustible y Etanol Anhidro Combustible Desnaturalizado utilizado como componente oxigenante de gasolinas y se dictan otras disposiciones.” La cual establece las mezclas con bioetanol como riesgo ALTO para la salud pública y la protección ambiental y, por tanto, los productores de biocombustibles deberán contar con una certificación de conformidad de producto de tercera parte. Quienes no cuenten con esta certificación no podrán continuar con sus actividades.

9.4 Restricciones de salud y seguridad

Como ya se ha definido a lo largo de la investigación, los pasos necesarios para la obtención del mucílago de café son: extracción del mucílago de los granos de café, fermentación del mucílago mediante la presencia de levaduras y la purificación del bioetanol mediante el proceso de destilación. De forma general, ninguno de estos procesos origina riesgos elevados para la salud de los implicados, las comunidades o el medio ambiente, sin embargo, el bioetanol



obtenido como producto final debe ser manejado con cuidados más rigurosos que los de la gasolina tradicional.

Por un lado, el bioetanol es miscible en el agua, a diferencia de otros combustibles como lo son el biodiesel y la gasolina, lo que dificulta sobremanera su recuperación en caso de vertimientos sobre cuerpos de agua, además la mezcla de agua y bioetanol puede llegar altamente corrosiva, lo que incrementa los cuidados que se deben tener al momento de almacenar y transportar el bioetanol en contenedores metálicos.

Por otra parte, la empresa LEA Consultores en Ingeniería de Riesgos y Valuaciones (2018) afirma que el bioetanol es altamente inflamable y su combustión genera humo no perceptible para el ojo humano, sumado a lo anterior, incluso una mezcla de 10% de bioetanol en agua puede llegar a ser inflamable, razón por la cual en caso de combustión el personal de bomberos debe utilizar espumas especiales tipo ATC (Alcohol Type Concentrate) a diferencia de los AFFF (Aqueous Film-Forming Foam) utilizados en extintores convencionales, siendo que se requiere de entre dos y cuatro veces más cantidad de espuma para extinguir un incendio de bioetanol que uno de gasolina.

9.5 Restricciones socioculturales

De acuerdo con el Artículo 5 de la Ley 1715 de 2014 Por medio de la cual se regula la integración de las energías renovables no convencionales al Sistema Energético Nacional. Se considera a la energía de biomasa como toda fuente de energía que sea obtenida de la degradación espontánea o inducida de cualquier tipo de materia orgánica que ha tenido su origen inmediato como consecuencia de un proceso biológico (Congreso de Colombia, 2014).

Continuando esta idea, el bioetanol es considerado como una fuente de energía renovable en el territorio y el Gobierno Nacional fomenta su producción y comercialización de acuerdo a lo



establecido en la COP 21, así mismo la UPME (Unidad de Planeación Minero Energética) en conjunto con el Ministerio de Minas y Energías han establecido una serie de incentivos tributarios enfocados en la proliferación de las FNCER (Fuentes No Convencionales de Energías Renovables) para que los colombianos puedan recibir beneficios económicos mediante la producción de biocombustibles como lo es el bioetanol.

De igual forma, la participación de los biocombustibles en el proceso de la transición energética se relaciona con el Plan de Acción Indicativo del Programa de Uso Racional de Energía (PAI-Proure) 2021-2030, que define la hoja de ruta para el uso de biocombustibles en el sector transporte. Durante el 2021 el consumo de bioetanol llegó 380 millones de litros a nivel nacional y se estima que la demanda mundial de biocombustibles crecerá un 28% de 2021 a 2026, así mismo, las proyecciones reflejan que la industria de los biocombustibles es generadora de empleos y estimula el crecimiento económico. (SOCIEDAD DE AGRICULTORES DE COLOMBIA, 2022)

Dicho todo lo anterior, no se identificaron restricciones socioculturales para la implementación de la solución en territorio colombiano, por un lado, el Gobierno Nacional fomenta la producción de bioetanol al punto de implementar incentivos tributarios, mientras que lo que concierne a las cifras el consumo de bioetanol ha crecido exponencialmente en los últimos años, lo cual quiere decir que no se evidencia una negativa en cuanto a la transición hacia los biocombustibles. Con base en esto, la solución planteada continuaría la tendencia de la producción de biocombustibles en el país, con el valor agregado de emplear como materia prima un residuo en la producción del café.

10. Análisis de resultados

Los procedimientos experimentales realizados en el laboratorio para la solución de la problemática planteada en el proyecto permitieron la identificación y estandarización de los



comportamientos y hallazgos que favorecen a la comprensión de las variables óptimas para la producción de bioetanol partiendo de mucílago de café como materia prima, este caso se realizaron 18 pruebas donde se variaron las condiciones de pH, concentración de levadura y la implementación o no de un pretratamiento de la materia prima.

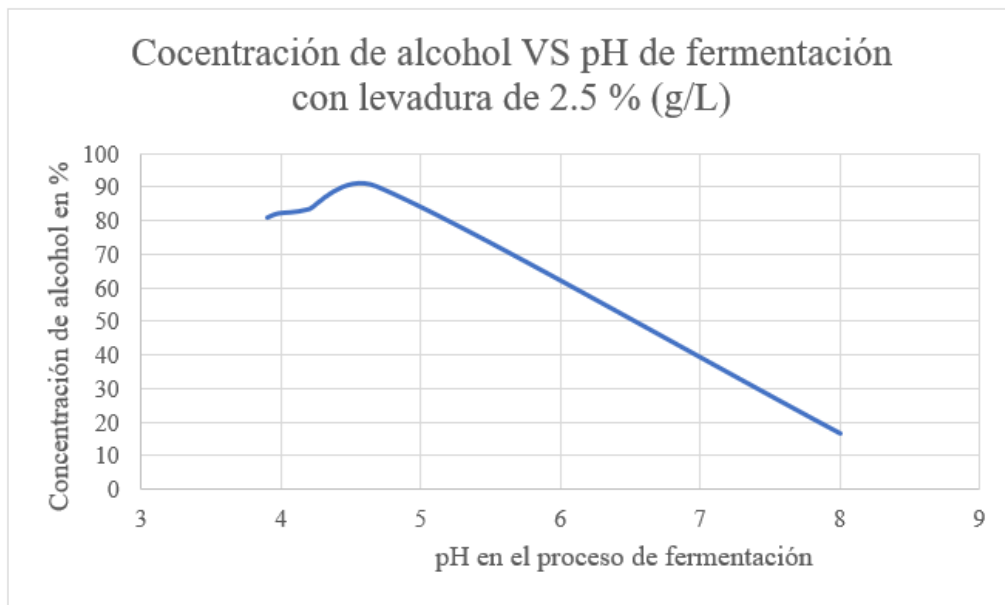
10.1 Análisis de la influencia del pH en el proceso de elaboración de Bioetanol

En la implementación de las 18 pruebas, donde se evaluaron diferentes valores de pH, se evidencia que el pH en el proceso de fermentación es un factor determinante en la concentración final de bioetanol, ya que al validar los resultados de las pruebas se determina que los valores de pH ácido son más prometedores que los valores de pH básico, en este caso los mejores resultados en cuanto a concentración final de alcohol se obtuvieron con un pH entre 3,9 y 4,8. Puesto que de las 18 pruebas realizadas, 10 presentan resultados con concentraciones de alcohol superiores al 50%.

En este caso, al realizar el análisis de las pruebas realizadas con una adición de levadura del 2,5 % (gramos de levadura por cada 100 mililitros de solución), se puede observar que al manejar pH entre 3,9 y 4,68 se obtienen concentraciones finales de alcohol entre el 80% y el 90%, mientras que al manejar pH de 8 en adelante se obtienen concentraciones inferiores al 17%. Dicho lo anterior, si se trabajan con pH superior al 4,68, la concentración de alcohol comienza a decrecer, los resultados descritos anteriormente se pueden apreciar en la Figura 4. Se puede deducir que el rango óptimo de pH en el cual se debe realizar el proceso de fermentación corresponde a valores entre 3,9 y 4,68, manejando una concentración de levadura de 2,5%.

Figura 4

Evaluación de la influencia del pH en soluciones con 2,5% de levadura.



Nota: Elaboración propia.

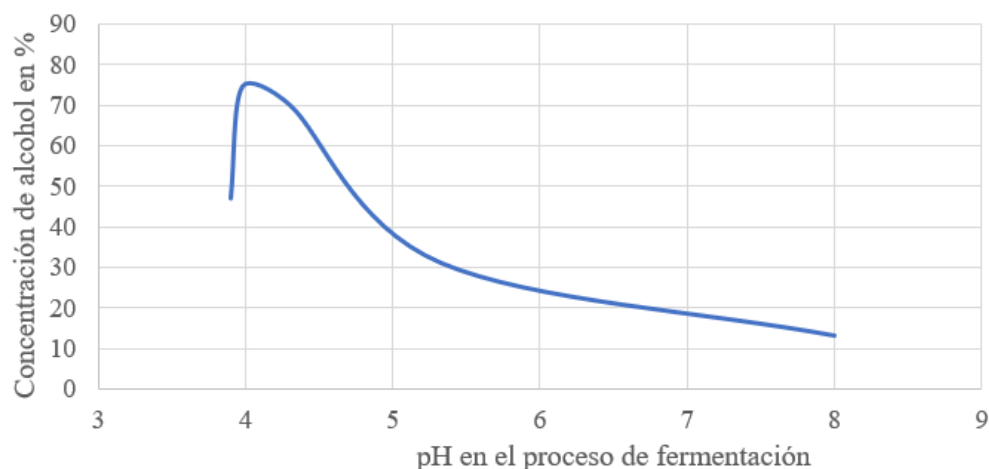
Continuando con el análisis de la influencia del pH, se evidencia que al realizar el análisis de las pruebas realizadas con una adición de levadura del 5,0 % (gramos de levadura por cada 100 mililitros de solución), se puede observar que al manejar pH entre 3,98 y 4,72 se obtienen concentraciones finales de alcohol entre el 80% y el 85%. Por otra parte, al manejar pH superiores a 5 e inferiores a 8 la concentración de alcohol se reduce aproximadamente una cuarta parte, ya que se obtienen concentraciones inferiores al 27%, mientras que al manejar pH superior a 8, se obtienen concentraciones inferiores al 13%, es decir que si se trabajan con pH superiores a 5 la concentración de alcohol comienza a decrecer rápidamente. Los resultados descritos anteriormente se pueden apreciar en la Figura 5. Se puede deducir que el rango óptimo de pH en el cual se debe realizar el proceso de fermentación corresponde a valores entre 3,98 y 4,72, manejando una concentración de levadura de 5,0%.

Figura 5

Evaluación de la influencia del pH en soluciones con 5.0% de levadura.



Cocentración de alcohol VS pH de fermentación con levadura de 5 % (g/L)

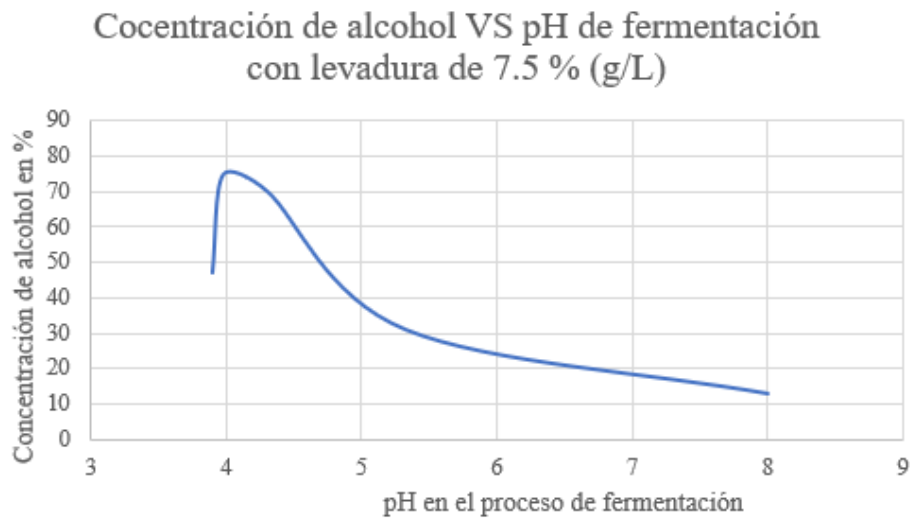


Nota: Elaboración propia.

Para finalizar este estudio de pH en las diferentes concentraciones de levadura, se evidencia que al realizar el análisis de las pruebas realizadas con una adición de levadura del 7.5 % (gramos de levadura por cada 100 mililitros de solución), se puede observar que al manejar pH entre 3,98 y 4,3 se obtienen concentraciones finales de alcohol entre el 70% y el 75%. Sin embargo, al manejar un pH superior a 5 e inferior a 3,98 la concentración de alcohol se reduce aproximadamente un 30% ya que se obtienen concentraciones inferiores al 47%, mientras que al manejar pH superior a 8 se obtienen concentraciones inferiores al 13%, es decir que si se trabajan con pH superiores a 4,3 la concentración de alcohol comienza a decrecer rápidamente. Los resultados descritos anteriormente se pueden apreciar en la Figura 6. Se puede deducir que el rango óptimo de pH en el cual se debe realizar el proceso de fermentación corresponde a valores entre 3,98 y 4,3, manejando una concentración de levadura de 7,5%.

Figura 6

Evaluación de la influencia del pH en soluciones con 7,5% de levadura.



Nota: Elaboración propia.

Como se puede apreciar a lo largo de las pruebas realizadas para la validación de la influencia de pH en el proceso de obtención de bioetanol partiendo de mucílago de café, se determina que el pH influye drásticamente en el proceso de fermentación, ya que manejando pH entre 3,98 y 4,72 las levaduras aumentan su capacidad de trabajo y pueden aumentar la concentración drásticamente de etanol en la solución, por lo tanto, para obtener bioetanol con concentraciones superiores al 70% es necesario manejar un pH ácido con un valor que se encuentre entre 3,98 y 4,72.

10.2 Análisis de la influencia de la concentración de levadura en la solución rica en azúcares

En la implementación de los 5 grupos de pruebas donde se evaluaron diferentes valores de concentración de la levadura en el proceso de fermentación, se evidencia que la concentración de la levadura es un factor determinante en el rendimiento de obtención de bioetanol, ya que al validar los resultados de las pruebas se determina que los resultados arrojados con una concentración de 2,5% de levadura son más prometedores que las concentraciones del 5% y el 7,5% (gramos de levadura por cada 100 mililitros de solución), en este caso de los 5 grupos de



pruebas realizadas se obtiene que en 4 grupos de pruebas el rendimiento es más alto al manejar concentraciones de 2,5% de levadura.

En primera instancia se cuenta con el grupo de muestras a las cuales se les realizó un proceso de pretratamiento en la autoclave durante 2 horas y a 90 °C manteniendo pH básico. En este caso al manejar un pH básico la concentración de alcohol es despreciable, por lo tanto, el rendimiento es nulo. Por otra parte, al realizar una réplica de la prueba con un pH ácido, se obtiene un rendimiento del 11% para la concentración de 2,5%, mientras que para una concentración del 5% el rendimiento es de un 9% y para una concentración del 7,5% el rendimiento es del 5%. Como se puede observar, el mejor rendimiento se obtiene con una concentración de 2,5 gramos de levadura por cada 100 mililitros de solución.

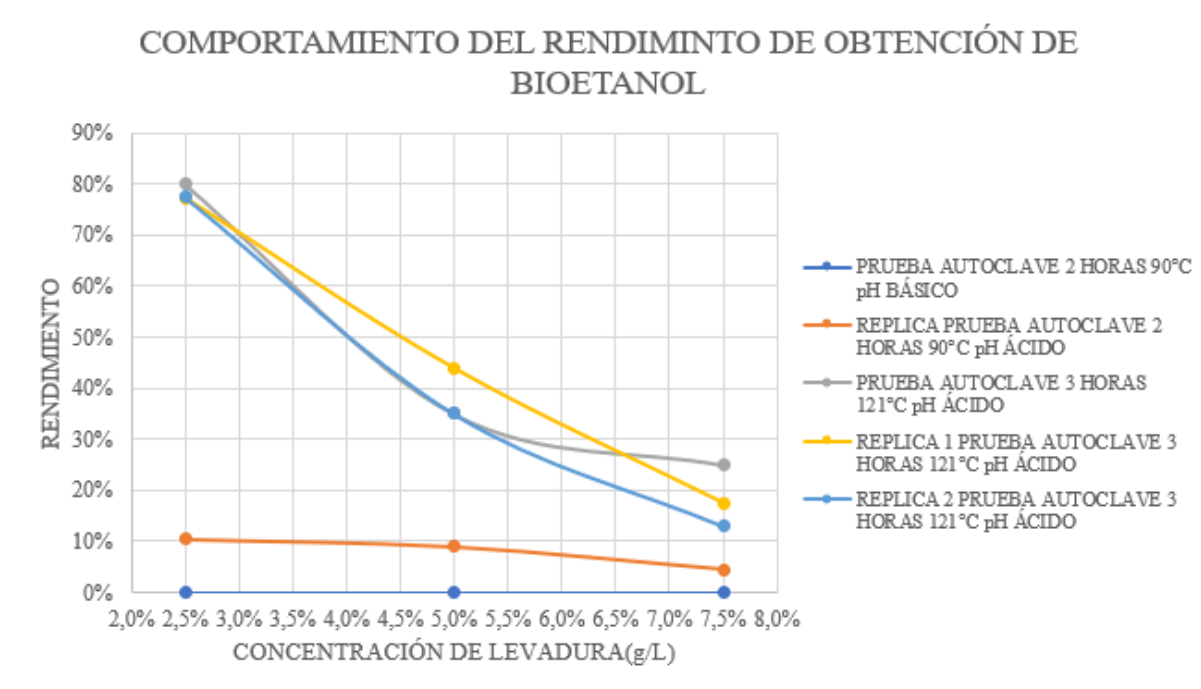
Por otra parte, el grupo de muestras a las cuales se les realizó un proceso de pretratamiento en la autoclave durante 3 horas y a 121 °C manteniendo pH ácido, demostraron un rendimiento del 80% para la concentración de 2,5%, mientras que para una concentración del 5% el rendimiento es de un 35% y para una concentración del 7,5% el rendimiento es del 25%. Al realizar una réplica con las mismas condiciones se obtiene que el mayor rendimiento se reporta para la concentración del 2,5% de levadura porque cuenta con un rendimiento del 77% mientras que la de 5% y 7,5% tienen rendimientos del 44% y el 18% respectivamente.

Para finalizar el proceso de la validación, se realizó una segunda réplica a las condiciones de pretratamiento en la autoclave durante 3 horas y a 121 °C manteniendo pH ácido. Esta réplica arrojó resultados de rendimiento de 78% con una concentración del 2,5% de levadura, para una concentración del 5% el rendimiento es del 35% y para una concentración del 7,5% el rendimiento es del 13%. Los datos anteriormente descritos se pueden apreciar en la figura 7.

Figura 7



Evaluación de la influencia de la concentración de levadura en el rendimiento de obtención de bioetanol.



Nota: Elaboración propia.

Como se puede apreciar a lo largo de las pruebas realizadas para la validación de la influencia de la concentración de levadura en el proceso de obtención de bioetanol partiendo de mucílago de café, se determinó que la concentración de la levadura influye drásticamente en el proceso de fermentación, ya que manejando una concentración de 2,5 gramos de levadura por cada 100 mililitros de solución, las levaduras pueden trabajar cómodamente en un ambiente óptimo, lo cual repercute en que aumente la concentración de etanol drásticamente en la solución, produciendo rendimientos superiores al 70%, por lo tanto, se puede inferir que para obtener rendimientos superiores al 75% es necesario manejar valores iguales o inferiores a 2,5 gramos de levadura por cada 100 mililitros de solución.



10.3 Análisis de la influencia del pretratamiento del mucílago de café en la obtención de bioetanol

La implementación de las pruebas donde se evalúa la necesidad de un proceso de pretratamiento en el mucílago de café evidencia que al realizar dicho pretratamiento al mucílago de café la concentración de etanol obtenido es en extremo superior. El proceso de pretratamiento se realizó mediante una hidrólisis básica donde la obtención de bioetanol se vio maximizada en casi 13 veces, en este caso se evidencia que los mejores resultados de pretratamiento se deben realizar en la autoclave a 121 °C durante 3 horas.

En primer lugar, al realizar las pruebas de fermentación sin realizar un pretratamiento al mucílago de café no se obtuvo bioetanol, ya que la cantidad de azúcares reductores presentes en la solución no eran los suficientes para que la levadura aumentara su tamaño y alcanzara su máximo rendimiento. Por otra parte, al realizar el primer proceso de pretratamiento, el cual consistía en realizar una hidrólisis básica al 90 °C durante 2 horas en una autoclave, los resultados que arroja esta prueba son prometedores, ya que se logró obtener 12 veces más azúcares reductores en la solución debido a la ruptura de las moléculas como la lignocelulosa y la celulosa presente en el mucílago de café, lo cual permite el crecimiento adecuado de las levaduras. Sin embargo, al realizar la hidrólisis básica a 121 °C durante 3 horas en la autoclave las cantidades de azúcares reductores se maximiza y se obtienen mejores resultados en el proceso, ya que las pruebas realizadas con este método de pretratamiento alcanzaron rendimientos del 80% y concentración del 90% de alcohol. Además, el alcohol destilado generó una reacción de combustión al momento de acercarle una fuente de calor externa. Estos resultados se pueden encontrar en la tabla 3.

Tabla 3

Resumen de las pruebas realizadas en el laboratorio con tiempo de fermentación de 72 horas.



| MUESTRA | GRADOS BRIX INICIALES | % DE LEVADURA (g/L) | pH | GRADOS BRIX FINALES | PORCENTAJE DE ALCOHOL | MASA INICIAL (g) | VOLUMEN INICIAL (mL) | VOLUMEN DESTILADO (mL) | COMBUSTIÓN | RENDIMIENTO (ml etanol/ g de materia prima) |
|--|-----------------------|---------------------|------|---------------------|-----------------------|------------------|----------------------|------------------------|------------|---|
| PRUEBA SIN PRETRATAMIENTO | | | | | | | | | | |
| 1 | 1 | 2,5% | 7,0 | 1 | 0% | 333 | 400 | 0 | NO | 0% |
| 2 | 1 | 5,0% | 7,0 | 1 | 0% | 333 | 400 | 0 | NO | 0% |
| 3 | 1 | 7,5% | 7,0 | 1 | 0% | 333 | 400 | 0 | NO | 0% |
| PRUEBA AUTOCLAVE 2 HORAS 90 °C | | | | | | | | | | |
| 4 | 6 | 2,5% | 8,0 | 6 | 16,44 | 150 | 330 | 0 | NO | 0% |
| 5 | 6 | 5,0% | 8,0 | 4 | 12,99 | 150 | 330 | 0 | NO | 0% |
| 6 | 6 | 7,5% | 8,0 | 4 | 12,99 | 150 | 330 | 0 | NO | 0% |
| PRUEBA AUTOCLAVE 2 HORAS 90 °C REPLICAS | | | | | | | | | | |
| 7 | 13 | 2,5% | 4,2 | 20,1 | 83,23 | 333 | 400 | 35 | NO | 11% |
| 8 | 13 | 5,0% | 4,3 | 19 | 70,15 | 333 | 400 | 30 | SI | 9% |
| 9 | 13 | 7,5% | 4,7 | 20,05 | 82,59 | 333 | 400 | 15 | SI | 5% |
| PRUEBA AUTOCLAVE 3 HORAS 121 °C | | | | | | | | | | |
| 10 | 12 | 2,5% | 4,68 | 20,6 | 90 | 100 | 300 | 80 | SI | 80% |
| 11 | 12 | 5,0% | 5,33 | 13,4 | 30,94 | 100 | 300 | 35 | SI | 35% |
| 12 | 12 | 7,5% | 5,18 | 12,2 | 26,92 | 100 | 300 | 25 | SI | 25% |
| PRUEBA AUTOCLAVE 3 HORAS 121 °C RÉPLICA 1 | | | | | | | | | | |
| 13 | 10 | 2,5% | 3,9 | 19,9 | 80,69 | 57 | 400 | 44 | SI | 77% |
| 14 | 10 | 5,0% | 3,9 | 16,4 | 46,95 | 57 | 400 | 25 | SI | 44% |
| 15 | 10 | 7,5% | 4,1 | 20,2 | 84,52 | 57 | 400 | 10 | SI | 18% |
| PRUEBA AUTOCLAVE 3 HORAS 121 °C RÉPLICA 2 | | | | | | | | | | |
| 16 | 10 | 2,5% | 3,98 | 20 | 81,95 | 40 | 500 | 31 | SI | 78% |
| 17 | 10 | 5,0% | 3,98 | 19,4 | 74,66 | 40 | 500 | 14 | SI | 35% |
| 18 | 10 | 7,5% | 3,98 | 20,2 | 84,52 | 40 | 500 | 5 | SI | 13% |

Nota: Elaboración propia.

11. Análisis de impactos

Para el análisis de impactos se toma en cuenta cada una de las actividades llevadas a cabo a lo largo del proceso de investigación para obtener el bioetanol a partir del mucílago de café, así mismo, cada una de estas actividades poseen sus respectivos aspectos e impactos dentro del marco de la sostenibilidad, es decir, se analizaron sus impactos a nivel ambiental, social y económico. El análisis de impactos se encuentra estructurado en la Tabla 4.

Tabla 4

Análisis de impactos de la obtención de bioetanol a partir del mucílago de café.

| Actividad | Aspecto | Impacto |
|-----------|---------|---------|
|-----------|---------|---------|



| | | |
|--|-----------------------------|---|
| Obtención de la cascarilla de café | Consumo de energía | Reducción del recurso hídrico |
| | Consumo de agua | Contaminación de las fuentes hídricas |
| Transporte a las instalaciones | Emisiones de GEI | Contaminación del aire |
| | | Daño a la capa de ozono |
| | Uso de envases plásticos | Contaminación de suelo/agua |
| | | Daños a la fauna y flora |
| Consumo de combustible | Reducción del presupuesto | |
| Manejo de materiales biológicos | Potencial derrame | Reducción del recurso natural |
| | | Contaminación del suelo/agua |
| | | Riesgo a la salud |
| Refrigeración de la cascarilla de café | | Reducción de la calidad del aire |
| Licuado de la cascarilla de café | Consumo de energía | Reducción del recurso hídrico |
| | Uso de equipos/materiales | Riesgo a la integridad física |
| Filtrado del mucílago | Uso de filtros desechables | Reducción de los recursos naturales |
| | | Contaminación de suelo/agua |
| | | Pérdida de la biodiversidad |
| | | Reducción del presupuesto |
| | Generación de vertimientos | Daños a la fauna y flora |
| | | Contaminación de las fuentes hídricas |
| | Riesgos a la salud | |
| | Pérdida de la biodiversidad | |
| Fermentación del mucílago | Uso de levadura | Reducción del recurso/presupuesto |
| | Uso de envases plásticos | Contaminación de suelo/agua |
| | | Daños a la fauna y flora |
| | | Pérdida de la biodiversidad |
| | Reducción del presupuesto | |
| Destilación del bioetanol | Generación de agua caliente | Cambios en el pH de los cuerpos de agua |
| | | Daños a la fauna y flora |
| | Uso de equipos/materiales | Riesgo a la integridad física |



| | | |
|---------------------------------------|--------------------------|--|
| | Consumo de energía | Reducción del recurso hídrico |
| | Consumo de agua | Contaminación de las fuentes hídricas |
| Envasado y conservación del bioetanol | Consumo de energía | Reducción del recurso hídrico |
| | Uso de envases plásticos | Contaminación de suelo/agua |
| | | Daños a la fauna y flora |
| Pruebas de combustión | Emisiones de GEI | Reducción del presupuesto |
| | | Contaminación del aire |
| | Uso de mechero | Daño a la capa de ozono |
| | | Riesgo por quemaduras |
| | | Riesgo por inhalación de gases nocivos |
| | | Reducción del presupuesto |

Nota: Elaboración propia.

12. Análisis de costos

En cuanto al análisis de costos, es necesario realizar un escalamiento del proceso de nivel de laboratorio a nivel industrial, para ello es necesario resaltar que se debe establecer un porcentaje de participación en el mercado nacional. Para este caso, según la base de datos EMIS pro, el consumo promedio en Colombia de bioetanol es de 544,25 millones de litros, tomando como referencia los datos de consumo desde el año 2014 hasta el 2021. Esta cifra puede considerarse muy elevada, sin embargo, en Colombia existe la empresa Bioenergy, la cual es capaz de suministrar el 25% del consumo de bioetanol en el país.

Con base en la información anterior y teniendo en cuenta que el sector de interés de este estudio es el municipio de Pitalito, Huila, es necesario evaluar la cantidad de bioetanol que se puede producir partiendo de la cantidad de mucílago de café en el municipio, en este caso Pitalito produce cerca de 141,3 millones de toneladas de mucílago al año. Tomando como referencia que al procesar semejante cantidad de mucílago al año se requiere de una empresa con una inversión



muy alta, por tanto, se establece que se debe destinar el 10% de estos residuos para así generar el bioetanol necesario para cubrir el 0.25% del mercado nacional.

Tomando como referencia el dato anterior, es necesario realizar una aproximación, los costos de producción y de transporte de la materia prima, y el coste del producto final. En este caso, se realiza un análisis del costo mensual de la materia prima, la amortización mensual de los equipos de producción, el costo mensual de los servicios y el costo del personal o mano de obra. Los resultados obtenidos del análisis anterior se presentan en la Tabla 5.

Tabla 5

Costos del proceso de producción de Bioetanol.

| COSTO MATERIA PRIMA MENSUAL | | | |
|-----------------------------|----------------|------------|----------------------------------|
| Materia Prima | Cantidad (Kg) | Costo (Kg) | Costo total en Pesos Colombianos |
| Mucilago de café | 141.732 | \$ 3.000 | \$ 425.195.313 |
| NAOH | 1.417 | \$ 130.000 | \$ 184.251.302 |
| Levadura | 3.543 | \$ 37.000 | \$ 131.101.888 |
| COSTO EQUIPOS MENSUAL | | | |
| Equipo | Costo | Vida Util | 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 | Costo total en Pesos Colombianos |
| Agua (L) | 202.474 | \$ 45 | \$ 9.111.328 |
| Residuos | 42.520 | \$ 100 | \$ 4.251.953 |
| Electricidad (Kwh) | 23.760 | \$ 620 | \$ 14.731.200 |
| Arriendo Fabrica | N/A | N/A | \$ 164.256.034 |
| Trasporte | N/A | N/A | \$ 59.728.704 |
| COSTO PERSONAL | | | |
| PERSONAL | | \$ | 495.089.417 |
| COSTO TOTAL | | \$ | 1.489.520.204 |

Nota: Elaboración propia.

Como se puede observar el proyecto tiene un costo total mensual de \$1 489 520 204 pesos, pero es de resaltar que las ventas por la producción mensual de bioetanol para cubrir con el 0.25% del mercado son de \$ 1 559 799 383 pesos, por lo tanto, en este instante el proyecto es viable, ya que permite generar los suficientes ingresos para cubrir poco más de los gastos, sin embargo, para



poder cubrir esta porción de mercado es necesario realizar una inversión inicial de \$ 21 876 988 018 pesos, para realizar una inversión de esta magnitud es necesario realizar un análisis económico con más profundidad, puesto que es necesario conocer la utilidad neta del proyecto, las ganancias por la venta del producto, los gastos fijo del periodo de producción, entre otros valores. En este caso, al realizar el balance general del proyecto se obtuvieron los siguientes balances ejemplificados en la Tabla 6, escalando el proyecto 5 años a partir del 2022.

Tabla 6

Estado de resultados de producción de Bioetanol.

| ESTADO DE RESULTADOS | | | | | |
|-----------------------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|
| | 2022 | 2023 | 2024 | 2025 | 2026 |
| VENTAS | \$ 18.717.641.906,25 | \$ 21.207.088.279,78 | \$ 24.027.631.020,99 | \$ 27.223.305.946,78 | \$ 30.844.005.637,71 |
| COSTO VENTAS | \$ 1.420.492.500,00 | \$ 1.601.605.293,75 | \$ 1.805.809.968,70 | \$ 2.036.050.739,71 | \$ 2.295.647.209,03 |
| UTILIDAD BRUTA | \$ 17.297.149.406,25 | \$ 19.605.482.986,03 | \$ 22.221.821.052,29 | \$ 25.187.255.207,07 | \$ 28.548.358.428,68 |
| GASTOS ADITIVOS Y VTAS | \$ 7.893.062.899,81 | \$ 8.129.854.786,80 | \$ 8.373.750.430,41 | \$ 8.624.962.943,32 | \$ 8.883.711.831,62 |
| GASTOS FIJOS DEL PERIODO | \$ 1.143.601.884,00 | \$ 1.177.909.940,52 | \$ 1.213.247.238,74 | \$ 1.249.644.655,90 | \$ 1.287.133.995,57 |
| OTROS GASTOS | \$ 60.000.000,00 | \$ 61.500.000,00 | \$ 63.037.500,00 | \$ 64.613.437,50 | \$ 66.228.773,44 |
| DEPRECIACIÓN | \$ 1.158.467.943,90 | \$ 1.158.467.943,90 | \$ 1.158.467.943,90 | \$ 1.158.467.943,90 | \$ 1.158.467.943,90 |
| UTILIDAD OPERATIVA | \$ 7.042.016.678,54 | \$ 9.077.750.314,81 | \$ 11.413.317.939,25 | \$ 14.089.566.226,45 | \$ 17.152.815.884,15 |
| GASTOS FINANCIEROS | \$ 3.522.195.071,03 | \$ 3.075.931.461,91 | \$ 2.527.027.222,68 | \$ 1.851.875.008,44 | \$ 1.021.437.784,93 |
| UTILIDAD ANTES DE IMPTOS | \$ 3.519.821.607,51 | \$ 6.001.818.852,90 | \$ 8.886.290.716,56 | \$ 12.237.691.218,01 | \$ 16.131.378.099,22 |
| IMPUESTOS | \$ 668.766.105,43 | \$ 1.140.345.582,05 | \$ 1.688.395.236,15 | \$ 2.325.161.331,42 | \$ 3.064.961.838,85 |
| UTILIDAD NETA | \$ 2.851.055.502,08 | \$ 4.861.473.270,85 | \$ 7.197.895.480,41 | \$ 9.912.529.886,59 | \$ 13.066.416.260,37 |

Nota: Elaboración propia.

Con base en el estado de resultados, donde se puede apreciar la utilidad neta año por año del proyecto, los costos operativos, las ventas y tomando como referencia una Tasa mínima de rentabilidad esperada por los emprendedores (TMR) del 20% se obtiene que la Tasa Interna de Retorno (TIR) del proyecto es del 26.46% cumpliendo con el objetivo de determinar la viabilidad



del proyecto. Adicionalmente, el análisis también permitió estimar el valor de los activos, pasivos y del patrimonio total del proyecto, los resultados se muestran en la Tabla 7 y en la Tabla 8.

Tabla 7

Pasivos de producción de Bioetanol.

| PASIVO | | | | | | |
|--------------------------|----------------------|----------------------|----------------------|---------------------|---------------------|---------------------|
| Año | 0 | 2022 | 2023 | 2024 | 2025 | 2026 |
| Impuestos X Pagar | \$ - | \$ 668.766.105,43 | \$ 1.140.345.582,05 | \$ 1.688.395.236,15 | \$ 2.325.161.331,42 | \$ 3.064.961.838,85 |
| TOTAL PASIVO CORRIENTE | \$ - | \$ 668.766.105,43 | \$ 1.140.345.582,05 | \$ 1.688.395.236,15 | \$ 2.325.161.331,42 | \$ 3.064.961.838,85 |
| Obligaciones Financieras | \$ 15.313.891.613,17 | \$ 13.373.615.051,76 | \$ 10.987.074.881,24 | \$ 8.051.630.471,49 | \$ 4.441.033.847,50 | \$ - |
| PASIVO | \$ 15.313.891.613,17 | \$ 14.042.381.157,19 | \$ 12.127.420.463,29 | \$ 9.740.025.707,64 | \$ 6.766.195.178,93 | \$ 3.064.961.838,85 |

Nota: Elaboración propia.

Tabla 8

Activos de producción de Bioetanol.

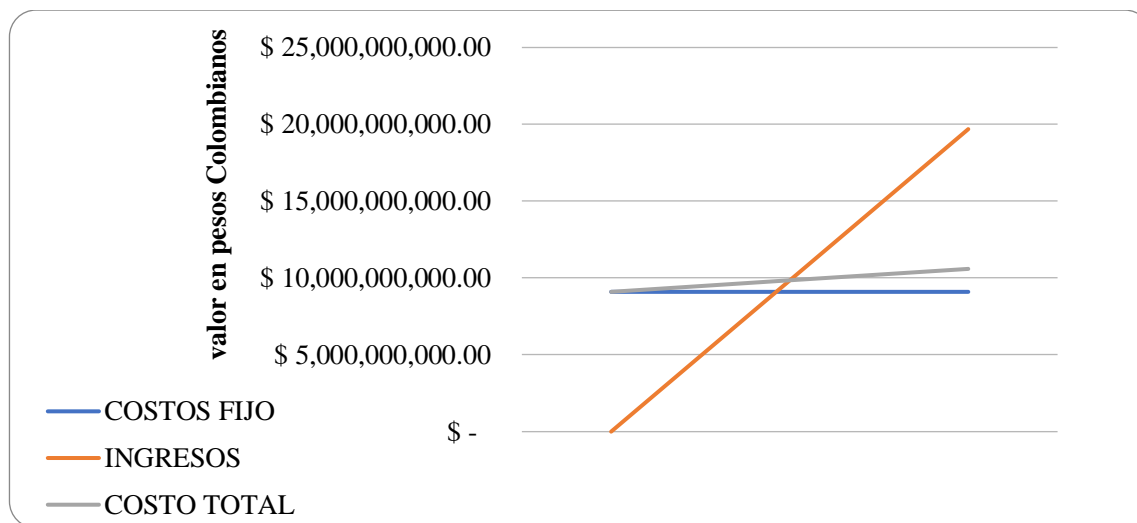
| ACTIVO | | | | | | |
|---------------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|
| Año | 0 | 2022 | 2023 | 2024 | 2025 | 2026 |
| CAJA/BANCOS | \$ 10.517.157.283,81 | \$ 13.255.170.273,82 | \$ 14.509.095.292,58 | \$ 15.616.590.690,40 | \$ 16.515.862.511,76 | \$ 17.126.983.489,36 |
| FIJO NO DEPRECIABLE | \$ - | \$ - | \$ - | \$ - | \$ - | \$ - |
| FIJO DEPRECIABLE | \$ 11.359.830.735,00 | \$ 11.359.830.735,00 | \$ 11.359.830.735,00 | \$ 11.359.830.735,00 | \$ 11.359.830.735,00 | \$ 11.359.830.735,00 |
| DEPRECIACIÓN A | \$ - | \$ 1.158.467.943,90 | \$ 2.316.935.887,80 | \$ 3.475.403.831,70 | \$ 4.633.871.775,60 | \$ 5.792.339.719,50 |
| ACTIVO FIJO NETO | \$ 11.359.830.735,00 | \$ 10.201.362.791,10 | \$ 9.042.894.847,20 | \$ 7.884.426.903,30 | \$ 6.725.958.959,40 | \$ 5.567.491.015,50 |
| TOTAL ACTIVO | \$ 21.876.988.018,81 | \$ 23.456.533.064,92 | \$ 23.551.990.139,78 | \$ 23.501.017.593,70 | \$ 23.241.821.471,16 | \$ 22.694.474.504,86 |

Nota: Elaboración propia.

Finalmente, en este análisis es necesario determinar el punto de equilibrio del proceso, en este caso como se puede apreciar en la Figura 8, el punto de equilibrio se alcanza con la producción de 745 216 646 litros de bioetanol, lo cual corresponde a un periodo de 4,84 años para alcanzar el periodo estable donde la empresa ya comienza con su crecimiento económico.

Figura 8

Punto de equilibrio proceso producción de Bioetanol.



Nota: Elaboración propia.

13. Conclusiones y recomendaciones

A lo largo de la investigación se logró identificar exitosamente cuáles son las variables óptimas que afectan al rendimiento de la producción de bioetanol a partir del mucílago de café. Dichas variables fueron: el pretratamiento del mucílago, el pH y la concentración de la levadura. Cada una de las variables descritas fueron sometidas a un conjunto de pruebas en laboratorio con el fin de validar los datos obtenidos, demostrando el enorme potencial del mucílago como biocombustible para evitar sus vertimientos en las fuentes hídricas.

Las condiciones óptimas para la producción de bioetanol fueron halladas a lo largo de las pruebas experimentales. Para el caso del pretratamiento, es necesario llevar a cabo un proceso de hidrólisis básica a 121 °C durante 3 horas, puesto que incrementa la presencia de azúcares reductores. Por otro lado, el rango óptimo de pH ácido debe encontrarse entre 3,98 y 4,72. Finalmente, la concentración de levadura que arrojó mejores resultados fue de 2,5 gramos de levadura por cada 100 mililitros de solución.

Para el caso de la viabilidad del proyecto, se llevaron a cabo diferentes análisis con respecto a las restricciones, los costos y los impactos de la solución en el contexto colombiano. De



esta forma, se logró corroborar que el proyecto es económicamente viable, con una tasa de interna de retorno (TIR) del 26.46%. Así mismo, los impactos ambientales fueron rigurosamente estudiados, demostrando que dichos impactos son mínimos en comparación al beneficio de las fuentes hídricas en Pitalito, Huila y no se incurre en procesos contaminantes relevantes. Además, a nivel social se pronostica una mejora en la calidad de vida de la población aledaña a las fincas cafeteras y a las fuentes hídricas donde es vertido el mucílago.

Los resultados obtenidos demostraron ser prometedores, siendo que la eficiencia del proceso de producción de bioetanol puede ser mejorada con nuevas pruebas utilizando la metodología planteada en la presente investigación. Esta estrategia tiene el potencial para ser perfeccionada en un futuro.

La investigación demostró no solo la posibilidad de obtener bioetanol a partir de mucílago de café, sino también su valor como propuesta sostenible en el mercado colombiano. Lo anterior, demuestra que existe una gran oportunidad en cuanto a materia de investigación y nuevas tecnologías en el campo de los biocombustibles.

14. Recomendaciones

Se recopilan una serie de recomendaciones a tener en cuenta para futuras investigaciones de carácter similar. En primer lugar, sumamente importante llevar a cabo un proceso de pretratamiento con el objetivo de lograr la ruptura de las moléculas de lignocelulosa y celulosa presentes en el mucílago de café y de esta manera permitir un óptimo crecimiento de la levadura, así como una mayor cantidad de azúcares. Por otro lado, es imperioso analizar la influencia de la temperatura en el proceso de destilación como una nueva variable, ya que puede se dieron indicios de que puede llegar a influir en la obtención de bioetanol. De igual forma, es aconsejable evaluar



la eficiencia de los diferentes tipos de pretratamiento de materiales lignocelulósicos como es el caso de la hidrólisis enzimática, para determinar nuevos métodos con mayor viabilidad.

Para finalizar, es necesario llevar a cabo un estudio en profundidad de los diferentes tipos de café, presentes en el mercado colombiano, con el fin de determinar cuál tiene el mayor potencial de producción de bioetanol, ya que durante el presente proyecto solamente se utilizó un tipo específico de cascarilla de café procedente de Pitalito, Huila. De igual forma, es importante resaltar que durante el proceso de obtención de bioetanol se genera un subproducto sólido compuesto fibras lignocelulósicas, procedentes de la fase de filtración, y con el fin de que esté subproducto no se convierta en un residuo se recomienda analizar su composición másica para evaluar el potencial de reutilización como biomasa.

Referencias

- Alcaldía de Pitalito. (2020). *PLAN DE DESARROLLO MUNICIPAL 2020 - 2023*.
- AMECAFE. (2012). Plan Integral de Promoción del Café de México. In *Asociacion Mexicana de la Cadena Productiva del Cafe*.
- Arango Acevedo, H. G., & Zapata Velez, J. A. (2014). *MANEJO DE RESIDUOS SÓLIDOS PRODUCIDOS AL TRANSFORMAR CAFÉ CEREZA A PERGAMINO SECO*.
- Arcila Pulgarín, J. (2007). Crecimiento y desarrollo de la planta de café. In *Sistemas de producción de café en Colombia: Vol. Capítulo 2*.
- Arévalo, D., Lozano, J. G., & Sabogal, J. (2011). Estudio nacional de Huella Hídrica Colombia Sector Agrícola. *Revista Internacional de Sostenibilidad, Tecnología y Humanismo*, 7.



Arya, M., & Rao, L. J. M. (2010). An Impression of Coffee Carbohydrates.

Https://Doi.Org/10.1080/10408390600550315, 47(1), 51–67.

<https://doi.org/10.1080/10408390600550315>

Banti, M., & Abraham, E. (2021). Coffee Processing Methods, Coffee Quality and Related Environmental Issues. *Http://Www.Sciencepublishinggroup.Com*, 9(6), 152.

<https://doi.org/10.11648/J.JFNS.20210906.12>

Barrios, A., De Valck, K., Shultz, C. J., Sibai, O., Husemann, K. C., Maxwell-Smith, M., & Luedicke, M. K. (2016). Marketing as a Means to Transformative Social Conflict Resolution: Lessons from Transitioning War Economies and the Colombian Coffee Marketing System. *Https://Doi.Org/10.1509/Jppm.15.151*, 35(2), 185–197.

<https://doi.org/10.1509/JPPM.15.151>

Campos Morales, L. F., & Durán Medina, D. A. (2019). Diseño de un Sistema de Tratamiento para las Aguas Residuales Agrícolas Generadas en el Beneficio Húmedo del Café en la finca Buena Vista; Planadas Tolima, 2019. *Universidad El Bosque*.

Congreso de Colombia. (2014). Ley N° 1715 del 13 de mayo de 2014. *Upme, May*, 26.

<https://doi.org/10.1007/s13398-014-0173-7.2>

Consultores en Ingeniería de Riesgos y Valuaciones. (2018). Circular 03.08 Nuevos Riesgos Biocombustibles. *LEA (Leza, Escriña & Asociados S.A)*.

EMPRESA CONSULTORA CONSULSANTOS S.R.L. (2010). *MANUAL DE BUENAS PRACTICAS DE MANUFACTURA EN EL BENEFICIO MONTAÑA TARRAZÚ*.

Farah, A., & Dos Santos, T. F. (2015). The Coffee Plant and Beans: An Introduction. *Coffee in Health and Disease Prevention*, 5–10. [https://doi.org/10.1016/B978-0-12-409517-](https://doi.org/10.1016/B978-0-12-409517-5.00001-2)

5.00001-2



Federación Nacional de Cafeteros de Colombia. (2017). *Comportamiento de la Industria Cafetera Colombiana 2017* (pp. 1–64).

Federación Nacional de Cafeteros de Colombia. (2021). *FNC informe de gestión*.

<https://doi.org/10.38141/10793>

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.

García, J. C. (2020). Cambios en sistemas productivos y elementos biofísicos, en fincas cafeteras de la zona central colombiana. *Revista Cenicafé*, 71(2).

<https://doi.org/10.38141/10778/71202>

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>

Harvey, C. A., Pritts, A. A., Zwetsloot, M. J., Jansen, K., Pulleman, M. M., Armbrecht, I., Avelino, J., Barrera, J. F., Bunn, C., García, J. H., Isaza, C., Muñoz-Ucros, J., Pérez-Alemán, C. J., Rahn, E., Robiglio, V., Somarriba, E., & Valencia, V. (2021).

Transformation of coffee-growing landscapes across Latin America. A review.

Agronomy for Sustainable Development, 41(5), 1–19. <https://doi.org/10.1007/S13593-021-00712-0/TABLES/3>

Herrera, J. C., & Lambot, C. (2017). The Coffee Tree—Genetic Diversity and Origin. *The*

Craft and Science of Coffee, 1–16. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-803520-7.00001-3>



- IICA. (2019). Manual de producción sostenible de café en la República Dominicana. In *Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura*.
<https://www.cenicafe.org/es/documents/2.pdf>
- Khan, N., Sudhakar, K., & Mamat, R. (2021). Role of Biofuels in Energy Transition, Green Economy and Carbon Neutrality. *Sustainability 2021, Vol. 13, Page 12374, 13(22)*, 12374. <https://doi.org/10.3390/SU132212374>
- LEY 693 DE 2001. (n.d.). *LEY 693 DE 2001*.
- LEY 939 DE 2004. (n.d.). *LEY 939 DE 2004*.
- McCook, S. (2006). Global rust belt: *Hemileia vastatrix* and the ecological integration of world coffee production since 1850. *Journal of Global History, 1(2)*, 177–195.
<https://doi.org/10.1017/S174002280600012X>
- MINISTERIO DE AGRICULTURA Y GANADERÍA. (2020). Guía Práctica de Caficultura. *Gobierno De El Salvador*, 19.
- Ocampo-López, O. L., Ovalle-Castiblanco, A. M., Arroyave-Díaz, A., Salazar-Ospina, K., Ramírez-Gómez, C. A., & Oliveros-Tascón, C. E. (2017). Nuevo método estándar para la recolección selectiva de café. *Ingeniería Investigación y Tecnología, 18(2)*.
- 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>
- Peña, A., Hoyos, J., Figueroa, A., Corrales, J. C., Corrales, D. C., & Ledezma, A. (2014). A new dataset for coffee rust detection in Colombian crops base on classifiers. *Sistemas & Telemática, 12(29)*, 9–23.



- Peñuela-Martínez, A. E., Oliveros-Tascón, C. E., & Sanz-Uribe, J. R. (2010). Remoción del mucílago de café a través de fermentación natural. *Cenicafé*, 61(2).
- Pereira, L. L., Guarçoni, R. C., Pinheiro, P. F., Osório, V. M., Pinheiro, C. A., Moreira, T. R., & ten Caten, C. S. (2020). New propositions about coffee wet processing: Chemical and sensory perspectives. *Food Chemistry*, 310, 125943.
<https://doi.org/10.1016/J.FOODCHEM.2019.125943>
- Pérez Sariñana, B. Y., De León Rodríguez, A., Saldaña Trinidad, S., & Pathiyamattom, J. S. (2015). Optimization of bioethanol production from coffee mucilage. *BioResources*, 10(3), 4326–4338.
- Pérez-Sariñana, B. Y., de León-Rodríguez, A., Saldaña-Trinidad, S., & Joseph, S. P. (2015). Optimization of bioethanol production from coffee mucilage. *BioResources*, 10(3).
<https://doi.org/10.15376/biores.10.3.4326-4338>
- Puerta Quintero, G. I. (2000). Beneficie correctamente su café y conserve la calidad de la bebida. *Cenicafé*, 276(1).
- RESOLUCIÓN No. 18 0687 DE JUNIO 17 DE 2003. (n.d.). *RESOLUCIÓN No. 18 0687 DE JUNIO 17 DE 2003*.
- RESOLUCIÓN No. 18 1069 DE AGOSTO 18 DE 2005. (n.d.). *RESOLUCIÓN No. 18 1069 DE AGOSTO 18 DE 2005*.
- RESOLUCIÓN No. 789 DE SEPTIEMBRE 20 de 2016. (n.d.). *RESOLUCIÓN No. 789 DE SEPTIEMBRE 20 de 2016*.
- Ríos, S., & Puerta, G. I. (2011). Composición Química Del Mucílago De Café, Según El Tiempo De Fermentación Y Refrigeración. *Cenicafé*, 2(62).
- Rodríguez Siliceo, M. L. (2014). *Análisis de la productividad industrial de bioetanol*.



Siliceo Rodríguez, M. L. (2014). Análisis De La Productividad Industrial De Bioetanol.

Universidad Veracruzana, 1.

Silva Rubio, L. A., Bermúdez Huertas, A., Castiblanco Rincón, D. A., Avila Nieves, D. M.,

Perdomo Carvajal, J. P., Martínez León, S. L., & Gómez Restrepo, L. (2012).

BIOETANOL BIOTECNOLOGÍA APLICAD. *SUPER INTENDENCIA DE*

INDUSTRIA Y COMERCIO.

Smith, R. F. (1985). A History of Coffee. *Coffee*, 1–12. [https://doi.org/10.1007/978-1-4615-](https://doi.org/10.1007/978-1-4615-6657-1_1)

[6657-1_1](https://doi.org/10.1007/978-1-4615-6657-1_1)

SOCIEDAD DE AGRICULTORES DE COLOMBIA. (2022). *Revista Nacional de*

Agricultura. www.fedearroz.com.co/es/nuestros-productos/arroz-fedearroz

Trujillo-Zapata, S. A., Cortés-Orozco, C. P., Vinasco-Guzmán, M. C., Ortega-Astudillo, J.

D., & Cruz-Ospina, C. A. (2021). Evaluación de la calidad del agua en la fuente

abastecedora de Pitalito – Huila: Río Guachicos y sus afluentes principales, utilizando

los índices de contaminación e índice de calidad de agua. *Gestión y Ambiente*, 23(2).

<https://doi.org/10.15446/ga.v23n2.83600>

Wyman, C. E. (1994). Alternative fuels from biomass and their impact on carbon dioxide

accumulation. *Applied Biochemistry and Biotechnology* 1994 45:1, 45(1), 897–915.

<https://doi.org/10.1007/BF02941858>

Wyman, C. E., & Goodman, B. J. (1993). Biotechnology for production of fuels, chemicals,

and materials from biomass. *Applied Biochemistry and Biotechnology* 1993 39:1, 39(1),

41–59. <https://doi.org/10.1007/BF02918976>