



UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA

SEDE GUAYAQUIL

CARRERA INGENIERÍA AMBIENTAL

**EVALUACIÓN DEL PROCESO DE OBTENCIÓN DE ETANOL A PARTIR
DEL BAGAZO DE CAÑA DE AZÚCAR MEDIANTE HIDRÓLISIS ÁCIDA Y
FERMENTACIÓN ALCOHÓLICA**

Trabajo de titulación previo a la obtención del
Título de Ingeniero/a Ambiental

AUTORES:

Leoneliz Johanna Ramos Buste

Andrés Armando Suárez Neira

TUTORA:

Ing. Johanna Brigitte García Ponce, M. Sc.

Guayaquil – Ecuador

2026

**CERTIFICADO DE RESPONSABILIDAD Y AUTORÍA DEL TRABAJO DE
TITULACIÓN**

Nosotros, **Leoneliz Johanna Ramos Buste** con documento de identificación N° **1314460872** y **Andrés Armando Suárez Neira** con documento de identificación N° **0944268085**; manifestamos que:

Somos los autores y responsables del presente trabajo; y, autorizamos a que sin fines de lucro la Universidad Politécnica Salesiana pueda usar, difundir, reproducir o publicar de manera total o parcial el presente trabajo de titulación.

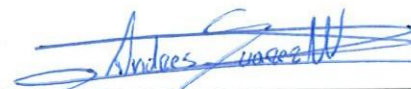
Guayaquil, 13 de febrero del año 2026

Atentamente,



Leoneliz Johanna Ramos Buste

N° 1314460872



Andrés Armando Suárez Neira

N° 0944268085

**CERTIFICADO DE CESIÓN DE DERECHOS DE AUTOR DEL TRABAJO DE
TITULACIÓN A LA UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA**

Nosotros, **Leoneliz Johanna Ramos Buste** con documento de identificación N° 1314460872 y **Andrés Armando Suárez Neira** con documento de identificación N° 0944268085, expresamos nuestra voluntad y por medio del presente documento cedemos a la Universidad Politécnica Salesiana la titularidad sobre los derechos patrimoniales en virtud de que somos autores del trabajo experimental: "Evaluación del proceso de obtención de etanol a partir del bagazo de caña de azúcar mediante hidrólisis ácida y fermentación alcohólica", el cual ha sido desarrollado para optar por el título de: Ingeniero/a Ambiental, en la Universidad Politécnica Salesiana, quedando la Universidad facultada para ejercer plenamente los derechos cedidos anteriormente.

En concordancia con lo manifestado, suscribimos este documento en el momento que hacemos la entrega del trabajo final en formato digital a la Biblioteca de la Universidad Politécnica Salesiana.

Guayaquil, 13 de febrero del año 2026

Atentamente,

Leoneliz R. B.

Leoneliz Johanna Ramos Buste

N° 1314460872

Andrés Armando Suárez Neira

Andrés Armando Suárez Neira


N° 0944268085

CERTIFICADO DE DIRECCIÓN DEL TRABAJO DE TITULACIÓN

Yo, **Johanna Brigitte García Ponce** con documento de identificación N° **1719904631** docente de la Universidad Politécnica Salesiana declaro que bajo mi tutoría fue desarrollado el trabajo de titulación “EVALUACIÓN DEL PROCESO DE OBTENCIÓN DE ETANOL A PARTIR DEL BAGAZO DE CAÑA DE AZÚCAR MEDIANTE HIDRÓLISIS ÁCIDA Y FERMENTACIÓN ALCOHÓLICA”, realizado por **Leoneliz Johanna Ramos Buste** con documento de identificación N° **1314460872** y **Andrés Armando Suárez Neira** con documento de identificación N° **0944268085**, obteniendo como resultado final el trabajo de titulación bajo la opción trabajo experimental que cumple con todos los requisitos determinados por la Universidad Politécnica Salesiana.

Guayaquil, 13 de febrero del año 2026

Atentamente,



Johanna Brigitte García Ponce

N° 1719904631

DEDICATORIA I

Dedico este trabajo, de manera especial, a mis padres, a mi madre Johanna Buste Anzules y a mi padre Eulices Ramos Moreira, por su apoyo constante y su presencia incondicional a lo largo de todo este proceso. Su esfuerzo, su paciencia y su disposición permanente para acompañarme y ayudarme en cada momento han sido un pilar fundamental que me permitió avanzar con seguridad y confianza.

Gracias por estar siempre ahí, por brindarme estabilidad, comprensión y fortaleza, incluso en los momentos más difíciles. Su respaldo silencioso y su acompañamiento constante han sido una fuente de apoyo invaluable a lo largo de este camino.

De igual manera, dedico esta tesis a mis hermanas, Leonela Ramos Buste y Leonarda Ramos Buste, por su presencia constante y por la alegría que han sabido brindarme, ayudándome a sobrellevar y a dejar atrás los momentos difíciles que he atravesado. Su compañía, su cercanía y su apoyo han sido una fuente permanente de ánimo, tranquilidad y bienestar.

Este trabajo también es para ustedes, como familia, que han estado presentes en cada etapa de este proceso, ofreciendo apoyo sincero, comprensión y aliento constante. Su unión, su entrega y su acompañamiento han sido fundamentales para seguir adelante.

Finalmente, esta tesis representa un profundo sentimiento de gratitud hacia quienes nunca dudaron en estar a mi lado. Cada esfuerzo, cada gesto de apoyo y cada palabra de aliento quedan reflejados en este trabajo, que lleva implícito el valor de la familia como base esencial de todo logro alcanzado.

Leoneliz Johanna Ramos Buste

AGRADECIMIENTO I

Expreso mi más sincero reconocimiento a la Universidad Politécnica Salesiana, por la formación académica recibida a lo largo de mi carrera de Ingeniería Ambiental, la cual ha contribuido de manera significativa a mi desarrollo profesional y personal.

De manera especial, dirijo mi reconocimiento a mi tutora de tesis, Johanna Brigitte García Ponce, MSc, por su orientación, dedicación y acompañamiento constante durante el desarrollo de este trabajo. Sus conocimientos, observaciones y apoyo fueron fundamentales para la culminación de esta investigación.

Asimismo, reconozco el apoyo brindado por mi compañero de tesis, quien no solo fue un respaldo académico, sino también un verdadero amigo. Su paciencia, colaboración y disposición hicieron posible avanzar con compromiso y compañerismo en cada etapa de este proceso.

De manera muy especial, reconozco a mis padres, Johanna Buste Anzules y Eulices Ramos Moreira, por el respaldo permanente brindado a lo largo de mi formación universitaria. Su compromiso, apoyo constante y disposición para acompañarme en cada etapa fueron determinantes para la culminación de este trabajo.

Finalmente, expreso mi reconocimiento a mi familia, quienes han estado presentes en todo momento, brindándome ánimo, comprensión y apoyo constante. Su acompañamiento ha sido una fuente de fortaleza a lo largo de este camino.

Leoneliz Johanna Ramos Buste

DEDICATORIA II

Esta dedicatoria va dirigida, en primer lugar, a Dios. A Él le agradezco por brindarme salud, fortaleza y sabiduría, y por permitirme llegar a este momento tan importante. Gracias por guiar mis pasos incluso cuando el camino se volvió difícil, por abrir puertas que creí imposibles y por darme las oportunidades necesarias para continuar avanzando.

De manera muy especial, dedico este trabajo a la persona más importante en mi vida: mi madre. Gracias a ella he llegado hasta donde hoy me encuentro. Desde mi niñez estuvo presente no solo con amor, sino también con sacrificios, esfuerzo y una entrega que pocas veces se reconoce como debería. Fue quien me apoyó en cada etapa, quien me acompañó en mis momentos de duda, quien me animó a seguir cuando sentía que ya no podía, y quien celebró conmigo cada pequeño avance. Este logro también es suyo, porque sin su guía y su ejemplo no estaría aquí. Hoy y siempre tendré el compromiso de retribuirle todo su amor y esfuerzo, brindándole mi apoyo en lo que necesite, porque merece eso y mucho más.

Extiendo esta dedicatoria a mis abuelos y a mis tíos, quienes formaron parte esencial de mi proceso personal y académico. Ellos aportaron su apoyo, su confianza y su cariño de manera constante, siendo pilares que fortalecieron mis ganas de superarme y alcanzar mis metas. Gracias por las palabras de ánimo, por los consejos sinceros y por recordarme que siempre vale la pena continuar.

Este logro no es únicamente el resultado de mi esfuerzo, sino también de la suma de todas estas personas maravillosas que contribuyeron en mi formación y crecimiento. A todos ellos, con profundo cariño y gratitud, les dedico este paso importante en mi vida.

Andrés Armando Suárez Neira

AGRADECIMIENTO II

En primer lugar, agradezco a la Universidad Politécnica Salesiana por brindarme la oportunidad de formarme académica y profesionalmente, y por abrirme las puertas para alcanzar este importante logro en mi vida.

A mi madre, Johanna Suárez, por su amor incondicional, su esfuerzo constante y su apoyo en cada etapa. Sin ella, nada de esto habría sido posible.

A mis tíos y a mis abuelos, por brindar su apoyo, sus palabras de ánimo y la motivación necesaria para seguir adelante cuando el camino se volvió difícil.

A la Mgs. Carmita Palacios, quien fue nuestra directora de carrera, quien desde mi ingreso me ofreció su apoyo, orientación y comprensión, siendo una guía constante a lo largo de este proceso. Igualmente, agradezco a mi tutora de tesis, Johanna Brigitte García Ponce, MSc, por la paciencia y su tiempo de compartir sus conocimientos, por guiarnos en cada paso por esta experiencia.

A los docentes de la carrera, en especial al Ing. Virgilio Ordoñez, al Ing. Néstor Berrones, a la Ing. Gabriela Andrade y al Ing. Luis Guevara, por compartir su conocimiento, experiencia y dedicación. Agradezco especialmente al Ing. Guevara, quien, a pesar del poco tiempo de conocerlo, se convirtió en una persona en quien pude confiar y acudir cuando lo necesité.

A mis amigos, quienes estuvieron a mi lado durante este proceso, ofreciéndome compañía y apoyo en todo momento, convirtiendo esta etapa en una experiencia más llevadera y significativa. A todos ustedes les debo este logro, que no es únicamente mío, sino también de todos quienes han sido parte de mi camino y mi formación. Gracias por acompañarme hasta aquí.

Andrés Armando Suárez Neira

RESUMEN

El presente estudio tuvo como objetivo evaluar el proceso de obtención de etanol a partir del bagazo de caña de azúcar mediante hidrólisis ácida y fermentación alcohólica, como una alternativa sostenible para el aprovechamiento de residuos agroindustriales en el Ecuador. El bagazo de caña, generado en grandes volúmenes durante la extracción de jugo y producción de azúcar, constituye un residuo lignocelulósico cuyo manejo inadecuado genera impactos ambientales asociados a la contaminación del suelo, agua y aire. La investigación se desarrolló bajo un enfoque experimental, utilizando como materia prima bagazo recolectado en puestos de venta de jugo de caña ubicados en el sector La Bahía de la ciudad de Guayaquil.

El proceso experimental comprendió varias etapas: preparación y caracterización del bagazo, pretratamiento para la ruptura de la estructura lignocelulósica, hidrólisis ácida con ácido sulfúrico diluido para la liberación de azúcares fermentables, detoxificación del hidrolizado mediante neutralización y decantación, fermentación alcohólica empleando la levadura *Saccharomyces cerevisiae* y, finalmente, la destilación del etanol producido. Durante la fermentación se controlaron variables como pH, temperatura y tiempo, con el fin de maximizar la conversión de azúcares en etanol.

Los resultados esperados del estudio permitirán analizar la eficiencia del proceso en términos de liberación de azúcares, producción de etanol y generación de dióxido de carbono, así como evaluar su viabilidad técnica y ambiental como biocombustible renovable. La investigación demuestra el potencial del bagazo de caña de azúcar como materia prima alternativa para la producción de bioetanol, contribuyendo a la reducción de residuos sólidos, al fortalecimiento de la economía circular y a la diversificación de la matriz energética nacional, en concordancia con la normativa ambiental y energética vigente en el Ecuador.

Palabras clave: bagazo de caña de azúcar, bioetanol, hidrólisis ácida, fermentación alcohólica, biomasa lignocelulósica.

ABSTRACT

This study aimed to evaluate the process of obtaining ethanol from sugarcane bagasse through acid hydrolysis and alcoholic fermentation, as a sustainable alternative for the use of agro-industrial waste in Ecuador. Sugarcane bagasse, generated in large volumes during juice extraction and sugar production, is a lignocellulosic residue whose improper management generates environmental impacts associated with soil, water, and air pollution. The research was conducted using an experimental approach, with bagasse collected from sugarcane juice stands in the La Bahía sector of Guayaquil serving as raw material.

The experimental process comprised several stages: preparation and characterization of the bagasse, pretreatment to break down the lignocellulosic structure, acid hydrolysis with dilute sulfuric acid to release fermentable sugars, detoxification of the hydrolysate by neutralization and decantation, alcoholic fermentation using the yeast *Saccharomyces cerevisiae*, and finally, distillation of the ethanol produced. During fermentation, variables such as pH, temperature, and time were controlled to maximize the conversion of sugars into ethanol.

The expected results of the study will allow for an analysis of the process efficiency in terms of sugar release, ethanol production, and carbon dioxide generation, as well as an evaluation of its technical and environmental viability as a renewable biofuel. The research demonstrates the potential of sugarcane bagasse as an alternative raw material for bioethanol production, contributing to the reduction of solid waste, the strengthening of the circular economy, and the diversification of the national energy matrix, in accordance with current environmental and energy regulations in Ecuador.

Keywords: sugarcane bagasse, bioethanol, acid hydrolysis, alcoholic fermentation, lignocellulosic biomass.

INDICE DE CONTENIDO

CERTIFICADO DE RESPONSABILIDAD Y AUTORÍA	II
DEL TRABAJO DE TITULACION	II
CERTIFICADO DE CESIÓN DE DERECHOS DE AUTOR	III
CERTIFICADO DE DIRECCIÓN DEL TRABAJO DE TITULACIÓN.....	IV
DEDICATORIA I.....	V
AGRADECIMIENTO I	VI
DEDICATORIA II.....	VII
AGRADECIMIENTO II.....	VIII
RESUMEN	IX
ABSTRACT	X
1. INTRODUCCIÓN.....	1
1.1. PROBLEMA DE ESTUDIO	2
1.2. DEFINICIÓN DEL PROBLEMA.....	2
1.3. JUSTIFICACIÓN.....	3
1.4. DELIMITACIÓN	4
1.4.1. Delimitación Geográfica.....	4
1.4.2. Delimitación Temporal.....	5
1.5. PREGUNTA DE INVESTIGACIÓN	5
1.6. OBJETIVOS.....	5
1.6.1. Objetivo General.....	5
1.6.2. Objetivos Específicos	5
1.7. MARCO HIPOTÉTICO	6
1.7.1. Hipótesis General	6
1.7.2. Hipótesis Específicas	6
2. FUNDAMENTACION TEÓRICA.....	7
2.1. CAÑA DE AZÚCAR (<i>Saccharum officinarum</i>).....	7
2.1.1. Taxonomía.....	8

2.1.2.	Características y Morfología	8
2.1.3.	Cultivo En Ecuador	11
2.2.	BAGAZO DE CAÑA DE AZÚCAR	12
2.2.1.	Biomasa Lignocelulósica.....	13
2.2.2.	Composición química del bagazo de caña de azúcar	14
2.2.3.	Celulosa	14
2.2.4.	Hemicelulosa	15
2.2.5.	Lignina.....	16
2.3.	CARACTERIZACIÓN DEL BAGAZO COMO MATERIA PRIMA	17
2.3.1.	Potencial de hidrogeno	17
2.3.2.	Humedad.....	17
2.3.3.	Cenizas	17
2.3.4.	Contenido de celulosa.....	18
2.3.5.	Contenido de lignina.....	18
2.4.	PASOS DEL PROCESO PARA LA OBTENCION DE ETANOL	19
2.5.	ETANOL COMO BIOCOMBUSTIBLE	20
2.6.	BIOETANOL	21
2.7.	CONVERSIÓN DE BIOMASA A BIOETANOL	22
2.8.	HIDROLISIS	23
2.9.	FERMENTACIÓN ALCOHÓLICA.....	24
2.10.	FASES DE LA FERMENTACIÓN ALCOHÓLICA	25
2.10.1.	Fase lag:.....	25
2.10.2.	Fase temporal de aceleración:.....	25
2.10.3.	Fase de crecimiento exponencial:.....	25
2.10.4.	Fase estacionaria:.....	25
2.10.5.	Fase de muerte:.....	26
2.11.	MICROORGANISMOS EN FERMENTACIÓN <i>Saccharomyces cerevisiae</i>	26

2.12.	INDICADORES DE EVALUACIÓN DEL PROCESO.....	27
2.12.1.	Indicadores de evaluación del proceso de obtención de etanol.....	27
2.12.2.	Rendimiento de etanol (%).....	28
2.12.3.	Eficiencia de conversión.....	28
2.12.4.	Productividad.....	29
2.12.5.	Pérdidas del proceso	30
2.13.	MARCO NORMATIVO APLICABLE	30
3.	METODOLOGÍA	31
3.1.	TIPO DE MUESTREO	31
3.2.	RECOLECCION DE MUESTRA.....	32
3.3.	LAVADO Y SECADO	32
3.4.	POBLACION	32
3.5.	VARIABLES DE ESTUDIO	33
3.5.1.	Variable Independiente.....	33
3.5.2.	Variables Dependientes	33
3.6.	PROTOCOLO DE SEGURIDAD (EPP)	33
3.7.	DISEÑO EXPERIMENTAL.....	34
3.8.	CARACTERIZACIÓN DE LA MUESTRA.....	35
3.8.1.	Potencial De Hidrogeno (pH).....	36
3.8.2.	Humedad.....	37
3.8.3.	Cenizas	38
3.8.4.	Porcentaje De Contenido De Celulosa	39
3.8.5.	Porcentaje De Lignina	41
3.8.6.	Preparación del bagazo.....	43
3.9.	DESARROLLO EXPERIMENTAL DE LA OBTENCIÓN DE ETANOL..	43
3.9.1.	Fase 1 la hidrólisis (ácida).....	43
3.9.2.	Fase 1.1 la detoxificación	44

3.9.3.	Fase 2 la fermentación (Microorganismo- <i>Saccharomyces Cerevisiae.</i>) ...	45
3.9.4.	Fase 3 la destilación.....	46
3.10.	ANÁLISIS ESTADÍSTICO DE LOS DATOS	47
4.	RESULTADOS.....	48
4.1.	CARACTERIZACIÓN DE LA MATERIA PRIMA.....	48
4.1.1.	Parámetro del pH del bagazo.....	48
4.1.2.	Parámetro de la humedad del bagazo	49
4.1.3.	Parámetro de cenizas del bagazo	50
4.1.4.	Parámetro de contenido de celulosa del bagazo	51
4.1.5.	Parámetro de contenido de lignina del bagazo	52
4.2.	PRIMERA FASE PARA LA OBTENCIÓN DE ETANOL	53
4.2.1.	Parámetros de la fase de hidrolisis acida.....	53
4.3.	SEGUNDA FASE PARA LA OBTENCIÓN DE ETANOL.....	57
4.3.1.	Parámetros de la fase de fermentación	57
4.4.	TERCERA FASE PARA LA OBTENCIÓN DE ETANOL.....	59
4.4.1.	Parámetros del etanol obtenido de la fase de destilación	59
4.4.2.	Concentración de etanol obtenido en porcentaje.....	60
4.4.3.	Contenido de etanol analizado estadísticamente con prueba de Kruskal–Wallis	61
5.	DISCUSIÓN.....	63
6.	CONCLUSIONES	64
7.	RECOMENDACIONES.....	67
8.	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	68
9.	ANEXOS	78
9.1.	ANEXO A	78
9.1.1.	Proceso de caracterización.....	78
9.2.	ANEXO B	81

9.2.1. Desarrollo experimental para la obtención de etanol	81
9.2.2. Evidencia de resultados de etanol final	90

INDICE DE TABLAS

Tabla 1. Coordenadas de los puntos de muestreo.....	4
Tabla 2. Parámetros de caracterización de muestra.....	36
Tabla 3. Determinación de humedad mediante el equipo analizador OHAUS MB23..	38
Tabla 4. Parámetros de pH tomados del bagazo.....	48
Tabla 5. Parámetros de humedad tomados del bagazo.	50
Tabla 6. Parámetros de cenizas tomados del bagazo.....	51
Tabla 7. Parámetros de contenido de celulosa tomados del bagazo.	52
Tabla 8. Parámetros de contenido de lignina tomados del bagazo.....	53
Tabla 9. Parámetro tomado después de la hidrólisis acida.	53
Tabla 10. Parámetros de la fase de fermentación.	58
Tabla 11. Parámetros de la fase de Etanol.....	59
Tabla 12. Concentración de alcohol.	60

INDICE DE IMAGENES

Figura 1. Ubicación del área de muestreo.	4
Figura 2. Tallo de la caña de azúcar.	9
Figura 3. Raíz de la caña de azúcar.	9
Figura 4. Hoja de la caña de azúcar.	10
Figura 5. Flor de la caña de azúcar.	11
Figura 6. Estructura de la Hemicelulosa.	15
Figura 7. Estructura de la Lignina.	16
Figura 8. Transformación del bagazo de caña de azúcar a etanol.	19
Figura 9. Representación del muestreo.	31
Figura 10. Almacenamiento de las muestras recolectadas.	32
Figura 11. Evidencia del correcto uso del EPP.	33
Figura 12. Diseño experimental para la obtención de etanol del bagazo.	34
Figura 13. Muestra de bagazo seleccionada para parámetros físico-químicos.	35
Figura 14. Medición del pH de la muestra.	37
Figura 15. Equipo analizador de humedad OHAUS MB23.	38
Figura 16. Proceso de secado de la muestra en la mufla.	39
Figura 17. Determinación de celulosa.	41
Figura 18. Acondicionamiento de la materia prima.	43
Figura 19. Mezcla final de la disolución de ácido y el bagazo.	44
Figura 20. Filtración del hidrolizado ya detoxificado.	45
Figura 21. Destilación simple del hidrolizado.	46
Figura 22. Deterioro del pH durante el periodo de almacenamiento en 12 h.	49
Figura 23. Variación del BRIX durante la fermentación con pretratamientos.	55
Figura 24 Tabla de prueba de Kruskal–Wallis.	61
Figura 25 Grafico de contenido de alcohol en relación con el tiempo.	61
Figura 26 Grafica de la tendencia creciente del contenido de alcohol.	62
Figura 27 Tabla de análisis de coeficiente de regresión y varianza.	62

INDICE DE ECUACIONES

Ecuación 1. Ejercicio para porcentaje de humedad	37
Ecuación 2. Ejercicio para sacar porcentaje de cenizas.....	39
Ecuación 3. Ejercicio para sacar porcentaje de celulosa	40
Ecuación 4. Ejercicio para sacar porcentaje de lignina.	42

INDICE DE ANEXOS

Anexos 1 Materia prima: bagazo de caña de azúcar.	78
Anexos 2 Determinación de pH del bagazo	79
Anexos 3 Determinación de humedad del bagazo	79
Anexos 4 Determinación del contenido de cenizas del bagazo.....	80
Anexos 5 Determinación del contenido de celulosa del bagazo	80
Anexos 6 Determinación del contenido de lignina del bagazo	81
Anexos 7 Preparación de la solución ácida para la hidrólisis	81
Anexos 8 Ajuste de pH a 10 del hidrolizado.....	82
Anexos 9 Decantación del hidrolizado.....	82
Anexos 10 Filtración del hidrolizado decantado.....	83
Anexos 11 Ajuste de pH a 5 del hidrolizado.....	83
Anexos 12 Adsorción con carbón activado.....	84
Anexos 13 Hidrolizado detoxificado.....	84
Anexos 14 Inoculación en ambiente estéril de levaduras.	85
Anexos 15 Proceso de fermentación alcohólica embaces rotulados	85
Anexos 16 Proceso de fermentación día 3	87
Anexos 17 Proceso de fermentación día 5	87
Anexos 18 Proceso de fermentación día 7	88
Anexos 19 Destilación del etanol final	88
Anexos 20 Etanol obtenido de los días 3, 5, y 7	89
Anexos 21 porcentaje de alcohol de las tres repeticiones del día 3	90
Anexos 22 porcentaje de alcohol de las tres repeticiones del día 5	90
Anexos 23 porcentaje de alcohol de las tres repeticiones del día 7	90

CAPÍTULO 1

1. INTRODUCCIÓN

La venta de jugo obtenido de la caña de azúcar es habitual en microcomercios o puestos ambulantes en áreas urbanas de Guayaquil, principalmente en la zona de la Bahía. No obstante, en años recientes esta actividad ha disminuido, lo que ha generado una reducción en la producción diaria; sin embargo, el problema de la acumulación de bagazo no ha sido eliminado. Este subproducto lignocelulósico continúa siendo desechado de manera informal en aceras, bordillos y espacios públicos, lo que ocasiona la degradación del paisaje urbano y la presencia de residuos orgánicos en el entorno (Niezwidia et al., 2023).

La carencia de sistemas adecuados para la gestión de residuos en pequeñas operaciones comerciales es un problema recurrente en varias ciudades latinoamericanas. En Guayaquil, la ausencia de normativas específicas y estrategias de aprovechamiento ocasiona que materiales como el residuo de la caña se desaprovechen a pesar de su potencial biotecnológico. Este residuo tiene un alto contenido de celulosa y hemicelulosa, que tienen la capacidad de transformarse en azúcares fermentables para producir bioetanol mediante procesos fisicoquímicos (de Almeida & Colombo, 2021).

En este contexto, la implementación de procesos biotecnológicos dirigidos a la transformación de residuos orgánicos se propone como una alternativa sustentable para reducir el impacto al medio ambiente y crear nuevas cadenas productivas. La conversión del bagazo mediante hidrólisis ácida y fermentación alcohólica no solo reduciría la acumulación de residuos en la Bahía de Guayaquil, sino que también promovería el impulso de energía renovables como el etanol. Por lo tanto, evaluar el curso de extracción del bioetanol utilizando el bagazo producido en los establecimientos donde se comercializa jugo de caña de azúcar es una oportunidad para resolver simultáneamente un problema ambiental y un desafío tecnológico, que corresponde al enfoque de la economía circular y evaluación de subproductos (Yaverino-Gutierrez et al., 2024).

1.1. PROBLEMA DE ESTUDIO

Según Sarmiento (2017), la caña de azúcar (*Saccharum officinarum*) es uno de los principales cultivos agroindustrial en Ecuador, con aproximadamente 110 000 ha sembradas en el país y una producción anual significativa tanto para la fabricación de azúcar como de panela. En el Ecuador, la caña de azúcar es un cultivo de mucha importancia económica, con una producción anual de considerable relevancia, tanto para la producción de derivados alimenticios como también para la generación de subproductos agroindustriales. Entre estos subproductos se encuentra el bagazo de la caña de azúcar, que equivale alrededor del 30% y el 35% del peso total procesado después de la molienda, lo que corresponde a cientos de miles de toneladas al año.

El inadecuado manejo de estos residuos ha generado problemas ambientales en varios cantones, ya que se acumulan en espacios públicos o son dispuestos en vertederos urbanos, provocando olores desagradables, contaminación visual y la proliferación de plagas. Asimismo, una proporción considerable del bagazo se destina a sitios de disposición final o es incinerada a cielo abierto, lo que contribuye a la emisión de gases contaminantes y a la sobrecarga de los sistemas de gestión de desechos, subrayando así la exigencia de implementar tácticas de recuperación sostenibles (Hiranobe et al., 2024).

La falta de aprovechamiento del bagazo limita la posibilidad de convertirlo en productos de mayor valor agregado, como biocombustibles, compuestos lignocelulósicos o materiales biodegradables. Esta situación muestra que existe una necesidad urgente de desarrollar políticas y tecnologías orientadas al procesamiento de residuos agroindustriales según modelos de economía circular y producción amigable con el medio ambiente (Nunes et al., 2023).

1.2. DEFINICIÓN DEL PROBLEMA

En la ciudad de Guayaquil, específicamente en el área comercial conocida como La Bahía, se ha identificado la presencia de comerciantes que se dedican a la extracción de jugo de caña de azúcar. Durante este proceso, el material sólido generado, el bagazo de la caña, es generalmente desechado como basura, siendo destinado al relleno sanitario o, en algunos casos, quedando restos en el suelo aledaño.

En el presente trabajo, dicho residuo será considerado como muestra para la parte experimental, con el propósito de contribuir al aprovechamiento sostenible de los desechos generados por esta actividad. De esta manera, se estaría beneficiando a esta pequeña comunidad para aprovechar mejor los residuos.

1.3. JUSTIFICACIÓN

La elevada producción de caña de azúcar en el Ecuador, que abarca cerca de 146.501 hectáreas cultivadas y genera cerca de 11,60 millones de toneladas métricas anuales, conlleva la generación de grandes volúmenes de residuos sólidos, principalmente bagazo de caña de azúcar. Este subproducto no solo se origina en la agroindustria azucarera, sino también en actividades de menor escala, como los pequeños puestos de jugo de caña, cuya presencia es notable en zonas urbanas como la Bahía de Guayaquil. A pesar de su tamaño reducido, estos emprendimientos generan cantidades significativas de bagazo que, al no contar con un manejo adecuado, se acumulan diariamente y representan un problema ambiental, provocando contaminación del suelo y del agua, malos olores y la proliferación de vectores y plagas. En el contexto latinoamericano, donde se producen cientos de millones de toneladas de bagazo anualmente, este residuo adquiere especial relevancia por su alto potencial de valorización. En este sentido, resulta justificada la valoración de opciones sostenibles para el aprovechamiento del bagazo de caña de azúcar, orientadas a reducir impactos ambientales y promover su uso como material base en procesos de transformación, como la obtención de bioproductos de valor agregado. (Micheal & Moussa, 2021).

Ante esta problemática, resulta fundamental llevar a cabo estudios experimentales orientados al aprovechamiento de estos residuos. El bagazo presenta una composición lignocelulósica con un alto contenido de celulosa y hemicelulosa, lo que lo posiciona como materia prima idónea para la producción de biocombustibles, como lo es el bioetanol, así como para generar otros productos con mayor valor comercial, siempre bajo condiciones controladas que permitan evaluar de manera rigurosa su viabilidad técnica y ambiental (Bezerra & Ragauskas, 2016).

El enfoque experimental nos permite medir cuantitativamente los beneficios ambientales y socioeconómicos de convertir un residuo urbano en materias primas útiles, bajo el modelo de la economía circular. Los datos obtenidos pueden servir como sustento para la elaboración de políticas locales y la adopción de tecnologías limpias aplicables a

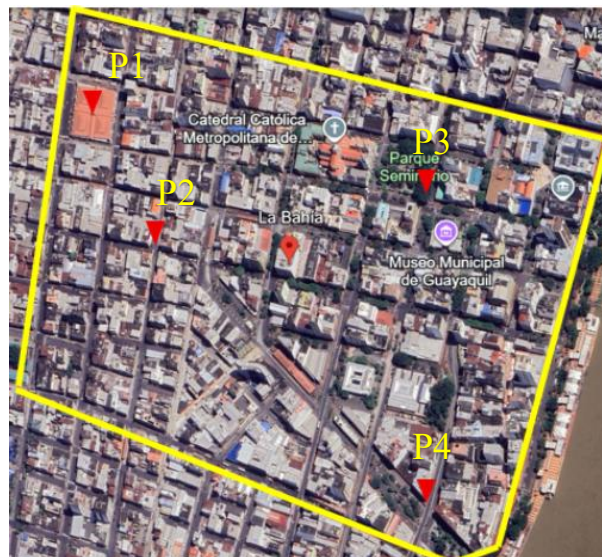
empresarios de pequeña escala, generando beneficios ambientales, económicos y sociales para la comunidad y reduciendo la presión sobre los sistemas tradicionales de disposición de residuos. Además, los resultados experimentales contribuyen a la formulación de estrategias innovadoras que puedan ser implementadas a nivel industrial en Ecuador, promoviendo la economía circular y generando beneficios sociales, económicos y ambientales.

1.4. DELIMITACIÓN

1.4.1. Delimitación Geográfica

El área de muestreo se ha delimitado al sector de la bahía, ubicado en el centro de Guayaquil, en la provincia del Guayas, se tomó la muestra de forma representativa en 4 puestos.

Figura 1. Ubicación del área de muestreo.



Nota. Extraída de Google Earth Pro por los autores (2026).

Tabla 1. Coordenadas de los sitios de muestreo.

SITIOS DE MUESTREO	NUMERACION	X	Y	Zona UTM
Puestos de jugo de caña de azúcar	P1	618230	9 757360	17S
	P2	623 804	9 757 247	17S
	P3	624 230	9 757 340	17S
	P4	624 230	9 756 850	17S

Nota. Elaborado por los autores (2026).

1.4.2. Delimitación Temporal

El trabajo experimental se realizó desde el mes de octubre del 2025 hasta febrero del 2026, tiempo en que se cubrió la recolección de datos, la experimentación y la evaluación de resultados.

1.5. PREGUNTA DE INVESTIGACIÓN

¿Cómo afecta el manejo inadecuado del bagazo de caña de azúcar en Ecuador al medio ambiente y al desarrollo sostenible, y qué estrategias pueden implementarse para optimizar su aprovechamiento y minimizar su impacto ambiental?

1.6. OBJETIVOS

1.6.1. Objetivo General

Desarrollar un proceso experimental para la obtención de bioetanol a partir del bagazo de la caña de azúcar mediante fermentación alcohólica, para evaluar su eficiencia y viabilidad como biocombustible.

1.6.2. Objetivos Específicos

- Identificar las características del bagazo de la caña de azúcar mediante pruebas de laboratorio físico-químicas para identificar su potencial como materia prima en la fermentación alcohólica.
- Realizar la fermentación alcohólica utilizando cepas microbianas seleccionadas mediante pruebas experimentales para obtener bioetanol.
- Determinar el contenido de etanol obtenido a partir del hidrolizado del bagazo de caña de azúcar, como indicador del rendimiento del proceso de hidrólisis ácida y fermentación alcohólica.

1.7. MARCO HIPOTÉTICO

1.7.1. Hipótesis General

El desarrollo de un proceso experimental para la obtención de bioetanol a partir del bagazo de la caña de azúcar permite evaluar su eficiencia y viabilidad como biocombustible.

1.7.2. Hipótesis Específicas

- La identificación de las características del bagazo de la caña de azúcar permitirá determinar su potencial como materia prima en la fermentación alcohólica.
- La realización de la fermentación alcohólica utilizando cepas microbianas seleccionadas permitirá la obtención de bioetanol.
- El contenido de etanol obtenido a partir del hidrolizado del bagazo de caña de azúcar permitirá evaluar el rendimiento del proceso de hidrólisis ácida y fermentación alcohólica.

CAPÍTULO II

2. FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA

2.1. CAÑA DE AZÚCAR (*Saccharum officinarum*)

La caña de azúcar se considera uno de los cultivos de mayor antigüedad en el mundo y se remonta a los años 100 y 800 a.C. hasta ahora se sabe que han sido descubiertos en Nueva Guinea a lo largo de la ruta este-oeste; Esto destaca que su origen se sitúa en el Sudeste Asiático. Los científicos han enviado esta planta a países como India, China y otros países del este; Los egipcios figuran entre los primeros en procesar y purificar la sacarosa que se encuentra en el tallo de esta hierba. Los musulmanes fueron los responsables de la migración de la caña de azúcar a Europa, quienes la utilizaron como medicina y principalmente como alimento. En 1493, los españoles trajeron esta planta a América durante el segundo viaje del almirante Cristóbal Colón, quien llegó a la isla Hispaniola, hoy República Dominicana, y Haití (Sánchez & Amable, 2020).

La caña de azúcar constituye un componente relevante de la economía del Ecuador, especialmente en la industria azucarera y otras industrias que utilizan subproductos de la caña de azúcar. El ciclo productivo inicia con la siembra del cultivo. Se seleccionan las variedades adecuadas y se plantan en campos preparados. El cultivo requiere cuidados constantes, que incluyen riego, fertilización y en la gestión fitosanitaria (A. Asuero, 2019).

La producción de caña de azúcar se centra principalmente en la producción de azúcar. En el año 2019, la superficie cosechada con este fin fue de 121.812 hectáreas. También se destinó una superficie de 15.525 hectáreas para cultivos de caña de azúcar para otros fines como alcohol y biodiesel. De acuerdo con cifras correspondiente al 2016, los mayores productores de caña de azúcar, fueron Brasil, México y Colombia de América Latina y el Caribe, mientras que Ecuador ocupó el octavo lugar con 8,6 millones de toneladas de producción, de las cuales el 99% se consume en el mercado interno (Onofre Ramos, 2020).

En 2020 las operaciones de procesamiento se realizaron sobre una superficie total de 139.406 hectáreas, arrojando una importante producción de 11.016.167 toneladas. Destaca la provincia de Guayas, que dominó, concentrando el 75% de la producción del

país, seguida de cerca por Kanjara con un respetable 19%. Es importante resaltar que, en ese mismo período, la producción de caña de azúcar tuvo un aumento significativo del 19% respecto a los datos de 2019. Este aumento muestra el crecimiento y vitalidad de este sector, subrayando su importancia en los sectores agrícola y económico (Joaquín et al., 2019).

2.1.1. Taxonomía

Clasificación Taxonómica

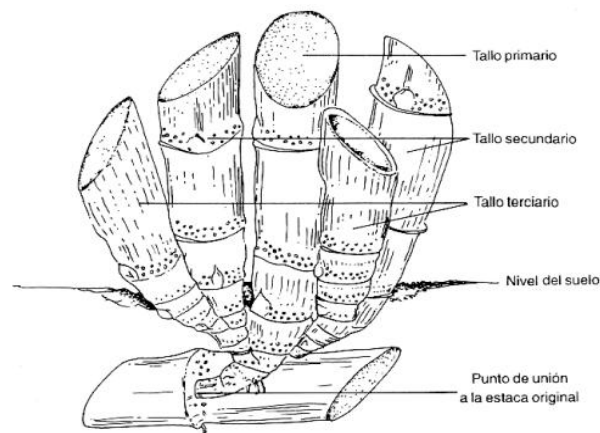
- Reino: *Plantae*.
- Filo: *Magnoliophyta*.
- Clase: *Liliopsida*.
- Orden: *Poales*.
- Familia: *Poaceae*.
- Género: *Saccharum*.
- Especie: *S. officinarum L.*

2.1.2. Características y Morfología

2.1.2.1. Tallo.

El tallo constituye la estructura de mayor relevancia en la planta, ya que en él se concentra la sacarosa que después es aprovechada en los procesos industriales. Esta planta presenta dos tipos de tallos, uno subterráneo denominado rizoma y otro aéreo, que se origina a partir de las yemas de otro tallo mediante propagación asexual o vegetativa. En condiciones favorables, puede alcanzar entre 3 y 6 m de altura y entre 2 y 5 cm de diámetro. Cada variedad presenta una gran diversidad de colores y combinaciones, las cuales por factores ambientales pueden verse influenciadas. (Kellogg, 2015).

Figura 2. Tallo de la caña de azúcar.

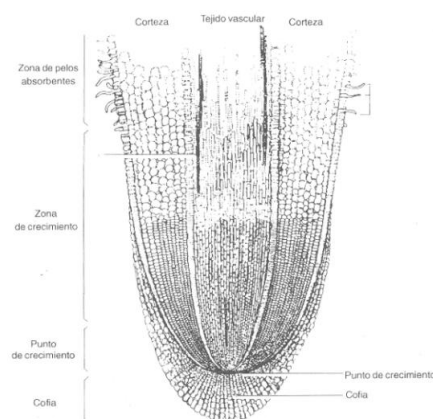


Nota. Extraído de Fisiología, floración y mejoramiento genético de la caña en Ecuador (González et al., 2004).

2.1.2.2. Raíz.

El sistema radicular es de tipo fibroso y está compuesto por dos clases de raíces: las raíces que emergen de la estaca inicial, que son delgadas, con abundante ramificadas y tienen un ciclo de vida de cercano tres meses; y las raíces permanentes, que se originan a partir de los brotes emergentes. Cerca del 65 % del sistema radicular las raíces se localizan en los primeros 20 cm de suelo, mientras que el 80 % se concentra en un radio de 60 cm desde la planta y hasta 60 cm de profundidad. La longitud, densidad y duración de las raíces varían según la variedad y las condiciones ambientales, aunque generalmente se extienden hasta 25–30 cm de profundidad (Radio la voz del Ángel, 2025).

Figura 3. Raíz de la caña de azúcar

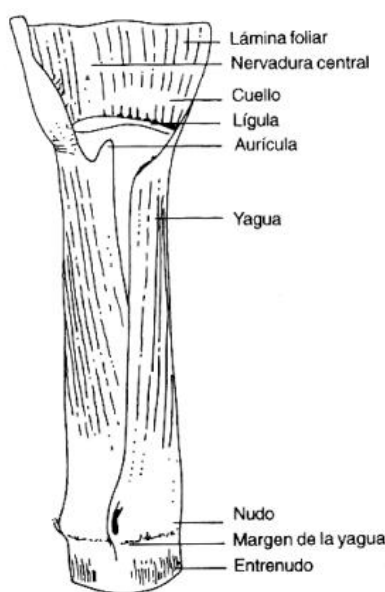


Nota. Extraído de Fisiología, floración y mejoramiento genético de la caña en Ecuador (González et al., 2004).

2.1.2.3. Hojas.

Las hojas emergen de los nudos del tallo y se distribuyen alternadamente, generando dos hileras enfrentadas sobre un mismo plano. Cada hoja consta de la lámina y de la vaina o también llamada yagua. La lámina foliar puede presentar colores que van desde un verde claro y amarillento hasta un verde oscuro. La vaina posee una forma tubular, rodea el tallo y es se ensancha en la base. Durante la maduración, las hojas se separan del eje del tallo y adoptan la inclinación característica, cuyo ángulo final está determinado por la exposición a la luz (Mensah et al., 2023).

Figura 4. Hoja de la caña de azúcar.

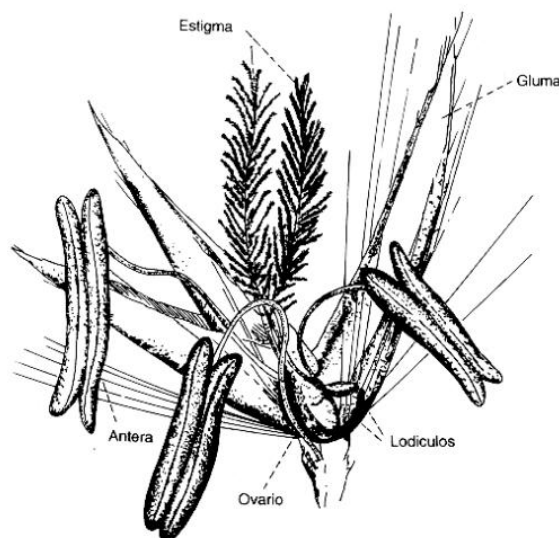


Nota. Extraído de Fisiología, floración y mejoramiento genético de la caña en Ecuador (González et al., 2004).

2.1.2.4. Inflorescencia.

La flor se presenta en forma de panícula sedosa, similar a una espiga, compuesta por un eje central con articulaciones en las que se ubican las espiguillas. Cada espiguilla contiene una flor hermafrodita, y esta contiene tres anteras y un ovario que posee dos estigmas (Ponce García, 2015).

Figura 5. Flor de la caña de azúcar.



Nota. Extraído de Fisiología, floración y mejoramiento genético de la caña en Ecuador (González et al., 2004).

2.1.2.5. Fruto y semilla.

Dentro de cada ovario se desarrolla un óvulo que, tras la fertilización da lugar al fruto o cariósido, que tiene una forma ovalada de 0.5 mm de ancho y 1.5 mm de largo (Bioleader, 2025).

2.1.3. Cultivo En Ecuador

La caña de azúcar constituye un cultivo que requiere una disponibilidad abundante y continua de agua para asegurar su adecuado crecimiento y desarrollo, condición que se cumple en varias zonas agrícolas del Ecuador, especialmente en la región Costa. En condiciones óptimas, el desarrollo del cultivo está estrechamente relacionado con la cantidad de agua disponible, estimándose que cada 10 mm de agua empleada permiten producir aproximadamente una tonelada de caña por hectárea. En términos generales, la caña de azúcar necesita alrededor de 1500 mm de agua durante su ciclo vegetativo, el cual se extiende entre 14 y 15 meses, aunque este requerimiento puede variar según las condiciones climáticas locales. La demanda hídrica del cultivo (ET_m) se distribuye de

manera relativamente uniforme dentro de un rango de 1500 a 2500 mm a lo largo de la temporada de crecimiento (Padrón et al., 2019).

La temperatura es uno de los factores climáticos con mayor influencia para el desarrollo de este cultivo, la cual se desarrolla favorablemente en ambientes de altas temperaturas, como los que caracterizan a las zonas cañeras del Ecuador. La temperatura ideal para la germinación y el crecimiento radicular se sitúa entre 26 y 33 °C; cuando esta desciende hasta los 20 °C, dichos procesos se ralentizan de manera considerable. El crecimiento de la caña se detiene cuando la temperatura baja a 15 °C o supera los 38 °C, siendo el rango óptimo para su desarrollo vegetativo entre 30 y 34 °C. Durante la etapa de maduración, temperaturas relativamente más bajas favorecen la acumulación y almacenamiento de sacarosa en los tallos, mientras que el crecimiento vegetativo del cultivo se desacelera (Msomba et al., 2024).

La fertilización constituye un aspecto clave en la gestión agronómica de la caña de azúcar, siendo los fertilizantes nitrogenados los que presentan la mayor respuesta del cultivo en términos productivos. No obstante, dependiendo de las características del suelo, también puede ser necesario el aporte de fósforo y, en casos específicos, de potasio. El nitrógeno es un elemento importante para las plantas, ya que forma parte de aminoácidos, proteínas y otros compuestos orgánicos fundamentales. Los principales efectos de la fertilización nitrogenada en los cultivos de caña se reflejan en un mayor macollaje, lo que implica una mayor población de tallos, así como en un incremento del crecimiento vegetativo, evidenciado por un mayor follaje, altura y peso por tallo, lo que se traduce en mayores rendimientos de caña y azúcar por hectárea (Arias et al., 2021).

2.2. BAGAZO DE CAÑA DE AZÚCAR

En el Ecuador, la superficie destinada al cultivo de caña de azúcar alcanza aproximadamente 146.501 hectáreas, con una producción total de casi 11.60 millones de toneladas métricas y un rendimiento promedio de 79.21 toneladas por hectárea. Esta alta producción convierte a la caña de azúcar como uno de cultivos agrícolas más relevantes del país y asegura la disponibilidad constante de subproductos, entre ellos la caña de azúcar, que es una fuente potencial de insumo para procesos de valorización energética y biotecnológica, por ejemplo, para la obtención de bioetanol (Chacha Solano & Chiluisa Villa, 2023).

El bagazo de caña constituye aproximadamente del 25 al 40% de la materia prima tratada, lo que se relaciona en gran medida con la cantidad de fibra de la caña y de la eficiencia del proceso de extracción del jugo. Considerando la cantidad de caña de azúcar procesada en el país, la producción de caña de azúcar en el Ecuador es significativa, lo que representa a la vez un desafío para su adecuado manejo y una oportunidad para utilizarla en procesos industriales alternativos orientados a la producción de biocombustibles (Asobanca, 2022).

Tradicionalmente, este residuo se utiliza como combustible en la producción de energía térmica en las fábricas de azúcar, lo que contribuye a la autosuficiencia energética de estas instalaciones. Sin embargo, estos residuos también son una materia prima imprescindible para la industria papelera debido a sus propiedades fibrosas. En los últimos años, su aprovechamiento ha cobrado mayor importancia en la elaboración de biocombustibles, especialmente en la producción de etanol de segunda generación a partir de biomasa lignocelulósica (Aguilar–Rivera N, 2010).

Desde una perspectiva química, el bagazo de la caña de azúcar posee una composición lignocelulósica favorable en la producción de bioetanol. En forma seca, se compone de aproximadamente un 32% de celulosa, un 37.5% de hemicelulosa y un 18% de lignina, componentes que permiten la liberación de azúcares fermentables durante los procesos de hidrólisis ácida. Estos azúcares luego pueden convertirse en etanol mediante fermentación alcohólica, lo que convierte al bagazo en una materia prima estratégica para el desarrollo de biocombustibles en el contexto ecuatoriano (CUNNINGHAM & LÓPEZ, 1994) .

2.2.1. Biomasa Lignocelulósica

La biomasa lignocelulósica corresponde a materiales de origen vegetal formados por una matriz compleja de celulosa, hemicelulosa y lignina. Esta biomasa se encuentra ampliamente en residuos agrícolas, forestales y agroindustriales, como el bagazo de la caña, rastrojos y aserrín. Su aprovechamiento para la producción de bioenergía ha cobrado relevancia en las últimas décadas, debido a la necesidad de diversificar la matriz energética y reducir la dependencia de combustibles fósiles (Pascual et al., 2022).

No obstante, la estructura rígida y resistente de la biomasa lignocelulósica representa un desafío tecnológico, ya que dificulta el acceso a los azúcares estructurales. Por esta razón, es indispensable aplicar procesos de pretratamiento e hidrólisis que permitan la ruptura de los enlaces químicos y faciliten su conversión biotecnológica (Haq et al., 2021).

2.2.2. Composición química del bagazo de caña de azúcar

El perfil químico del bagazo de caña de azúcar corresponde principalmente a una biomasa lignocelulósica, formada por polímeros estructurales de origen vegetal. Su composición puede variar según la variedad de la caña, los factores de cultivo y el proceso de recuperación del jugo, pero en términos generales se presenta dentro de los siguientes rangos:

2.2.3. Celulosa

En las plantas, la celulosa actúa como el principal componente estructural y es el material esquelético más abundante en el reino vegetal. Se presenta en varias formas polimórficas, la más común de las cuales es la alfa celulosa. Su estructura es de tipo lineal y fibrosa, formada por largas cadenas de unidades de β -D-glucosa unidas entre sí, las cuales se mantienen cohesionadas mediante numerosos puentes de hidrógeno entre los grupos hidroxilo de cadenas adyacentes. Esta disposición confiere a la celulosa una alta resistencia mecánica y la hace prácticamente insoluble en agua (Mahmud & Anannya, 2021).

Esta organización molecular da como resultado la formación de fibras densas que forman la pared celular vegetal, dando al tejido vegetal la rigidez y estabilidad necesarias. Se estima que una molécula de celulosa está compuesta por aproximadamente 1 600 a 2 700 unidades de β -D-glucosa, lo cual ha sido determinado a partir de mediciones de peso molecular mediante técnicas como presión osmótica, análisis de viscosidad y ultra centrifugación, que reportan valores entre 300 000 y 500 000 g/mol. La longitud y forma filamentosa de la molécula explican la naturaleza fibrosa característica de los productos derivados de la celulosa (Salcedo, 2025).

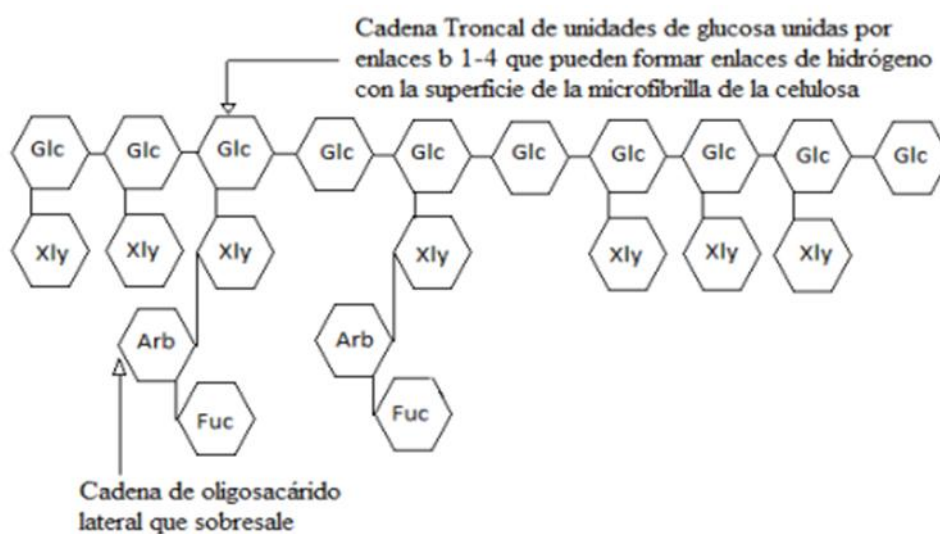
2.2.4. Hemicelulosa

Las hemicelulosas, también denominadas poliosas, son heteropolisacáridos muy extendidos en el reino vegetal, especialmente en las plantas de mayor lignificación. En la madera, se consideran como la fracción soluble en soluciones alcalinas, obtenida tras la eliminación de los compuestos extraíbles. Desde el punto de vista químico, se dividen principalmente en pentosanos y hexosanos, según el tipo de monosacáridos que los componen (Rivas & Urióstegui, 2024).

Los pentosanos están formados principalmente por aldopentosas, azúcares con cinco átomos de carbono, mientras que los hexosanos se componen de aldohexosas, que contienen seis átomos de carbono. La hidrólisis de las hemicelulosas presentes en las plantas vasculares terrestres produce una variedad de azúcares, entre los cuales predominan la D-xilosa, L-arabinosa, D-glucosa, D-galactosa, D-manosa, así como ácidos urónicos como el ácido glucurónico, 4-O-metilglucurónico y ácido D-galacturónico. En menor proporción, pueden encontrarse azúcares menos comunes como L-ramnosa, L-fucosa y algunos azúcares neutros metilados (Grilli et al., 2015).

La mayor reactividad química de la hemicelulosa en comparación con la celulosa se debe a su naturaleza amorfa y su bajo grado de cristalinidad, lo que facilita el acceso a los reactivos químicos en contraste con las regiones altamente cristalinas de la celulosa (Rodríguez et al., 2018).

Figura 6. Estructura de la Hemicelulosa.



Nota. Extraído de Biología y Botánica Volumen 2 de García - Breijo & Roselló - Caselles, (2007).

2.2.5. Lignina

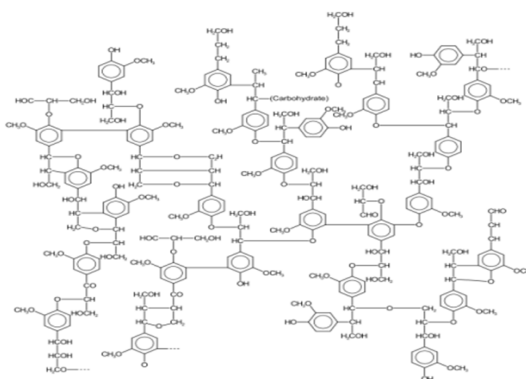
La lignina es un componente intercelular que actúa como material cementante entre las células fibrosas de los vegetales. Se localiza principalmente en la lámina media de la pared celular y desempeña un papel esencial a la hora de proporcionar rigidez y resistencia estructural a los tallos y tejidos vegetales. Químicamente las ligninas son polímeros complejos, altamente ramificados y de gran peso molecular, caracterizados por una notable resistencia tanto a los efectos de los agentes químicos como al ataque de microorganismos (Maceda et al., 2021).

A pesar de su alta estabilidad, la lignina puede ser solubilizada utilizando reactivos alcalinos de sodio o cloro, que la convierten en compuestos solubles en agua. En términos estructurales, la lignina se considera el polímero natural más complejo debido a su elevada heterogeneidad y a la imposibilidad de definir una estructura química única. No obstante, se han propuesto diversos modelos estructurales que describen su conformación general (Bogolitsyn et al., 2021).

La lignina presenta un alto peso molecular, con polímeros interconectados que alcanzan valores cercanos a 10 000 unidades de masa atómica, resultado de la polimerización de alcoholes y ácidos fenilpropílicos, tales como los alcoholes cumárico, coniferílico y sinapílico. La unión aleatoria de estos precursores origina una estructura tridimensional amorfa, característica de este biopolímero (Rencoret et al., 2023).

En la lignina presente en las gimnospermas, predominan los radicales guaiacil-propano, mientras que en las angiospermas son más comunes los radicales siringil-propano, lo que explica las diferencias estructurales y reactivas de la lignina según el tipo de planta (Manahan, 2022) (Dessbesell et al., 2020).

Figura 7. Estructura de la Lignina.



Nota. Extraído de Biología y Botánica Volumen 2 de García - Breijo & Roselló - Caselles, (2007).

2.3. CARACTERIZACIÓN DEL BAGAZO COMO MATERIA PRIMA

La caracterización físico-química del bagazo de caña de azúcar es esencial para evaluar su idoneidad como materia prima en la producción de bioetanol. Esta caracterización permite conocer detalladamente las propiedades del material, lo que influye directamente en su comportamiento durante las etapas de pretratamiento, hidrólisis y fermentación del proceso bioquímico (Barciela et al., 2023).

2.3.1. Potencial de hidrogeno

Es un parámetro fisicoquímico que expresa la actividad del ion hidrógeno (H^+) en una muestra, y por tanto permite cuantificar su grado de acidez o alcalinidad. En sistemas lignocelulósicos como el bagazo de caña de azúcar, la determinación del pH constituye una variable esencial para caracterizar su estado químico y biológico, debido a que el bagazo contiene azúcares residuales, compuestos fenólicos y materia orgánica susceptible a procesos de transformación microbiana. La medición del pH en este tipo de biomasa permite evaluar su estabilidad química, su susceptibilidad a degradación microbiológica, y su comportamiento frente a procesos posteriores (Yuliana & Martinez, 2021).

2.3.2. Humedad

La humedad en el bagazo de la caña representa la cantidad de agua presente en este residuo lignocelulósico después de la extracción del jugo, siendo un parámetro fisicoquímico fundamental para su caracterización; en bagazo fresco típicamente se encuentra en rangos elevados (aproximadamente 46 %–55 % en peso húmedo) debido al proceso de molienda y a la presencia de agua adsorbida (Gimena Zamora Rueda, 2016).

2.3.3. Cenizas

El contenido de cenizas representa la fracción inorgánica y mineral del bagazo de caña que permanece después de su combustión completa a altas temperaturas. Está compuesto principalmente por óxidos, carbonatos, silicatos y sales minerales, los cuales no aportan energía ni valor fermentable. Este parámetro sirve para cuantificar el nivel de impurezas no orgánicas presentes en la biomasa (Millones-Chapoñan et al., 2023).

2.3.4. Contenido de celulosa

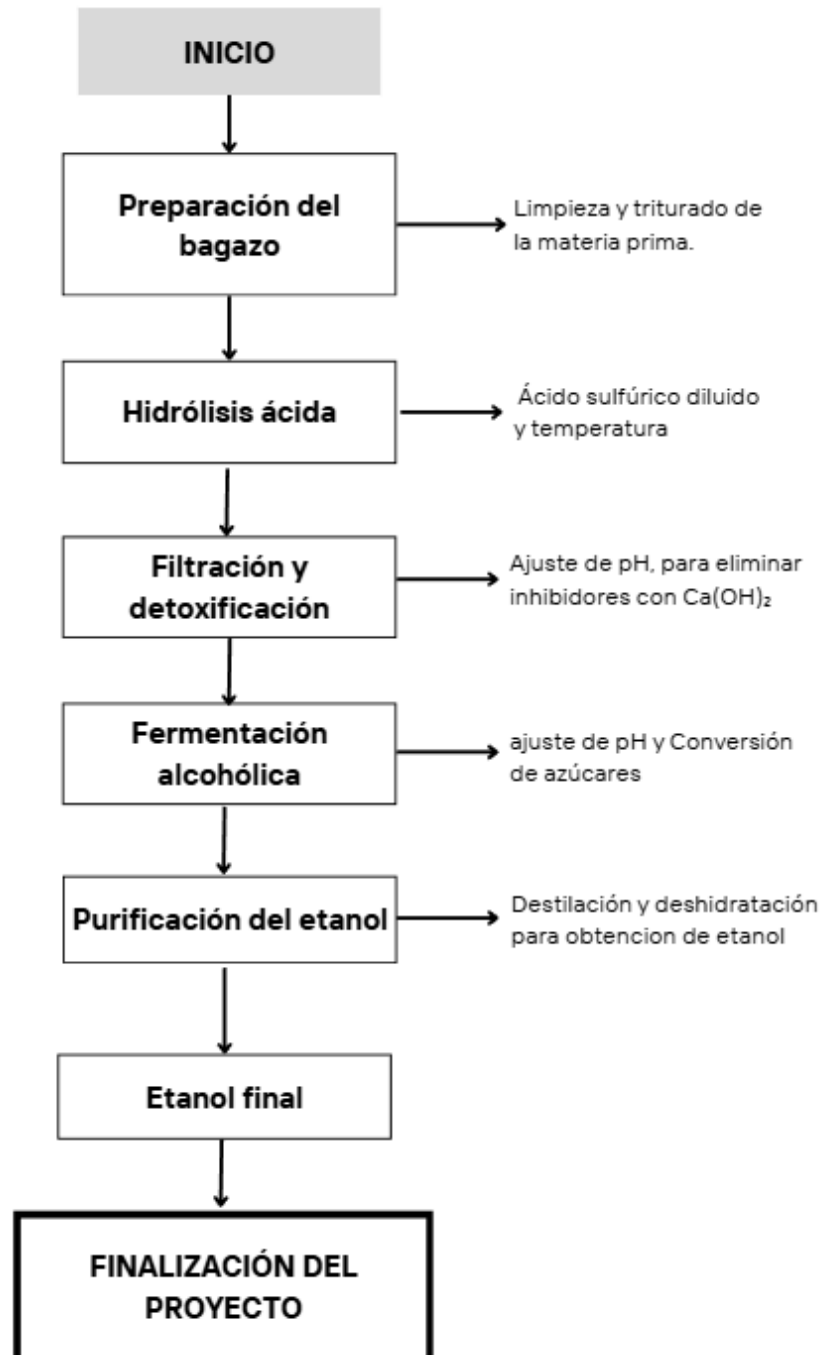
La celulosa es el principal componente estructural del bagazo de caña y está formada por cadenas de glucosa (β -1,4-glucano) altamente ordenadas. Constituye la fracción polimérica fermentable más importante, ya que después del pretratamiento e hidrólisis se convierte en glucosa, que las levaduras pueden fermentar directamente para producir etanol. Cuanto mayor es el contenido de celulosa, mayor potencial tiene la biomasa para generar biocombustibles (Melesse et al., 2022).

2.3.5. Contenido de lignina

El contenido de lignina en el bagazo de caña de azúcar constituye uno de los parámetros clave dentro de su caracterización físico-química, ya que este polímero complejo aporta rigidez y resistencia a la estructura de las paredes celulares de la biomasa y, al mismo tiempo, afecta la accesibilidad de enzimas y reactivos durante los procesos de pretratamiento e hidrólisis. Un mayor porcentaje de lignina puede dificultar la liberación de azúcares fermentables, reduciendo la eficiencia de la conversión de celulosa a glucosa y, por ende, el rendimiento del bioetanol. Por esta razón, determinar la proporción de lignina en el bagazo permite ajustar las condiciones de tratamiento y optimizar la transformación de la biomasa en azúcares fermentables para su uso en la producción de bioetanol (Deshpande et al., 2022).

2.4. PASOS DEL PROCESO PARA LA OBTENCION DE ETANOL

Figura 8. Transformación del bagazo de caña de azúcar a etanol.



Nota. Elaborado por los autores (2026).

2.5. ETANOL COMO BIOCOMBUSTIBLE

El etanol, también conocido como bioetanol cuando se produce a partir de biomasa vegetal, se ofrece como una alternativa energética a los combustibles fósiles tradicionales como la gasolina. El compuesto se produce principalmente mediante la fermentación de azúcar o almidón derivado de materias primas vegetales como la caña de azúcar, el maíz o los desechos agrícolas, lo que lo convierte en un recurso renovable y potencialmente más sostenible que los hidrocarburos derivados del petróleo. Además, el etanol se puede mezclar con gasolina en proporciones variables para su uso en vehículos de combustión interna, lo que reduce la dependencia de los combustibles fósiles, que son escasos y costosos. Este enfoque ayuda a diversificar las fuentes de energía para el transporte y aliviar los problemas asociados con la escasez de petróleo a largo plazo (Jain, 2019).

Uno de los beneficios ambientales del etanol como biocombustible es que cuando se quema en motores de combustión interna, puede producir menos emisiones de gases contaminantes en comparación con los combustibles fósiles. Esto se debe en parte a que el etanol es un combustible con un alto porcentaje de oxígeno, lo que promueve una combustión más completa y reduce las emisiones de monóxido de carbono, partículas y otros compuestos nocivos. Además, las mezclas de gasolina y etanol, como E10 o E15 (10% o 15% de etanol, respectivamente), son ampliamente utilizadas en varios países con el objetivo de mejorar la calidad del aire y reducir las emisiones asociadas al transporte motorizado, contribuyendo así a la reducción de gases de efecto invernadero (Muthu Dinesh Kumar & Anand, 2019).

Además de los beneficios ambientales, la producción y el consumo de etanol como biocombustible también tiene consecuencias económicas, especialmente en países con abundantes insumos agrícolas. Por ejemplo, países como Brasil utiliza la caña de azúcar para producir bioetanol a gran escala, lo que ha creado empleo en el sector agrícola y ha aumentado la autosuficiencia energética, reduciendo la necesidad de importar combustibles fósiles. Esta estrategia no solo fortalece el sector agroindustrial, sino que también fortalece la economía local y reduce la vulnerabilidad a las fluctuaciones del mercado petrolero global (Ciolkosz, 2024).

Sin embargo, el uso de etanol como biocombustible también plantea problemas y limitaciones. Por ejemplo, el etanol tiene menos energía que la gasolina, lo que significa que se necesita más combustible para alcanzar la misma autonomía del vehículo. Además,

en muchos países todavía se está desarrollando la infraestructura de distribución de etanol, lo que puede dificultar su adopción masiva como sustituto directo de los combustibles tradicionales. Es importante considerar estos aspectos técnicos y logísticos al evaluar la viabilidad de ampliar el uso de bioetanol en los sistemas de transporte actuales (Bader, 2025).

Finalmente, el etanol sigue siendo un biocombustible con gran potencial como puente hacia una matriz energética más limpia. Dado que los combustibles fósiles no duran para siempre y los gobiernos están tratando de reducir tanto las emisiones de CO₂ como la dependencia externa del petróleo, el bioetanol está surgiendo como una solución provisional mientras se desarrollan tecnologías más avanzadas, como la energía basada en hidrógeno. En este sentido, su uso en mezclas con gasolinas, el desarrollo de tecnologías de segunda generación para la producción de etanol a partir de residuos lignocelulósicos y la promoción de políticas públicas dirigidas a su producción sostenible son pasos clave para maximizar su potencial como biocombustible (Rumbero, 2023).

2.6. BIOETANOL

El bioetanol es un biocombustible producido mediante la fermentación de azúcares simples que se encuentran en diversas materias primas de origen vegetal. En particular, la biomasa lignocelulósica procedente de residuos agroindustriales es una alternativa sostenible para su producción, ya que permite aprovechar subproductos agrícolas que de otro modo serían desechados. Estos residuos se componen principalmente de celulosa, hemicelulosa y lignina, fracciones que pueden convertirse en azúcares fermentables mediante procesos fisicoquímicos adecuados (Manikandan et al., 2021).

Uno de los métodos más utilizados para la conversión de biomasa lignocelulósica es la hidrólisis ácida, un proceso en el que el uso de ácidos minerales como el ácido sulfúrico promueve la descomposición de las estructuras poliméricas de celulosa y hemicelulosa, liberando monosacáridos que luego pueden fermentarse. La eficiencia de este proceso depende de variables operativas como la concentración de ácido y la temperatura de reacción, que afectan directamente el rendimiento del azúcar resultante y, por tanto, la producción final de bioetanol (Tamers, 2006).

Los azúcares liberados se convierten luego en etanol mediante fermentación alcohólica, generalmente utilizando levaduras del género *Saccharomyces cerevisiae*, debido a su alta eficiencia fermentativa y tolerancia a condiciones ambientales adversas. Estudios experimentales han demostrado que una combinación adecuada de condiciones de hidrólisis y fermentación permite obtener una cantidad significativa de bioetanol a partir de residuos lignocelulósicos, demostrando el potencial de estos materiales como fuentes alternativas para la producción de biocombustibles (Ostelea, 2024).

2.7. CONVERSIÓN DE BIOMASA A BIOETANOL

La conversión de biomasa lignocelulósica en bioetanol es una de las principales vías para la producción de biocombustibles de segunda generación, ya que permite aprovechar residuos agrícolas abundantes y baratos. Este enfoque reduce la dependencia de los productos alimenticios y promueve una economía más sostenible en la que la biomasa rica en celulosa y hemicelulosa es la causa más importante para formar azúcares fermentables para obtener etanol (Viñals-Verde et al., 2012).

La biomasa lignocelulósica tiene una estructura compleja compuesta principalmente por celulosa, hemicelulosa y lignina, lo que dificulta su conversión directa en biocombustible. La lignina actúa como una barrera física que limita el acceso a los polisacáridos, por lo que se deben aplicar procesos de pretratamiento que permitan romper esta estructura y mejorar la disponibilidad de carbohidratos para su posterior conversión (Zabed et al., 2017).

Entre los métodos de conversión, la hidrólisis ácida es uno de los métodos más utilizados para degradar la celulosa y la hemicelulosa en azúcares simples. Este proceso utiliza ácidos diluidos en condiciones controladas de temperatura y presión, logrando la liberación de monosacáridos que pueden ser utilizados como sustrato en la fermentación alcohólica, aunque esto puede producir subproductos inhibidores (Abas et al., 2015).

Los azúcares liberados durante la hidrólisis se convierten en etanol mediante fermentación alcohólica, normalmente utilizando microorganismos como la levadura. La eficiencia de este paso depende de la capacidad del microorganismo para metabolizar diferentes tipos de azúcares y su tolerancia a los compuestos inhibidores formados durante el pretratamiento ácido, lo cual es un desafío tecnológico importante (Oh et al., 2018).

A pesar de los avances en los pasos de conversión, la producción del etanol a partir del bagazo aún enfrenta limitaciones técnicas y económicas. La mejora de las condiciones de hidrólisis ácida, la mejora de los microorganismos fermentativos y la integración eficiente de los pasos del proceso son aspectos clave que continúan explorándose para aumentar el rendimiento y la viabilidad industrial del bioetanol de segunda generación (Gabisa & Gheewala, 2020).

2.8. HIDROLISIS

La hidrólisis es un proceso esencial para la producción de bioetanol, durante el cual los polisacáridos de nuestra materia prima, como la celulosa y la hemicelulosa, se descomponen en azúcares simples fermentables. Estos azúcares, principalmente glucosa y xilosa, son esenciales en la posterior fermentación alcohólica. La hidrólisis se puede realizar mediante métodos ácidos o enzimáticos, cada uno con características específicas que afectan la eficiencia y viabilidad del proceso (Parekh et al., 2011).

En la hidrólisis ácida, el bagazo se trata con una dilución o concentrados, como el ácido sulfúrico o clorhídrico, que rompen los enlaces glicosídicos de la celulosa y la hemicelulosa. Este método se caracteriza por un equipamiento relativamente rápido y sencillo, pero puede producir compuestos inhibidores como furfural y ácido acético, que afectan negativamente a la fermentación posterior y a la calidad del bioetanol. Por otro lado, la hidrólisis enzimática utiliza enzimas específicas, como celulasas y hemicelulasas, que actúan de forma más selectiva sobre los polisacáridos, reduciendo la formación de subproductos no deseados y mejorando el rendimiento de azúcares fermentables. La opción del método de hidrólisis depende de varios factores, incluida la eficiencia del proceso, la disponibilidad de recursos, los costos operativos y el impacto ambiental. Aunque la hidrólisis enzimática generalmente produce mayores rendimientos de azúcar y menos inhibidores, el costo de las enzimas y el tiempo requerido para el proceso pueden ser prohibitivos para aplicaciones industriales a gran escala. Por el contrario, la hidrólisis ácida es más barata y rápida, pero requiere pasos de neutralización adicionales y tratamiento de subproductos tóxicos (Melgarejo Torres & Urquizo Rosado, 2019).

Para biomasa como el bagazo de caña de azúcar, que tiene una alta proporción de celulosa y hemicelulosa, la optimización de la hidrólisis es fundamental para maximizar la disponibilidad de azúcares fermentables. Se ha demostrado que la combinación de pretratamiento físico o químico con hidrólisis enzimática mejora significativamente el

rendimiento de azúcar y, por tanto, la producción de bioetanol, lo que demuestra la importancia de una planificación integral del proceso (Salimon et al., 2011).

Finalmente, la integración eficiente de la hidrólisis y la fermentación es clave para la factibilidad técnica y financiera del proceso de obtención del bioetanol. Una elección adecuada del método de hidrólisis junto con el control preciso de las condiciones de operación permite optimizar la conversión de biomasa en biocombustible, reducir la cantidad de residuos y garantizar un proceso sostenible y competitivo (Renneboog, 2022).

2.9. FERMENTACIÓN ALCOHÓLICA

Es un proceso biológico donde se convierte los microorganismos, principalmente la levadura *Saccharomyces cerevisiae*, en los azúcares fermentables, como la glucosa y la fructosa, en etanol y dióxido de carbono bajo condiciones anaeróbicas. Este proceso ocurre a través de una serie de reacciones metabólicas pertenecientes a la vía glucolítica, en la cual los azúcares son degradados para obtener energía, generándose etanol como producto final. La fermentación alcohólica constituye una de las etapas más importantes en la producción de bioetanol a partir de biomasa lignocelulósica (Vázquez & Dacosta, 2007).

El desempeño de la fermentación alcohólica está influenciado por diversas variables operativas, entre las que destacan el pH, la temperatura, la concentración inicial de azúcares, la presencia de inhibidores y el tiempo de fermentación. Generalmente, *Saccharomyces cerevisiae* presenta un óptimo de crecimiento y producción de etanol en valores de pH ligeramente ácidos y temperaturas moderadas, condiciones que favorecen la actividad enzimática y la estabilidad celular. Desviaciones significativas de estos parámetros pueden reducir la eficiencia del proceso y afectar negativamente el rendimiento etanólico (Dashko et al., 2014).

La eficiencia de la fermentación alcohólica es un factor decisivo para la viabilidad técnica y económica del proceso de producción de etanol, ya que un bajo rendimiento eleva los costos de producción y reduce la competitividad del biocombustible frente a los combustibles fósiles. Por ello, el control adecuado de las condiciones operativas permite maximizar la conversión de azúcares en etanol y minimizar la formación de subproductos

no deseados, como ácidos orgánicos y alcoholes superiores, que pueden inhibir el crecimiento microbiano y reducir la calidad del producto final (Raj et al., 2014).

Además, en procesos que emplean hidrolizados de biomasa lignocelulósica, como el bagazo de caña de azúcar, la fermentación puede verse afectada por la presencia de compuestos inhibidores generados durante la hidrólisis, tales como furfural y ácido acético. En este contexto, la selección de cepas tolerantes y la optimización de las condiciones de fermentación resultan fundamentales para mejorar el rendimiento global del proceso y garantizar una producción eficiente de bioetanol (Contreras Morales & Del Campo Romero, 2015).

2.10. FASES DE LA FERMENTACIÓN ALCOHÓLICA

2.10.1. Fase lag:

Corresponde al periodo inicial en el que *Saccharomyces cerevisiae* se adapta al medio de fermentación. Durante esta fase, las levaduras activan su metabolismo y los sistemas enzimáticos necesarios para el aprovechamiento de los azúcares, sin que se observe aún una producción significativa de etanol (Bertranda, 2019).

2.10.2. Fase temporal de aceleración:

En esta etapa se produce un aumento gradual de la actividad celular. Las levaduras comienzan a multiplicarse y a consumir los azúcares fermentables de manera más eficiente, marcando la transición entre la adaptación y el crecimiento activo (Salous et al., 2019).

2.10.3. Fase de crecimiento exponencial:

Se caracteriza por una rápida reproducción de las levaduras y una elevada conversión de azúcares en etanol y CO_2 . Esta fase es clave para el proceso, ya que se alcanza la mayor tasa de producción de etanol bajo condiciones anaeróbicas adecuadas (Dadlani, 2024).

2.10.4. Fase estacionaria:

En esta fase, el crecimiento celular se estabiliza debido a la disminución del sustrato disponible y al incremento de la concentración de etanol en el medio. La actividad metabólica continúa, aunque a una velocidad menor, manteniéndose relativamente constante la población microbiana (Jaishankar & Srivastava, 2017).

2.10.5. Fase de muerte:

Ocurre cuando las condiciones del medio se vuelven desfavorables para las levaduras. La disminución de nutrientes junto con la concentración de etanol y otros compuestos inhibidores provocan una reducción progresiva de la viabilidad celular, dando lugar al final del proceso fermentativo (Reinoso, 2024).

2.11. MICROORGANISMOS EN FERMENTACIÓN *Saccharomyces cerevisiae*

La levadura *Saccharomyces cerevisiae* es un microorganismo que es muy utilizado en la producción de etanol a partir de caña de azúcar. Su disposición para fermentar azúcares simples como glucosa, fructosa y sacarosa la convierte en un agente ideal para procesos de hidrólisis ácida de biomasa, donde estos azúcares se liberan a partir de la celulosa y hemicelulosa presentes en el bagazo de caña (Suárez-Machín et al., 2016).

Durante la fermentación alcohólica, *S. cerevisiae* transforma los azúcares en etanol y dióxido de carbono mediante el proceso de glicólisis seguido de reacciones fermentativas anaeróbicas. Esta vía metabólica permite regenerar NAD^+ , lo cual es esencial para mantener la producción continua de ATP y asegurar la viabilidad de la levadura durante el proceso fermentativo (García-Navas, 2022).

Entre los beneficios de la bacteria *S. cerevisiae* destaca su resistencia a condiciones adversas, como pH relativamente bajo y temperaturas moderadas, así como su resistencia a concentraciones moderadas de etanol y a ciertos inhibidores derivados de la hidrólisis ácida de lignocelulosa, tales como furfural y 5-hidroximetilfurfural (HMF) (Rodríguez et al., 2014). Esto la hace especialmente adecuada para la fermentación industrial de bioetanol a partir de biomasa residual (vasco, 2018).

La eficiencia de *S. cerevisiae* en la producción de etanol está sujeto a diversas variables, incluyendo la concentración de sustrato, el tipo de cepa, el tiempo de fermentación y la presencia de nutrientes esenciales. La optimización de estos parámetros es clave para maximizar el rendimiento de etanol y garantizar que la levadura mantenga su actividad metabólica durante todo el proceso (Valenzuela Huamán et al., 2021).

Por estas razones, *S. cerevisiae* sigue siendo la levadura de elección en la industria de bioetanol. Su robustez, facilidad de manejo y alta productividad permiten que la

fermentación alcohólica de caña de azúcar sea un proceso rentable y escalable, contribuyendo a la generación de biocombustibles sostenibles a partir de residuos agrícolas (Walker & Stewart, 2016).

2.12. INDICADORES DE EVALUACIÓN DEL PROCESO

2.12.1. Indicadores de evaluación del proceso de obtención de etanol

Los indicadores de evaluación del proceso permiten analizar el desempeño y eficiencia de cada etapa de la obtención de alcohol del bagazo, mediante hidrólisis ácida y alcohol. Estos indicadores facilitan la interpretación de los resultados experimentales y la comparación del rendimiento del proceso bajo diferentes condiciones operativas (Taherzadeh & Karimi, 2007).

En la etapa de hidrólisis ácida se consideran como indicadores el contenido de azúcares reductores y el pH del hidrolizado. La concentración de azúcares reductores permite determinar la cantidad de carbohidratos fermentables liberados a partir de la celulosa y la hemicelulosa del bagazo, mientras que el pH del medio es un parámetro clave ya que afecta directamente la viabilidad de una fermentación posterior. La eficiencia de la hidrólisis se expresa como porcentaje de la conversión de polisacáridos en azúcares simples (Magdalena Domínguez Domínguez et al., 2011).

Durante la fermentación alcohólica, los principales indicadores evaluados son el porcentaje de alcohol, el tiempo de la fermentación y el pH del medio fermentativo. La concentración de etanol representa el indicador más importante del proceso, ya que refleja directamente la capacidad de la levadura *Saccharomyces cerevisiae* para transformar los azúcares en alcohol. El consumo de azúcares permite analizar la eficiencia metabólica del microorganismo, mientras que el tiempo y el pH permiten evaluar la estabilidad del proceso fermentativo (Lin & Tanaka, 2006).

Finalmente, para la evaluación global del proceso, se determina el rendimiento de etanol, expresado como la cantidad de alcohol obtenido por unidad de masa del bagazo utilizado. Este indicador integra los resultados de la hidrólisis y la fermentación, permitiendo evaluar la viabilidad técnica del proceso de producción de bioetanol a partir de biomasa lignocelulósica (Najafpour et al., 2004).

2.12.2. Rendimiento de etanol (%)

El rendimiento de etanol es una variable a evaluar la eficiencia del proceso de producción de bioetanol, ya que facilita cuantificar la transformación de azúcares fermentables de biomasa a etanol. Este indicador es ampliamente utilizado en la investigación del bioetanol de segunda generación porque refleja la utilización real del sustrato lignocelulósico en las etapas de hidrólisis y fermentación (Mussatto et al., 2010).

Generalmente, el rendimiento de etanol se expresa como porcentaje (%) y se define como la relación entre la cantidad de etanol obtenida experimentalmente y la cantidad teórica máxima de etanol que se puede producir a partir de los azúcares disponibles. Un alto rendimiento indica una conversión eficiente de los carbohidratos estructurales en biomasa y una actividad metabólica suficiente del microorganismo enzimático (Mercado-Mata, 2006).

La evaluación del rendimiento de etanol permite además identificar pérdidas durante el proceso, asociadas a la formación de subproductos, a la presencia de compuestos inhibidores o a condiciones no óptimas de operación. Por este motivo, este indicador es ampliamente utilizado para comparar diferentes estrategias de pretratamiento, hidrólisis y fermentación en procesos de producción de bioetanol a partir de residuos agroindustriales (Broda et al., 2022).

2.12.3. Eficiencia de conversión

La eficiencia de conversión es un indicador clave al evaluar el proceso de producción de etanol a partir de biomasa lignocelulósica, ya que permite analizar con qué eficiencia se convierten los carbohidratos del bagazo en etanol. En el siguiente parámetro se tiene en cuenta cuidadosamente los pasos de hidrólisis y fermentación, reflejando el uso real de los azúcares liberados durante el proceso (Hahn-Hägerdal et al., 2006).

En términos generales, la eficiencia de transformación se define como la relación entre la cantidad de etanol efectivamente producido y la cantidad de etanol que podría obtenerse teóricamente a partir de los azúcares fermentables disponibles. Una eficiencia elevada indica que las condiciones del proceso favorecen tanto la liberación de azúcares durante la hidrólisis como la actividad metabólica del microorganismo fermentador, mientras que

valores bajos pueden asociarse a pérdidas por formación de subproductos o inhibición microbiana (Palmqvist & Hahn-Hägerdal, 2000).

La evaluación de la eficiencia de conversión es particularmente importante en procesos que utilizan hidrólisis ácida debido a la posible formación de compuestos inhibidores como furfural y ácido acético que pueden afectar negativamente a la fermentación alcohólica. Por este motivo, este indicador es ampliamente utilizado para comparar diferentes condiciones de operación y optimizar los pasos para convertir el etanol a partir de residuos agroindustriales (Alvira et al., 2010).

2.12.4. Productividad

La productividad es un indicador fundamental en la evaluación del desarrollo de la producción de etanol, ya que permite relacionar la proporción de etanol producido con el tiempo del proceso. Este parámetro se usa ampliamente para analizar la eficiencia de la fermentación del alcohol, ya que refleja la velocidad a la que un microorganismo convierte los azúcares fermentables en etanol bajo ciertas condiciones de operación (Bai et al., 2008).

Generalmente, la productividad se expresa como la cantidad de etanol producido por unidad de volumen y tiempo, y constituye un criterio clave para comparar diferentes procesos y condiciones de fermentación. Valores elevados de productividad indican un proceso eficiente en términos cinéticos, mientras que valores bajos pueden asociarse a limitaciones en la disponibilidad de sustrato, inhibición microbiana o condiciones no óptimas de operación (Mohd Azhar et al., 2017).

Durante la producción de etanol a partir de biomasa lignocelulósica, la productividad también se ve afectada por la calidad del hidrolizado obtenido, ya que la presencia de compuestos inhibidores puede reducir la velocidad de fermentación. Por esta razón, este indicador ha sido ampliamente utilizado para evaluar estrategias de pretratamiento, hidrólisis y fermentación en la investigación de bioetanol de segunda generación (Ramírez Méndez et al., 2022).

2.12.5. Pérdidas del proceso

Las pérdidas del proceso constituyen un indicador importante en la evaluación de la obtención de etanol a partir del bagazo de caña de azúcar, ya que permiten identificar la fracción de materia prima y azúcares fermentables que no se transforman en etanol. Estas pérdidas pueden presentarse a lo largo de las diferentes etapas del proceso, principalmente durante la hidrólisis ácida y la fermentación alcohólica, afectando la eficiencia global del sistema (Cardona & Sánchez, 2007).

En la etapa de hidrólisis ácida, las pérdidas del proceso suelen estar asociadas a la degradación de azúcares fermentables y a la transformación de compuestos secundarios como furfural, hidroximetilfurfural y ácidos orgánicos. Estos compuestos no solo representan una pérdida directa de sustrato, sino que también pueden actuar como inhibidores de la fermentación, reduciendo la producción de etanol (Jiménez Islas et al., 2012).

Durante la fermentación alcohólica, las pérdidas pueden deberse a la formación de subproductos metabólicos, consumo de azúcares para el crecimiento celular y limitaciones en la conversión de azúcares no fermentables. Por esta razón, el análisis de las pérdidas del proceso es fundamental para identificar puntos críticos y proponer mejoras que permitan optimizar el aprovechamiento de la biomasa lignocelulósica en la producción de bioetanol (Johnny et al., 2012).

2.13. MARCO NORMATIVO APLICABLE

En el Ecuador, el aprovechamiento y manejo adecuado de residuos orgánicos se encuentra respaldado por la constitución de la república del Ecuador, la cual reconoce el derecho de la población a vivir en un ambiente sano y ecológicamente equilibrado y promueve el uso de tecnologías ambientalmente limpias y energías alternativas no contaminantes (Legislativo, 2008). Asimismo, el código orgánico del ambiente establece la gestión integral de los residuos y fomenta el uso sostenible de los recursos naturales, en concordancia con las políticas ambientales nacionales orientadas a la valorización de residuos y al desarrollo de energías limpias, como los biocombustibles (*Código Orgánico del Ambiente* | [Descargar PDF Código Orgánico del Ambiente](#) | *Actualizado 2026*, s. f.).

CAPITULO III

3. METODOLOGÍA

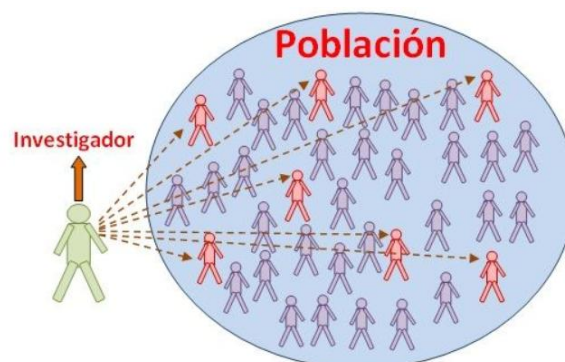
El presente estudio tuvo como objetivo la producción de etanol a partir del bagazo de caña de azúcar, empleando las etapas de hidrólisis ácida y fermentación alcohólica. La investigación se realizó bajo un enfoque experimental, de acuerdo a lo establecido en el reglamento de titulación de la unidad académica. Este estudio se desarrolló de manera objetiva y sistemática, lo que permitió la obtención de datos a partir de la manipulación de variables, con el propósito de analizar los resultados y evaluar la eficiencia de cada una de las variables intervenidas. La investigación se llevó a cabo en la Universidad Politécnica Salesiana, Campus María Auxiliadora, ubicado en el km 19 de la Vía a la Costa, donde se realizaron los procesos de hidrólisis ácida y fermentación alcohólica con la finalidad de obtener un biocombustible sostenible. (Neves et al., 2016).

3.1. TIPO DE MUESTREO

En este trabajo experimental se realizó un muestreo dirigido o selectivo, el cual correspondió a una técnica de muestreo no probabilístico basada en la selección intencional de las unidades de estudio, de acuerdo con criterios previamente definidos y alineados con los objetivos de la investigación. (Ortega, 2023).

En este estudio, el bagazo fue obtenido de manera dirigida en el sector bahía, ubicada en Guayaquil.

Figura 9. Representación del muestreo.



Nota. extraído de Tipos de muestreo (GoConqr, 2018).

3.2. RECOLECCION DE MUESTRA

Se recolectaron muestras representativas en cuatro puntos diferentes, seleccionados correspondientemente a los establecimientos de jugo de la caña de azúcar. Esta elección permitió asegurar que el material recolectado fuera representativo de las condiciones reales de manejo y disponibilidad del bagazo en el área de estudio, garantizando la pertinencia de las muestras para su posterior análisis.

Figura 10. Almacenamiento de las muestras recolectadas.



Nota. Elaborado por los autores (2026).

3.3. LAVADO Y SECADO

El bagazo, una vez triturado, fue sometido a un proceso de lavado con agua con el fin de eliminar suciedades superficiales, restos sólidos y otras impurezas que podían afectar el desarrollo de la hidrólisis ácida. Este procedimiento permitió reducir la presencia de materiales extraños que podían interferir en la eficiencia del proceso. Posteriormente, el bagazo se dejó secar, con el propósito de evitar que el contenido de humedad residual influyera en la determinación de la humedad de la muestra, garantizando así resultados más confiables y representativos durante el análisis experimental (Rezende et al., 2011).

3.4. POBLACION

Se consideró que la población de estudio estuvo conformada por un conjunto de lotes de bagazo generados en los puestos de venta de jugo de caña de azúcar, ubicados en el sector de la Bahía de la ciudad de Guayaquil (A.M. Philscholar®, 2025). La muestra se tomó de

forma representativa en cuatro puestos, con un peso aproximado de 3 a 5 kg en cada uno, lo cual fue suficiente para la realización del trabajo experimental.

3.5. VARIABLES DE ESTUDIO

3.5.1. Variable Independiente

- Tiempo de fermentación

3.5.2. Variables Dependientes

- Concentración de etanol obtenido
- Rendimiento
- Color
- Turbidez
- Potencial de hidrogeno (pH)

3.6. PROTOCOLO DE SEGURIDAD (EPP)

El uso del equipo de protección personal fue fundamental para la correcta manipulación y recolección de las muestras. Durante la toma de muestras fue obligatorio emplear elementos de protección como guantes, mascarilla y cofia, así como garantizar un adecuado almacenamiento del material recolectado. De igual manera, en la etapa de manipulación de las muestras durante el proceso experimental, el uso del EPP resultó indispensable para evitar la contaminación cruzada, asegurando así la confiabilidad y precisión de los resultados obtenidos (Office of Research. (s. f.), 2026).

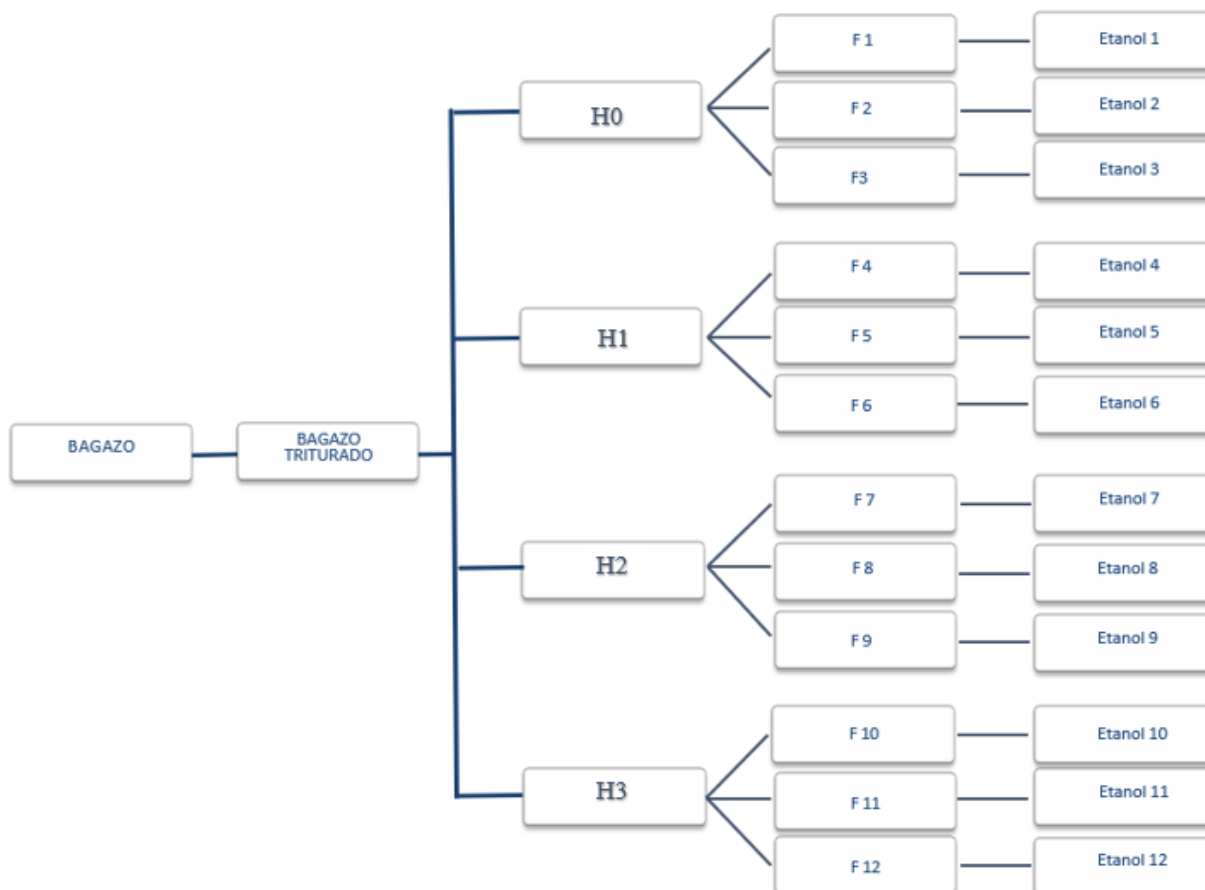
Figura 11. Evidencia del correcto uso del EPP.



Nota. Elaborado por los autores (2026).

3.7. DISEÑO EXPERIMENTAL

Figura 12. Diseño experimental para la obtención de etanol del bagazo de la caña de azúcar.



Nota. Elaborado por los autores (2026).

Con el objetivo de producir etanol utilizando el bagazo de la caña de azúcar, el material lignocelulósico fue sometido a hidrólisis ácida, con el propósito de romper las estructuras complejas y liberar azúcares fermentables. Posteriormente, el hidrolizado obtenido fue llevado a un proceso de fermentación alcohólica. En esta etapa, se realizó una variación controlada de los tiempos de fermentación, con el objetivo de evaluar el efecto de este parámetro sobre la producción y la concentración final de etanol, permitiendo así evaluar el comportamiento del proceso bajo diferentes condiciones operativas.

Nomenclatura utilizada en la Figura 11:

H0, 1, 2, 3 = Muestra con tratamiento de hidrólisis ácida.

F 1,2,3,4.....= Muestra fermentada, separadas en botellas.

Etanol 1,2,3,4.....= Etanol obtenido con diferente concentración de alcohol.

3.8. CARACTERIZACIÓN DE LA MUESTRA

Se caracterizaron los parámetros físico-químicos del bagazo de caña de azúcar, entre los cuales se incluyeron mediciones de pH, contenido de humedad, porcentaje de cenizas y contenido de celulosa, empleando ensayos específicos y métodos analíticos estándar. Esta caracterización permitió determinar las propiedades fundamentales de la biomasa como materia prima para la producción de bioetanol, ya que los valores de estos parámetros son clave para evaluar su capacidad de conversión, estabilidad y comportamiento durante los procesos de tratamiento y fermentación, La evaluación del pH y la humedad brindó información sobre las condiciones ambientales del bagazo y su tendencia a favorecer o dificultar reacciones químicas; la determinación del contenido de cenizas facilitó el análisis de la proporción de residuos inorgánicos presentes; y la cuantificación de la celulosa posibilitó estimar la disponibilidad de azúcares fermentables esenciales para su uso en la obtención de bioetanol. Estos datos fueron fundamentales para validar la idoneidad del bagazo como sustrato en los procesos de conversión bioquímica y asegurar que su composición fuese adecuada para alcanzar un rendimiento eficiente en la producción del biocombustible final (Singh et al., 2025).

Figura 13. Muestra de bagazo seleccionada para parámetros físico-químicos.



Nota. Elaborado por los autores (2026).

Tabla 2. Parámetros de caracterización de muestra.

Nº	PARAMETROS	UNIDAD	METODO	INSTRUMENTO
1	pH	Adimensional	Potenciómetro	pH-metro digital / Potenciómetro
2	Humedad	%	Gravimétrico	Equipo de humedad / Balanza analítica
3	Cenizas	%	Gravimétrico	Mufla / Balanza analítica
4	Contenido de celulosa	%	Gravimétrico	Balanza analítica
5	Contenido de lignina	%	Gravimétrico	Balanza analítica

Nota. Elaborado por los autores (2026).

3.8.1. Potencial De Hidrogeno (pH)

Para la determinación del pH, se utilizó el equipo de LOVIBOND SD10 pH Pocket tester, se molido primeramente el bagazo con el fin de reducir su tamaño de partícula y obtener una muestra más homogénea, lo que permitió mejorar el contacto del material con el medio líquido y asegurar una medición más representativa. Posteriormente, el bagazo triturado se mezcló con agua destilada en una proporción acorde a la cantidad de muestra utilizada, con el objetivo de facilitar la liberación de los componentes solubles del material. La suspensión obtenida se sometió a agitación continua durante un período aproximado de 30 minutos, favoreciendo la uniformidad de la mezcla, y luego se dejó reposar entre 5 y 10 minutos para permitir la decantación de partículas sólidas antes de realizar la medición con el equipo de pH (Acevedo et al., 2007).

Figura 14. Medición del pH de la muestra.



Nota. Elaborado por los autores (2026).

3.8.2. Humedad

Para la determinación del contenido de humedad del bagazo de caña de azúcar, se utilizó el equipo de humedad OHAUS MB23 y se empleó el método gravimétrico por secado, el cual consistió en pesar una muestra representativa del material en su estado natural para obtener la masa húmeda inicial y posteriormente someterla a secado en estufa a una temperatura de 105 °C durante 24 horas, con el fin de eliminar el contenido de agua presente; una vez finalizado el secado, la muestra se enfrió en un desecador para evitar la reabsorción de humedad ambiental y se procedió a su pesaje para determinar la masa seca (Ewanick & Bura, 2011).

El porcentaje de humedad se calculó mediante la relación entre la diferencia de la masa húmeda y la masa seca respecto a la masa inicial, lo que permitió cuantificar la fracción de agua eliminada por evaporación, conforme a lo descrito por (Fagernäs et al., 2010).

m_h es la masa inicial húmeda

m_s es la masa después del secado, lo que cuantifica la fracción de agua perdida por evaporación.

Ecuación 1. Ejercicio para porcentaje de humedad

$$\%H = \frac{m_h - m_s}{m_h} \times 100$$

Nota. Extraído de Determinación del porcentaje de humedad (s. f.).

Tabla 3. Determinación de humedad mediante el equipo analizador de humedad OHAUS MB23.

PRUEBAS	PESO (g)	TIEMPO (min)
1	1.8	5
2	1.7	10
3	1.8	15
4	1.8	20
5	1.9	25

Nota. Elaborado por autores (2026).

Figura 15. Equipo analizador de humedad OHAUS MB23



Nota. Elaborado por autores (2026).

3.8.3. Cenizas

Para la determinación del contenido de cenizas, se utilizó la mufla SNOL, como primer paso la muestra de bagazo de caña de azúcar fue previamente secada en una estufa a 105 °C durante aproximadamente 24 horas, con el fin de eliminar la humedad residual. Posteriormente, el material seco fue triturado utilizando una licuadora o mortero hasta obtener un tamaño de partícula homogéneo y se conservó en un frasco herméticamente

cerrado para evitar la absorción de humedad ambiental. Antes del análisis, el crisol fue sometido a un proceso de curado, colocándolo en una mufla a 550 °C durante un periodo de 30 a 60 minutos; luego se dejó enfriar en un desecador durante 30 minutos y se registró su masa como peso del crisol (W_0). A continuación, se pesaron entre 2 y 3 g de la muestra seca dentro del crisol, registrándose la masa conjunta como peso del crisol más muestra seca (W_1), y se introdujo el conjunto en la mufla a una temperatura de 550 °C durante un tiempo de 3 a 4 horas, o hasta obtener una ceniza de color blanco o gris, indicativa de la completa incineración del material orgánico. Finalizado el proceso, el crisol fue retirado con pinzas y enfriado nuevamente en un desecador durante 30 minutos, tras lo cual se pesó para registrar el peso del crisol con las cenizas (W_2) (Bragato et al., 2012).

La fórmula es:

- W_0 = Peso del crisol vacío.
- W_1 = crisol + muestra seca
- W_2 = Peso de crisol + cenizas

Ecuación 2. Ejercicio para sacar porcentaje de cenizas.

$$\% \text{ Ceniza} = \frac{W_2 - W_0}{W_1 - W_0} \times 100$$

Nota. Extraído de Practica 2 Determinación de Cenizas | Alimentos | Incineración, (s. f.).

Figura 16. Proceso de secado de la muestra en la mufla.



Nota. Elaborado por los autores (2026).

3.8.4. Porcentaje De Contenido De Celulosa

Para la preparación de la muestra, el bagazo de caña de azúcar fue secado en una estufa a 105 °C durante 24 h con el fin de eliminar la humedad residual. Posteriormente, la muestra seca fue pulverizada utilizando una licuadora o mortero hasta obtener una granulometría homogénea y se tamizó para evitar la presencia de partículas fibrosas; el material obtenido se conservó en un frasco hermético para prevenir la reabsorción de humedad. Para el pesado inicial, se tomaron entre 1 y 2 g de muestra seca, registrándose este valor como masa inicial (M_0), y se preparó la solución extractora mediante la mezcla, en un vaso aforado, de una proporción de cuatro partes de etanol por una parte de ácido nítrico. A continuación, la muestra pesada fue transferida a un matraz de reflujo, al cual se añadió un volumen aproximado de 200 mL del reactivo preparado, se montó el condensador y se sometió a digestión bajo reflujo a una ebullición suave entre 90 y 100 °C durante una hora, finalizando esta etapa con la filtración en caliente. El residuo sólido obtenido fue filtrado mediante filtración al vacío y posteriormente lavado con etanol caliente a 70 °C para eliminar restos de ácido, seguido de lavados con agua destilada caliente a 60 °C hasta alcanzar un pH neutro. Finalmente, la fibra obtenida fue transferida a un crisol para su secado final en estufa a 105 °C durante 12 h; una vez concluido este proceso, el crisol se dejó enfriar en un desecador durante 30 minutos y se realizó el pesado final con la balanza analítica BIECO Germany, registrándose la masa de celulosa seca como M_1 . (Verónica Hernao & Antonio Giraldo, 2009).

La fórmula es:

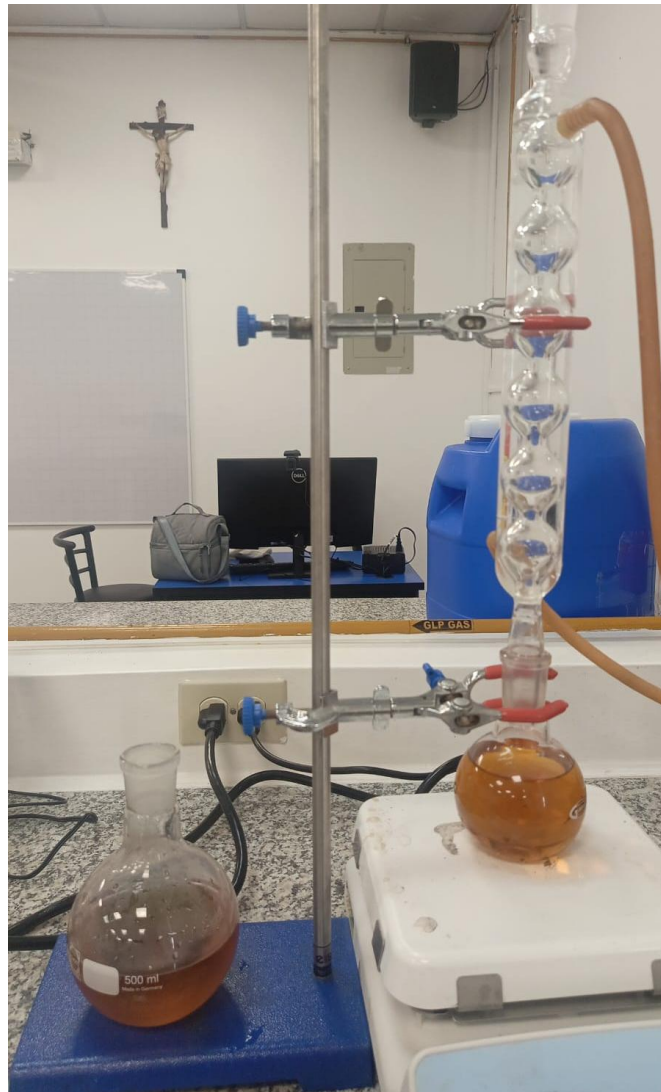
- M_0 = Peso de muestra seca
- M_1 = Peso de celulosa seca

Ecuación 3. Ejercicio para sacar porcentaje de celulosa

$$\% \text{ Celulosa} = \frac{M_1}{M_0} \times 100$$

Nota. Extraído de Verónica Hernao & Antonio Giraldo, (s. f.).

Figura 17. Determinación de celulosa.



Nota. Elaborado por autores (2026).

3.8.5. Porcentaje De Lignina

Para la determinación del porcentaje de lignina del bagazo de caña de azúcar se empleó la metodología TAPPI T-222 om-98, también conocida como método Klason (Jonglertjunya et al., 2014). Para ello, se utilizaron equipos de filtración al vacío, agitador magnético, mufla y molino, así como materiales de laboratorio como vasos de precipitación, matraces, papel filtro, varilla de agitación, ácido sulfúrico al 40 % y agua caliente. El procedimiento consistió en colocar 2 g de muestra previamente molida en un

vaso de precipitación de 500 mL, a la cual se añadieron 15 mL de H₂SO₄ al 40 % a una temperatura de 13 °C, agitándose constantemente durante 1 minuto; posteriormente, la mezcla se dejó reposar durante 1 hora con agitación continua a 19 °C. Finalizado este tiempo, la mezcla fue transferida a un matraz de 1 L y se diluyó el ácido hasta una concentración aproximada del 3 % mediante la adición de 200 mL de agua destilada, tras lo cual se llevó a ebullición durante 2 horas a 70 °C. Una vez enfriado el sistema y observada la decantación del material insoluble, se realizó la filtración al vacío empleando papel filtro previamente secado, lavándose el residuo con aproximadamente 500 mL de agua caliente hasta eliminar completamente el ácido. Finalmente, el papel filtro con el residuo fue secado en la estufa a 100 °C durante 2 horas, y el contenido de lignina se pesó con la balanza analítica BIECO Germany y se determinó la masa del residuo insoluble obtenida, utilizando la ecuación correspondiente del método Klason (Chávez-Sifontes & Domine, 2013).

A= Peso del papel filtro con la muestra húmeda

B = Peso del papel filtro con la muestra seca

C = Peso de la muestra seca

Ecuación 4. Ejercicio para sacar porcentaje de lignina.

$$\% \text{ Lignina} = \frac{A - B}{C} \times 100$$

Nota. Extraído de Echeverría Narváez, (2021).

3.8.6. Preparación del bagazo

La trituración y limpieza del bagazo de caña de azúcar son pasos esenciales antes del hidrolizado, porque permiten acondicionar adecuadamente la biomasa. Triturar el bagazo reduce el tamaño de las fibras y aumenta la superficie de contacto, facilitando que los ácidos penetren la estructura lignocelulósica y liberen los carbohidratos que luego se convertirán en azúcares fermentables. A su vez, la limpieza elimina tierra, restos vegetales, compuestos solubles y microorganismos que pueden interferir en la reacción, y disminuir la eficiencia del proceso o generar inhibidores para etapas posteriores como la fermentación (Anukam et al., 2016).

Figura 18. Acondicionamiento de la materia prima.



Nota. Elaborado por autores (2026).

3.9. DESARROLLO EXPERIMENTAL DE LA OBTENCIÓN DE ETANOL

3.9.1. Fase 1 la hidrólisis (ácida)

Para la preparación del reactivo ácido y la ejecución del proceso de hidrólisis, el bagazo de caña de azúcar fue previamente triturado con el fin de reducir su tamaño de partícula y posteriormente limpiado para eliminar polvo, tierra y sólidos extraños. Para la obtención de la solución ácida diluida, se colocaron 1960 mL de agua destilada y se añadieron lentamente 40 mL de H_2SO_4 al 10 %, mezclándose cuidadosamente hasta obtener una solución final de 2000 ml con una concentración aproximada del 2 % v/v de ácido

sulfúrico. Se repitió este procedimiento 2 veces más, hasta completar 6000 ml, cada bandeja de aluminio tendrá 2000 ml de difusión, El procedimiento descrito se encuentra documentado en el (Anexo 7). A continuación, se cargaron 200 g de bagazo triturado por bandeja de aluminio en el reactor y se añadió la totalidad de la solución ácida preparada. El sistema fue sometido a hidrólisis térmica a una temperatura de 130 °C durante un intervalo 1 h, dependiendo de la concentración del ácido y la presión de operación, considerando que concentraciones más elevadas permiten tiempos de reacción menores. Finalizado el tratamiento térmico, el reactor fue enfriado rápidamente hasta alcanzar una temperatura inferior a 40 °C, con el objetivo de evitar la formación de subproductos inhibidores como furfural e hidroximetilfurfural (HMF). Finalmente, el material resultante fue sometido a un proceso de filtración para separar la fracción líquida hidrolizada, rica en azúcares solubles, de los sólidos residuales constituidos principalmente por lignina y fibras no hidrolizadas (Chandler et al., 2012).

Figura 19. Mezcla final de la disolución de ácido y el bagazo.



Nota. Elaborado por autores (2026).

3.9.2. Fase 1.1 la detoxificación

El proceso de detoxificación del hidrolizado se llevó a cabo con el objetivo de eliminar compuestos inhibidores generados durante la hidrólisis ácida, tales como ligninas solubles, compuestos fenólicos y derivados furfurálicos. Inicialmente, el hidrolizado fue

sometido a una neutralización mediante la adición gradual de NaOH (2–4 M) hasta alcanzar un pH aproximado de 10, lo que permitió neutralizar el ácido sulfúrico residual según la reacción de formación de sulfato de sodio y favoreció la precipitación de ligninas e inhibidores debido a cambios en su solubilidad y carga superficial. Posteriormente, el hidrolizado fue calentado a 70 °C durante 20 minutos para inducir la coagulación térmica de los compuestos precipitados, y luego se dejó en reposo por un período de 60 minutos para permitir la decantación de los sólidos formados. El sobrenadante obtenido fue separado y sometido a un filtrado primario, preferentemente al vacío, con el fin de remover partículas finas remanentes. A continuación, el pH del hidrolizado fue reajustado hasta un valor cercano a 5 mediante la adición de ácido acético o ácido cítrico, condición compatible con la fermentación alcohólica por levaduras del género *Saccharomyces*. Finalmente, se realizó una etapa de adsorción añadiendo entre 1 y 5 % p/v de carbón activado, con agitación continua durante 15 a 30 minutos para promover la remoción de compuestos aromáticos e inhibidores residuales, concluyendo el proceso con una filtración final para eliminar el carbón y obtener un hidrolizado detoxificado apto para la fermentación. (Jönsson et al., 2013).

Figura 20. Filtración del hidrolizado ya detoxificado.



Nota. Elaborado por autores (2026).

3.9.3. Fase 2 la fermentación (Microorganismo- *Saccharomyces Cerevisiae*).

Una vez finalizado el proceso de detoxificación, el hidrolizado fue acondicionado previo a la inoculación con el fin de garantizar la supervivencia y adecuada actividad metabólica de la levadura, considerando el ajuste de pH y temperatura, la eliminación de compuestos

inhibidores residuales y el establecimiento de condiciones anaerobias. Previo a la inoculación, la temperatura del hidrolizado se ajustó en un rango de 28 a 32 °C, considerado óptimo para *Saccharomyces cerevisiae*, evitando valores superiores a 35 °C debido al riesgo de mortalidad celular, y el pH se reguló entre 5.0 y 5.5 para favorecer la tolerancia alcohólica. La inoculación se realizó mediante la hidratación previa de la levadura en agua tibia a una temperatura aproximada de 35 a 38 °C durante 10 minutos, seguida de su incorporación gradual al hidrolizado sin agitación vigorosa; posteriormente, el reactor o fermentador se colocó en botellas y posteriormente se selló con globos con un hueco muy pequeño para impedir el ingreso de oxígeno y salir el CO₂ logrando estar en condiciones anaerobias. Durante el proceso de fermentación, se controlaron de manera continua los parámetros de temperatura y pH, manteniéndose la temperatura dentro del rango óptimo de 28 a 32 °C y el pH entre 5.0 y 5.5, considerando que la fermentación tiende a acidificar el medio y evitando que el pH descendiera por debajo de 4.0 para prevenir la inhibición de la actividad celular y asegurar una adecuada producción de etanol (Parapouli et al., 2020).

3.9.4. Fase 3 la destilación

Esta etapa correspondió al proceso de separación y purificación del etanol contenido en el vino de fermentación, el cual se basó en la diferencia entre los puntos de ebullición del etanol (78 °C) y del agua (100 °C). Mediante este procedimiento se llevó a cabo la primera purificación del alcohol, lo que permitió incrementar su concentración a partir de valores iniciales bajos (2–5 %). Para ello, el fermentado fue sometido a una destilación simple, obteniéndose un destilado con una mayor concentración alcohólica (Ravagnani et al., 2010).

Figura 21. Destilación simple del hidrolizado.



Nota. Elaborado por los autores (2026).

3.10. ANÁLISIS ESTADÍSTICO DE LOS DATOS

Para el análisis estadístico de los datos obtenidos en este estudio se utilizó el software INFOSTAT desarrollado por la Universidad Nacional de Córdoba, Argentina. INFOSTAT es una herramienta ampliamente utilizada en investigaciones agroindustriales, biotecnológicas y experimentos de diseño factorial que permite realizar de forma segura y eficiente análisis estadísticos descriptivos y no paramétricos, pruebas de significancia, análisis de varianza (ANOVA), pruebas de rango como Kruskal-Wallis, regresión lineal y otros procedimientos estadísticos.

El uso de INFOSTAT permitió determinar la significancia de las diferencias en los porcentajes de alcohol observadas en diferentes tiempos de fermentación, así como identificar tendencias y correlaciones entre variables en el proceso de fermentación, que sustentan de manera objetiva y reproducible la interpretación de los resultados.

CAPÍTULO IV

4. RESULTADOS

4.1. CARACTERIZACIÓN DE LA MATERIA PRIMA

La caracterización físico-química de la materia prima, correspondiente al bagazo de caña de azúcar, se realizó mediante la determinación de parámetros como pH, contenido de humedad, cenizas, celulosa y lignina, cuyos resultados se presentan en las tablas correspondientes. Estos parámetros permitieron evaluar las condiciones iniciales del material lignocelulósico y su potencial aprovechamiento como sustrato en el proceso de obtención de bioetanol, debido a su influencia en las etapas de hidrólisis y fermentación alcohólica.

4.1.1. Parámetro del pH del bagazo

Los valores de pH obtenidos de las 5 muestras, en la caracterización del bagazo, según lo consignado en el (Anexo 2) presentaron un promedio total de 3.86, evidenciando un carácter ligeramente ácido del bagazo de caña de azúcar. Esto es debido a la presencia de compuestos orgánicos y ácidos naturales generados durante el almacenamiento y degradación parcial del material vegetal.

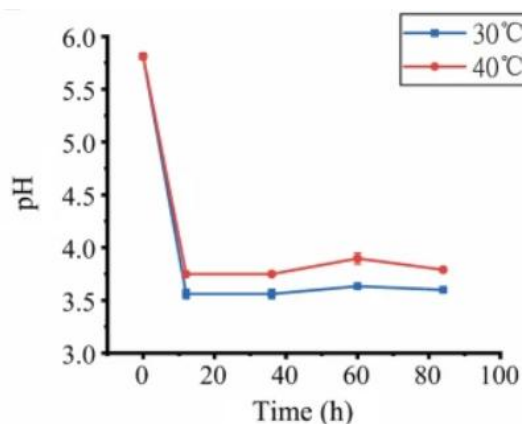
Tabla 4. Parámetros de pH tomados del bagazo.

Peso en g de bagazo= 60 g						
Peso en ml de agua destilada= 600 ml						
N° MUESTRAS	REP 1	REP 2	REP 3	REP 4	REP 5	MEDIA
1	3.83	3.86	3.87	3.89	3.90	3.87 ± 0.02
2	3.74	3.75	3.78	3.83	3.81	3.78 ± 0.03
3	3.91	3.90	3.87	3.91	3.86	3.89 ± 0.02
4	3.80	3.84	3.79	3.87	3.89	3.83 ± 0.03
5	3.92	3.96	3.97	3.87	3.94	3.93 ± 0.04

Nota. Elaborado por los autores (2026).

Se realizó una investigación en la cual el bagazo fresco presenta valores de pH entre 5.0 y 6.5; sin embargo, el bagazo fermentado o almacenado puede disminuir su pH hasta valores comprendidos entre 3.5 y 4.5. En este estudio, los valores de pH obtenidos para las muestras de bagazo analizadas se encontraron dentro de este rango, con promedios que oscilaron entre 3.78 ± 0.03 y 3.93 ± 0.04 , lo que evidencia una baja variabilidad entre las repeticiones, confirmada por las desviaciones estándar registradas. Asimismo, se ha evidenciado que durante las primeras 12 horas de almacenamiento del bagazo a una temperatura aproximada de 30 °C, el pH experimenta una reducción significativa, estabilizándose posteriormente en valores cercanos a los observados experimentalmente (Peng et al., 2021).

Figura 22. Deterioro del pH durante el periodo de almacenamiento en 12 h.



Nota. Extraído de Deterioro fúngico del bagazo de almacenamiento de la caña de azúcar cosechada de Peng et al., (2021).

4.1.2. Parámetro de la humedad del bagazo

Los valores de humedad obtenidos de las 5 muestras durante la caracterización del bagazo, los cuales se detallan en el (Anexo 3), presentaron un valor máximo de 57.7 % de humedad, evidenciando un alto contenido de agua en el bagazo de caña de azúcar, característica propia de este residuo agroindustrial debido a su naturaleza fibrosa y al proceso de extracción del jugo de la caña. Este comportamiento se debe a la capacidad del bagazo para retener agua en su estructura lignocelulósica, lo cual incide en la hidrólisis ácida y fermentación.

Tabla 5. Parámetros de humedad tomados del bagazo.

Muestra de bagazo fresca				
N° MUESTRAS	PESO (g)	TIEMPO (min)	TEMPERATURA (C°)	PORCENTAJE (%)
1	1.8	5	105	1.9 %
2	1.7	10	105	2.8 %
3	1.8	15	105	16.1 %
4	1.8	20	105	52.4 %
5	1.9	25	105	57.7 %

Nota. Elaborado por los autores (2026).

Estos estudios según Sonaje, (2015) reportan que el bagazo fresco de caña de azúcar presenta contenidos de humedad comprendidos entre 45 % y 60 %, de acuerdo con las condiciones de almacenamiento y la duración del periodo transcurrido, estos valores coinciden con los datos conseguidos en el estudio, confirmando que la materia prima mantiene características adecuadas para su aprovechamiento en la producción de bioetanol.

4.1.3. Parámetro de cenizas del bagazo

Durante la caracterización de la materia prima, el contenido de cenizas fue determinado mediante calcinación en mufla durante 4 horas, empleando una masa inicial de 2 g de muestra por ensayo, con base en los datos experimentales registrados en el (Anexo 4). Los datos conseguidos evidenciaron valores de cenizas comprendidos entre 0.0737 g y 0.2462 g, correspondientes a un contenido promedio de 7.90 %. Este resultado indica la presencia de materia inorgánica residual propia del material vegetal, la cual forma parte natural de la estructura del bagazo. El contenido de cenizas obtenido no representó interferencias durante las etapas posteriores del proceso experimental, permitiendo el adecuado desarrollo de la hidrólisis ácida y la fermentación alcohólica.

Tabla 6. Parámetros de cenizas tomados del bagazo.

peso en g del bagazo= 2 g

Tiempo total en la mufla= 4h

N° MUESTRAS	PESO DEL CRISOL VACIO	PESO DEL CRISOL CON LA MUESTRA	TOTAL, DE CENIZAS (g)	PORCENTAJE (%)
1	44.3852	44.5645	0.1793 g	8.97 %
2	39.5980	39.7222	0.1242 g	6.21 %
3	32.4971	32.7433	0.2462 g	12.31 %
4	29.9133	29.9870	0.0737 g	3.69 %
5	39.9142	40.0805	0.1663 g	8.32 %

Nota. Elaborados por autores (2026).

Investigaciones relacionadas por Resano et al., (2022), con la caracterización del bagazo reportan contenidos de cenizas, valores entre 10.09 % y 12.43 %, dependiendo del origen del cultivo y de las condiciones de procesamiento, según estos valores se determina que el bagazo se encuentra dentro de rangos reportados para materiales lignocelulósicos, lo que confirma que la materia prima presenta características adecuadas para su aprovechamiento en la obtención de bioetanol.

4.1.4. Parámetro de contenido de celulosa del bagazo

Los valores obtenidos del contenido de celulosa en las cinco muestras analizadas, a partir de los resultados correspondientes al (Anexo 5), presentaron un promedio de 8.30 %, evidenciando la presencia de material estructural susceptible de ser transformado en azúcares fermentables. El valor máximo registrado fue de 8.71 %, determinado a partir del procedimiento experimental aplicado. Este resultado corresponde a la fracción de celulosa recuperada bajo las condiciones de tratamiento empleadas, por lo que representa un rendimiento de obtención y puede diferir de los valores reportados en la literatura para la composición total del bagazo. Dichas variaciones se atribuyen principalmente al método de extracción utilizado, al tipo de pretratamiento aplicado y a las condiciones de

análisis empleadas. No obstante, los resultados obtenidos confirman la presencia de celulosa como uno de los principales componentes estructurales del bagazo, evidenciando el potencial de esta materia prima para su aprovechamiento en procesos de obtención de bioetanol.

En la siguiente investigación se reporta que el bagazo de caña contiene aproximadamente entre 35 % y 50 % de celulosa, y puede variar según los factores y el origen del cultivo, condiciones de crecimiento y métodos de determinación (Canilha et al., 2011).

Tabla 7. Parámetros de contenido de celulosa tomados del bagazo.

peso en g del bagazo= 2 g					
Nº MUESTRAS	PESO (g)	PESO DEL CRISOL VACIO	PESO DEL CRISOL CON LA MUESTRA	TOTAL, DE CELULOSA (g)	EN PORCENTAJE (%)
1	2.01	40.6148	40.4524	0.1624	8.12 %
2	2.12	40.6253	40.4512	0.1741	8.71 %
3	2.04	40.6198	40.4519	0.1679	8.40 %
4	2.10	40.6149	40.4601	0.1548	7.74 %
5	2.14	40.6212	40.4502	0.1710	8.55 %

Nota. Elaborados por los autores (2026).

4.1.5. Parámetro de contenido de lignina del bagazo

Los valores obtenidos del contenido de lignina en las cinco muestras analizadas, e acuerdo con la información registrada en el (Anexo 6), presentaron porcentajes comprendidos entre 9.93 % y 10.16 %, con un promedio cercano al 10 %, lo que evidencia la presencia de este componente estructural característico del bagazo de caña de azúcar. La lignina forma parte de la matriz lignocelulósica y actúa como un polímero que aporta rigidez y resistencia a la estructura vegetal, influyendo directamente en la accesibilidad de la celulosa durante los procesos de hidrólisis. Los resultados obtenidos en el presente estudio se encuentran dentro de rangos reportados en investigaciones sobre la

composición química, donde se han determinado contenidos de lignina cercanos al 9.74% en bagazo industrial y valores variables dependiendo del origen del material y del tratamiento aplicado (Resano, Oscar W. Guillen, et al., 2022) .

Tabla 8. Parámetros de contenido de lignina tomados del bagazo.

peso en g del bagazo= 2 g					
Nº MUESTRAS	PESO (g)	PESO DEL PAPEL FILTRO	PESO DEL PAPEL FILTRO CON LA MUESTRA	TOTAL, DE LIGNINA (g)	EN PORCENTAJE (%)
1	2.04	0.8030	1.0056	0.2026	10.13 %
2	2.01	0.7701	0.9687	0.1986	9.93 %
3	2.09	0.7902	0.9889	0.1987	9.94 %
4	2.07	0.7956	0.9964	0.2008	10.04 %
5	2.06	0.8049	1.0081	0.2032	10.16 %

Nota. Elaborados por los autores (2026).

4.2. PRIMERA FASE PARA LA OBTENCIÓN DE ETANOL

4.2.1. Parámetros de la fase de hidrolisis acida

Tabla 9. Parámetro tomado después de la hidrolisis acida.

PARÁMETRO	REP 1	REP 2	REP 3	REP 4	REP 5	Media
pH	2.28	2.34	2.29	2.31	2.3	2.3 ± 0.02
Grados Brix (°Bx)	3.5	3.7	3.6	3.6	3.6	3.6 ± 0.07
Turbidez (NTU)	305	318	313	314	312	312 ± 4.72
Conductividad eléctrica (mS/cm)	11.8	12.2	12.1	11.9	12	12 ± 0.16
fenoles mg/l fenol	0.075	0.079	0.078	0.076	0.077	0.077 ± 0.002
Color (UC)	248	260	257	256	255	255 ± 4.44

Nota. Elaborado por los autores (2026).

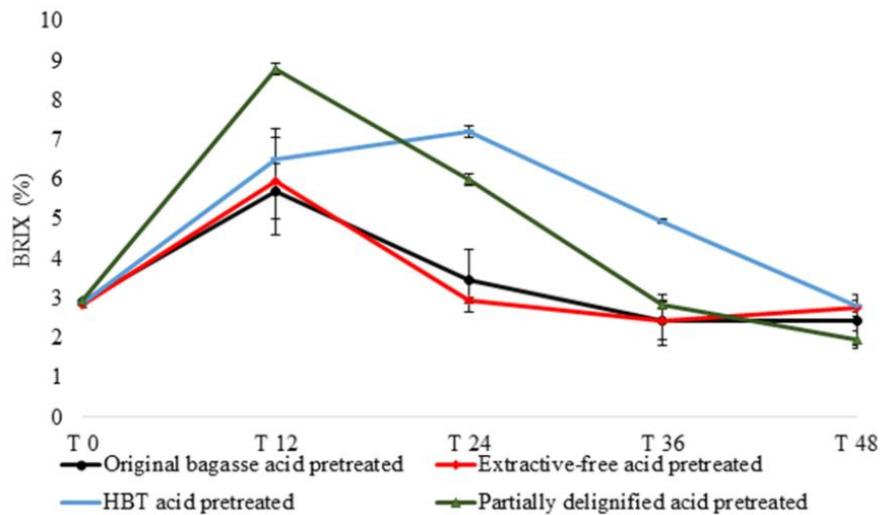
4.2.1.1. Potencial de hidrogeno (pH) de hidrolisis acida

Los valores obtenidos durante la caracterización del hidrolizado, producto de la hidrólisis ácida del bagazo de caña de azúcar, presentaron un pH promedio de 2.30 ± 0.02 , evidenciando un medio ácido característico de este tipo de tratamiento químico. La baja variabilidad observada entre las repeticiones, reflejada en la desviación estándar registrada, indica una adecuada repetibilidad del proceso experimental. Este comportamiento se atribuye a la utilización de agentes ácidos durante la hidrólisis, los cuales favorecen la ruptura de la estructura lignocelulósica y permiten la liberación de azúcares fermentables. Diversos documentos técnicos y desarrollos tecnológicos relacionados con la hidrólisis de materiales lignocelulósicos reportan que los hidrolizados obtenidos mediante tratamientos ácidos presentan valores de pH bajos, generalmente en rangos comprendidos entre 1.5 y 3.0. En este contexto, el pH registrado en el presente estudio se encuentra dentro de los valores comúnmente reportados para este tipo de procesos, confirmando la adecuación del tratamiento aplicado (Zavrel, 2015).

4.2.1.2. Grados Brix (°Bx) de hidrolisis acida

Los valores de grados Brix obtenidos en el hidrolizado evidencian la presencia de sólidos solubles generados durante el tratamiento aplicado al bagazo de caña de azúcar. En el presente estudio, el hidrolizado presentó un valor promedio de 3.6 ± 0.07 °Brix, lo que indica una concentración moderada de compuestos solubles liberados durante la hidrólisis ácida. El °Brix se emplea como un parámetro indirecto para el seguimiento de la liberación y variación de compuestos solubles en matrices lignocelulósicas sometidas a procesos de hidrólisis y fermentación, ya que permite estimar la concentración de azúcares y otros compuestos solubles presentes en el medio. Diversos estudios han reportado variaciones en los valores de °Brix en función del tipo y la severidad del pretratamiento aplicado al bagazo. En la Figura (19) se observa que el bagazo en su estado inicial (tiempo 0) presenta valores cercanos a 3 °Brix, comportamiento que coincide con los resultados obtenidos en el presente estudio, considerando el incremento asociado al proceso de hidrólisis aplicado (Schmatz, 2023).

Figura 23. Variación del BRIX durante la fermentación con bagazo con diferentes pretratamientos.



Nota. Extraído de Variación del grado BRIX Schmatz, (2023).

4.2.1.3. Turbidez de hidrolisis acida

La turbidez promedio observada en el hidrolizado fue de 312 ± 4.72 NTU, lo que indica una considerable presencia de partículas suspendidas, originadas por la degradación parcial y la liberación de componentes estructurales de la fibra lignocelulósica durante el proceso de hidrólisis ácida. La desviación estándar registrada evidencia una variabilidad moderada entre las repeticiones, asociada a la heterogeneidad del material lignocelulósico. Este comportamiento es común en hidrolizados de biomasa lignocelulósica antes de la aplicación de etapas de filtración o clarificación, debido a la presencia de compuestos sólidos en suspensión que no han sido eliminados del medio líquido. Diversos estudios han demostrado que los hidrolizados obtenidos tras pretratamientos químicos presentan elevados niveles de turbidez, los cuales requieren métodos de separación adicionales para su reducción (Yasarla & Ramarao, 2013).

4.2.1.4. Conductividad eléctrica de hidrolisis acida

La conductividad eléctrica promedio registrada en el hidrolizado fue de 12.0 ± 0.16 mS/cm, lo que indica una considerable presencia de iones disueltos. Estos iones se generan tanto a partir de los productos de degradación del agente químico utilizado en la hidrólisis ácida como por la liberación de minerales y otros compuestos solubles provenientes de la matriz del bagazo de caña de azúcar. La baja desviación estándar observada refleja una adecuada repetibilidad de las mediciones realizadas. La presencia de estos iones contribuye al incremento de la conductividad eléctrica de la solución, comportamiento que es consistente con los principios generales de la conductimetría aplicados a medios con alta concentración de electrólitos y con lo reportado en la literatura, respaldando así la coherencia de los resultados experimentales obtenidos en el presente estudio (Oriez et al., 2019).

4.2.1.5. Fenoles de hidrolisis acida

El contenido promedio de fenoles registrado en el hidrolizado fue de 0.077 ± 0.002 mg/L, lo que indica la presencia de compuestos fenólicos derivados de la degradación parcial de la lignina durante la hidrólisis ácida del bagazo de caña de azúcar. Estos compuestos, que incluyen ácidos fenólicos y otros derivados aromáticos, se identifican como productos típicos de la descomposición de la lignocelulosa durante pretratamientos químicos y se encuentran comúnmente en hidrolizados lignocelulósicos. La baja desviación estándar observada evidencia una escasa variabilidad entre las repeticiones. Diversos estudios han señalado que los compuestos fenólicos pueden ejercer efectos inhibitorios sobre el crecimiento microbiano y la fermentación alcohólica cuando se encuentran en concentraciones elevadas; sin embargo, en hidrolizados con niveles bajos de fenoles, como los obtenidos en el presente estudio, dicha influencia puede ser mínima o mitigable. En este sentido, los resultados obtenidos son consistentes con lo reportado en la literatura y sugieren que la fermentación alcohólica no sufriría una inhibición significativa bajo las condiciones analizadas (Wang et al., 2025).

4.2.1.6. Color de hidrolisis acida

El valor promedio de color registrado en el hidrolizado fue de 255 ± 4.44 UC, lo cual se asocia con la presencia de compuestos orgánicos solubles y productos de degradación

generados durante la hidrólisis ácida del bagazo de caña de azúcar. La baja variabilidad observada entre las repeticiones, reflejada en la desviación estándar registrada, se relaciona con la naturaleza heterogénea de los compuestos liberados durante el proceso. Los tratamientos de hidrólisis aplicados a biomasa lignocelulósica suelen producir cambios cromáticos en la fase líquida del hidrolizado, atribuibles a la liberación de compuestos derivados de la lignina y a productos resultantes de reacciones de degradación térmica o química de carbohidratos y otros constituyentes de la biomasa. Diversos estudios sobre pretratamientos e hidrólisis han descrito que la formación de compuestos solubles provoca variaciones cuantificables en características como la tonalidad y la intensidad de color, comportamiento que concuerda con los resultados obtenidos en el presente estudio (Barroso et al., 2022).

4.3. SEGUNDA FASE PARA LA OBTENCIÓN DE ETANOL

4.3.1. Parámetros de la fase de fermentación

La fermentación alcohólica mostró cambios graduales en los parámetros fisicoquímicos evaluados a lo largo del tiempo, comportamiento que ha sido ampliamente descrito en estudios de fermentación alcohólica. El pH disminuyó gradualmente desde valores iniciales cercanos a 5.05-5.15 el día 0 hasta valores entre 4.38 y 4.39 el día 7, lo que se debe a la formación de compuestos ácidos por la actividad metabólica de la levadura según lo reportado en la literatura especializada. La temperatura se mantuvo relativamente constante en torno a los 26 °C lo que según estudios previos se consideró suficiente para el normal desarrollo del proceso de fermentación. Asimismo, los grados Brix mostraron una disminución gradual desde valores iniciales de 4.0 a 4.6 °Bx hasta valores finales de 1.5 a 1.6 °Bx, demostrando el consumo de azúcares fermentables durante la producción de etanol, lo cual ha sido documentado en procesos de fermentación alcohólica. Asimismo, la densidad disminuyó de 1.042 kg/m³ a valores cercanos a 1.014-1.015 kg/m³, confirmando la conversión de azúcares en alcohol y dióxido de carbono, lo que corresponde al comportamiento descrito en la literatura sobre fermentación alcohólica. La turbiedad mostró poca variación durante el proceso, manteniéndose en un rango cercano a 4.58-5.10 NTU, lo cual se debe a la presencia de biomasa microbiana y compuestos en la suspensión, lo cual generalmente se observa durante el desarrollo de la fermentación debido al crecimiento de células de levadura. Finalmente, el contenido de

alcohol mostró un aumento gradual desde 0.0% el día 0 hasta valores máximos de 2.4% el día 7, indicando el adecuado desarrollo del proceso de fermentación y la conversión de los azúcares del hidrolizado a etanol, como lo reportan estudios similares (Walker et al., 2021).

Tabla 10. Parámetros de la fase de fermentación.

TIEMPO (DÍAS)	Nº MUESTRA	pH	TEMPERATURA (°C)	GRADOS BRIX (°Bx)	DENSIDAD (Kg/m ³)	TURBIDEZ (NTU)	CONTENIDO DE ALCOHOL (%)
DÍA 0	F1	5.05	26.0	4.0	1.042	4.76	0.0
	F2	5.11	26.0	4.1	1.041	4.70	0.0
	F3	5.15	26.1	4.6	1.040	4.72	0.0
DÍA 3	F4	4.80	26.2	3.5	1.035	5.10	0.9
	F5	4.75	26.1	3.3	1.034	5.05	1.0
	F6	4.78	26.0	3.4	1.034	5.08	0.95
DÍA 5	F7	4.55	26.1	2.4	1.025	4.90	1.8
	F8	4.50	26.0	2.3	1.024	4.85	1.9
	F9	4.52	26.1	2.2	1.023	4.88	2.0
DÍA 7	F10	4.40	26.0	1.6	1.015	4.60	2.3
	F11	4.38	26.1	1.5	1.014	4.58	2.4
	F12	4.39	26.0	1.6	1.015	4.59	2.4

Nota. Elaborado por los autores (2026).

4.4. TERCERA FASE PARA LA OBTENCIÓN DE ETANOL

4.4.1. Parámetros del etanol obtenido de la fase de destilación

Tabla 11. Parámetros de la fase de Etanol.

TIEMPO (DÍAS)	N° MUESTRA	pH	DENSIDAD	TEMPERATURA (°C)
DÍA 0	F1	5.06	1.042	26.0
	F2	5.12	1.041	26.1
	F3	5.15	1.040	26.2
DÍA 3	F4	5.80	1.035	26.0
	F5	5.78	1.034	26.1
	F6	5.79	1.034	26.0
DÍA 5	F7	5.77	1.025	26.0
	F8	5.76	1.024	25.9
	F9	5.78	1.023	26.0
DÍA 7	F10	5.75	1.015	26.0
	F11	5.74	1.014	26.1
	F12	5.76	1.015	26.0

Nota. Elaborado por los autores (2026).

4.4.2. Concentración de etanol obtenido en porcentaje

De acuerdo con los resultados obtenidos en la Tabla 12, se observa un incremento progresivo en la concentración de alcohol a medida que avanzó el tiempo de fermentación. En el día 0 no se registró contenido alcohólico, lo cual confirma la ausencia inicial de etanol antes del inicio de la actividad fermentativa. A partir del día 3 se evidenció la producción de alcohol con valores entre 5.6 y 6.3 %, incrementándose significativamente en el día 5 hasta alcanzar valores entre 9.4 y 10.1 %. Finalmente, en el día 7 se registraron las mayores concentraciones alcohólicas, con valores comprendidos entre 12.4 y 12.9 %, indicando que la fermentación alcanzó su mayor rendimiento en este periodo. Estos resultados evidencian el adecuado desarrollo de la fermentación alcohólica y la eficiencia del proceso aplicado para la obtención de etanol, cuyos registros y evidencias fotográficas del proceso y resultados obtenidos se presentan en los (Anexos 21, 22 y 23).

Tabla 12. Concentración de alcohol.

TIEMPO (DÍAS)	N° MUESTRA	CONTENIDO DE ALCOHOL (%)
DÍA 0	F1	0.0
	F2	0.0
	F3	0.0
DÍA 3	F4	5.6
	F5	5.9
	F6	6.3
DÍA 5	F7	9.4
	F8	9.7
	F9	10.1
DÍA 7	F10	12.4
	F11	12.7
	F12	12.9

Nota. Elaborado por los autores (2026).

4.4.3. Contenido de etanol analizado estadísticamente con prueba de Kruskal–Wallis

Debido al tamaño reducido de muestra por grupo ($n = 3$) y a la naturaleza temporal de los datos, se optó por el uso de pruebas no paramétricas y análisis de regresión, evitando supuestos estrictos de normalidad. Esta elección metodológica permitió obtener resultados estadísticamente válidos y coherentes con el diseño experimental.

Figura 24 Tabla de prueba de Kruskal–Wallis

Nueva tabla : 08/02/2026 - 09:04:06 p. m. - [Versión : 30/04/2020]

Prueba de Kruskal Wallis

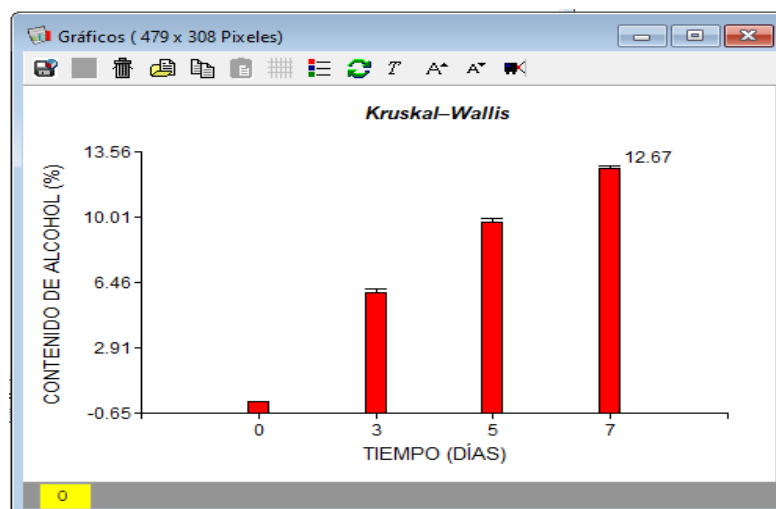
Variable	TIEMPO (DÍAS)	N	Medias	D.E.	Medianas	gl	H	p
CONTENIDO DE ALCOHOL (%)	0	3	0.00	0.00	0.00	3	10.38	0.0145
CONTENIDO DE ALCOHOL (%)	3	3	5.93	0.35	5.90			
CONTENIDO DE ALCOHOL (%)	5	3	9.73	0.35	9.70			
CONTENIDO DE ALCOHOL (%)	7	3	12.67	0.25	12.70			

KruskalWallis

Nota. Elaborado por autores (2026).

El análisis no paramétrico mediante la prueba de Kruskal–Wallis mostró diferencias estadísticamente significativas en el contenido de alcohol entre los distintos tiempos evaluados ($p < 0.05$), lo que indica que el contenido alcohólico varía de manera significativa a lo largo del tiempo.

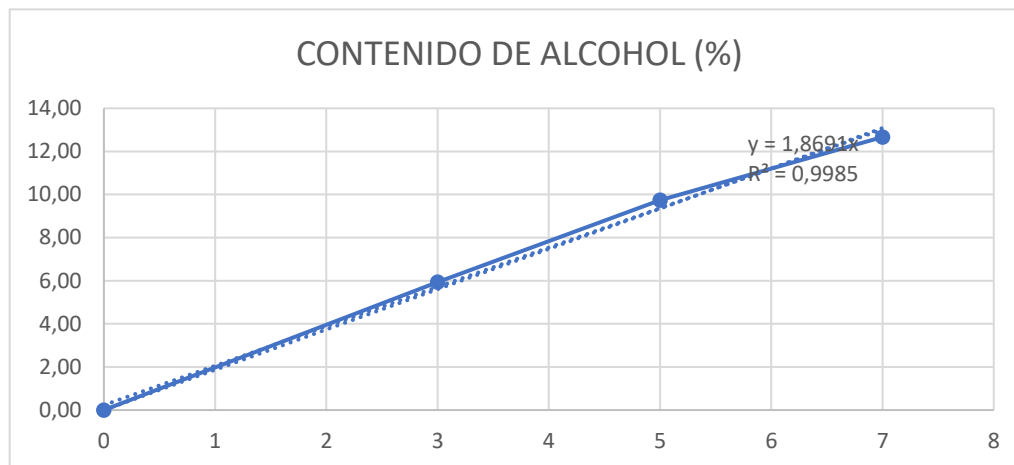
Figura 25 Grafico de contenido de alcohol en relación con el tiempo



Nota. Elaborado por autores (2026).

Se observó una relación positiva significativa entre el tiempo y el contenido de alcohol que nos muestra la tabla (12), indicando un aumento del porcentaje de alcohol conforme avanza el proceso.

Figura 26 Grafica de la tendencia creciente del contenido de alcohol



Nota. Elaborado por autores (2026).

Los resultados indican una tendencia creciente estadísticamente significativa del contenido alcohólico en función del tiempo de fermentación. La prueba de Kruskal–Wallis confirmó la existencia de diferencias entre los tiempos evaluados, mientras que el análisis de regresión permitió modelar dicha relación, evidenciando un comportamiento sistemático y no aleatorio de la variable respuesta. Así mismo, el análisis de regresión evidenció una relación significativa entre el tiempo y el contenido de alcohol, observándose un aumento sostenido del porcentaje de alcohol a medida que transcurre el proceso, lo cual fue respaldado por la tendencia observada en el gráfico de dispersión.

Figura 27 Tabla de análisis de coeficiente de regresión y varianza

Resultados									
CONTENIDO DE ALCOHOL (%) 12 1.00 1.00 0.17 8.50 10.92									
Coeficientes de regresión y estadísticos asociados									
Coef	Est.	E.E.	LI (95%)	LS (95%)	T	p-valor	CpMallows	VIF	
const	12.67	0.16	12.30	13.04	78.81	<0.0001			
0	-12.67	0.23	-13.19	-12.14	-55.73	<0.0001	3107.38	1.50	
3	-6.73	0.23	-7.26	-6.21	-29.62	<0.0001	879.51	1.50	
5	-2.93	0.23	-3.46	-2.41	-12.90	<0.0001	168.54	1.50	
Cuadro de Análisis de la Varianza (SC tipo III)									
F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor				
Modelo	269.08	3	89.69	1157.32	<0.0001				
TIEMPO (DÍAS)	269.08	3	89.69	1157.32	<0.0001				
Error	0.62	8	0.08						
Total	269.70	11							

Nota. Elaborado por autores (2026).

CAPÍTULO V

5. DISCUSIÓN

La caracterización del bagazo de caña de azúcar mostró un pH ligeramente ácido cercano a 4 y un contenido promedio de celulosa de 8.30%. Estos resultados concuerdan con lo reportado en estudios sobre subproductos de la industria azucarera, donde se señala que “los subproductos del procesamiento de la caña presentan características fisicoquímicas particulares asociadas a su composición lignocelulósica y contenido de compuestos orgánicos residuales” (Singh et al., 2025). De igual manera, en relación con el contenido de celulosa, según Hernao y Giraldo indican que “la cuantificación de celulosa en materiales lignocelulósicos permite estimar su potencial para procesos de conversión bioquímica” (Verónica Hernao & Antonio Giraldo, 2009). Estas propiedades fisicoquímicas confirman la viabilidad del bagazo como materia prima en procesos de conversión bioquímica, siempre que se utilice un pretratamiento adecuado para degradar su estructura y liberar los azúcares fermentables necesarios para la producción de bioetanol.

Durante el proceso de hidrólisis ácida se obtuvo un valor de pH promedio de 2.30 y un contenido de sólidos solubles de 3.6 °Bx, lo que evidencia la descomposición de la matriz lignocelulósica del bagazo y la liberación de azúcares fermentables al medio líquido. En relación con este comportamiento, se ha señalado que “la hidrólisis de materiales lignocelulósicos mediante tratamiento ácido favorece la ruptura de la estructura polimérica y la liberación de azúcares solubles” (Zavrel, 2015). Asimismo, el grado °Bx es utilizado como un indicador de la concentración de sólidos solubles liberados durante el proceso, ya que “las variaciones en el grado Brix permiten evaluar la presencia y el incremento de compuestos solubles en el medio” (Schmatz, 2023). Si bien estos valores de °Bx son inferiores a los obtenidos en sustratos azucarados como el jugo de caña, resultan coherentes considerando que el bagazo presenta menor disponibilidad de azúcares libres. En este sentido, la posterior corrección del pH permitió establecer condiciones favorables para el desarrollo de la fermentación alcohólica.

Durante la etapa de fermentación alcohólica se observó una disminución gradual del pH, grados Brix y densidad del medio, acompañada de un aumento continuo en la concentración de etanol a medida que avanzaba el tiempo de fermentación. Los mayores

valores de graduación alcohólica se registraron al séptimo día con una concentración cercana al 12.9%, lo que muestra una correlación directa entre el tiempo de fermentación y el rendimiento alcohólico del proceso. Estos resultados coinciden con lo señalado por (Diaz Perez & Alarcon Llamó (2022), quienes en su estudio Determinación de Parámetros de Fermentación para la Obtención de una Bebida Alcohólica a Base de Pitahaya (*Hylocereus Megalanthus*) concluyeron que a mayor tiempo de fermentación y mayor cantidad de inóculo de levadura se produce una disminución significativa del pH, los grados Brix y la densidad, mientras que el grado alcohólico aumenta progresivamente.

El análisis estadístico no paramétrico mediante la prueba de Kruskal-Wallis confirmó la existencia de diferencias estadísticamente significativas en el contenido de alcohol entre los diferentes tiempos de fermentación ($p < 0.05$), evidenciando que el aumento observado en la concentración de etanol no se debe al azar, sino al efecto del tiempo en el proceso fermentativo. Asimismo, el análisis de regresión mostró una correlación positiva y significativa entre el tiempo de fermentación y el contenido de alcohol, indicando una tendencia creciente del porcentaje alcohólico a medida que avanzaba el proceso. Estos resultados confirman el adecuado rendimiento de la fermentación alcohólica y el potencial de la caña de azúcar como sustrato alternativo para la producción de bioetanol a partir de residuos agroindustriales. En este sentido, los hallazgos concuerdan con lo reportado por Hawaz et al. (2024), quienes en su estudio sobre la producción de bioetanol a partir de melaza de caña de azúcar mediante la cofermentación de *Saccharomyces cerevisiae* y *Wickerhamomyces anomalus* señalaron que la dinámica de fermentación y las condiciones experimentales influyen significativamente en el rendimiento de etanol, evidenciando una tendencia creciente en la producción alcohólica conforme avanza el proceso fermentativo.

6. CONCLUSIONES

El bagazo de caña de azúcar recolectado en los puestos de venta del sector La Bahía presentó características fisicoquímicas adecuadas para su aprovechamiento como materia prima en la producción de bioetanol. Los análisis de laboratorio permitieron identificar propiedades favorables para su transformación mediante procesos de hidrólisis y fermentación alcohólica, destacándose un contenido promedio de celulosa del 8.30 %, el cual evidencia la presencia de compuestos estructurales susceptibles de ser convertidos

en azúcares fermentables. En este sentido, se cumplió el objetivo planteado, ya que la caracterización físico-química realizada permitió confirmar el potencial del bagazo de caña de azúcar como sustrato viable para la fermentación alcohólica y su posible aprovechamiento en la obtención de bioetanol.

El proceso de hidrólisis ácida permitió la liberación eficiente de azúcares fermentables, reflejado en valores promedio de 3.6 ± 0.07 °Bx y $\text{pH } 2.30 \pm 0.02$, los cuales son condiciones favorables para la descomposición de la estructura lignocelulósica del bagazo y de acuerdo con lo reportado para este tipo de pretratamiento. Posteriormente, el ajuste del pH del hidrolizado permitió que la fermentación alcohólica se desarrollara adecuadamente.

Durante el proceso de fermentación se observó una disminución gradual del pH y grados Brix, lo que confirmó el consumo de azúcar por parte de la levadura *Saccharomyces cerevisiae* y su transformación en etanol, confirmando el correcto funcionamiento del proceso bioquímico bajo las condiciones experimentales evaluadas. El contenido alcohólico mostró un aumento paulatino a medida que avanzaba el tiempo de fermentación, alcanzando los valores más altos al séptimo día con una concentración máxima cercana al 12.9% (v/v). El análisis estadístico no paramétrico mediante la prueba de Kruskal-Wallis mostró diferencias estadísticamente significativas entre los tiempos de fermentación ($p < 0.05$), lo que confirma que el tiempo tiene un efecto significativo en la producción de etanol. Además, el análisis de regresión permitió establecer una correlación positiva significativa entre el tiempo de fermentación y el contenido de alcohol, lo que indica una tendencia continua de aumento del porcentaje de alcohol a lo largo del proceso, de acuerdo con el desarrollo observado experimentalmente.

En general, los resultados obtenidos muestran que la producción de bioetanol a partir del bagazo de caña de azúcar es técnicamente viable a escala experimental, lo que constituye una alternativa sostenible al aprovechamiento de residuos agroindustriales y ayuda a reducir el impacto ambiental asociado a su inadecuado manejo.

El aprovechamiento del bagazo proveniente de los puestos de venta del sector La Bahía demuestra que este residuo agroindustrial puede ser valorizado mediante procesos de hidrólisis y fermentación alcohólica, contribuyendo no solo a la obtención de bioetanol, sino también a la optimización del uso de residuos orgánicos. La caracterización físico-química realizada permitió confirmar su potencial como materia prima, evidenciando que

su reutilización representa una alternativa sostenible frente a su disposición inadecuada. La recolección y aprovechamiento del bagazo en este sector contribuye a la disminución de la acumulación de residuos en las calles, reduciendo problemas asociados a malos olores, proliferación de insectos y contaminación visual, además de evitar que estos desechos sean arrastrados hacia sistemas de alcantarillado o cuerpos de agua. De esta manera, el uso del bagazo para la producción de bioetanol favorece la minimización del impacto ambiental, promueve el manejo responsable de residuos urbanos.

7. RECOMENDACIONES

Se recomienda evaluar diferentes condiciones de hidrólisis ácida, como concentración de ácido, tiempo y temperatura, para optimizar la liberación de azúcares fermentables y reducir la formación de compuestos inhibidores que puedan afectar el desempeño del proceso de fermentación.

Es conveniente ampliar el número de réplicas y tratamientos de los experimentos evaluados para fortalecer el análisis estadístico y mejorar la confiabilidad de los resultados obtenidos, especialmente en lo que respecta al porcentaje de alcohol producido.

Resulta pertinente realizar estudios adicionales destinados a identificar y cuantificar compuestos inhibidores en el hidrolizado, como derivados de lignina y productos de degradación de carbohidratos, considerando su impacto potencial en la eficiencia de la fermentación alcohólica.

Se sugiere extender el tiempo de fermentación y monitorear el porcentaje de alcohol en diferentes intervalos para identificar el punto en el que el proceso de fermentación alcanza su máximo rendimiento y se estabiliza, permitiendo determinar el tiempo de fermentación óptimo para la obtención de alcohol a partir del hidrolizado del bagazo de caña.

Finalmente, se recomienda desarrollar estudios piloto para confirmar los resultados obtenidos a nivel de laboratorio y evaluar la factibilidad técnica del proceso de producción de bioetanol a partir del bagazo de caña de azúcar.

8. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- A. Asuero. (2019, enero). *Estudio de Mercado Sector Azúcar (2019) – Documento SCPM-IGT-INAC-003-2019*. 2019. https://www.sce.gob.ec/sitio/wp-content/uploads/2021/04/estudio_de_mercado_sector_azucar_SCPM-IGT-INAC-003-2019.pdf
- Abas, N., Kalair, A., & Khan, N. (2015). Review of fossil fuels and future energy technologies. *Futures*, 69, 31-49. <https://doi.org/10.1016/j.futures.2015.03.003>
- Acevedo, S., Colina, M., Díaz, A., Fernández, N., Behling, E., Marín, J., & Colina, G. (2007). Activación química del bagazo de caña de azúcar (*Saccharum officinarum*) en la adsorción de níquel (II) en efluentes industriales. *Revista Técnica de la Facultad de Ingeniería Universidad del Zulia*, 30(3), 244-252. http://ve.scielo.org/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0254-07702007000300006&lng=es&nrm=iso&tlng=es
- Aguilar-Rivera N. (2010). *Efecto del almacenamiento de bagazo de caña en las propiedades físicas de celulosa grado papel*. https://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1405-77432011000200008
- Alvira, P., Tomás-Pejó, E., Ballesteros, M., & Negro, M. J. (2010). Pretreatment technologies for an efficient bioethanol production process based on enzymatic hydrolysis: A review. *Bioresource Technology*, 101(13), 4851-4861. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2009.11.093>
- A.M. Philscholar®. (2025, julio 17). *Población y muestreo*. https://phil scholar.com/population-and-sampling/?utm_source=chatgpt.com
- Anukam, A., Mamphweli, S., Reddy, P., Meyer, E., & Okoh, O. (2016). Pre-processing of sugarcane bagasse for gasification in a downdraft biomass gasifier system: A comprehensive review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 66(3), 775-801. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.08.046>
- Arias, C., López, C., Sainz, L., Verdecia, M., & Eichler-Löbermann, C. (2021). *Potencial fertilizante de cenizas de bagazo de caña de azúcar de industrias azucareras*. <http://scielo.sld.cu/pdf/ind/v33n3/2224-5421-ind-33-03-452.pdf>
- Asobanca. (2022). *GUÍA DE PRODUCCIÓN DE AZÚCAR*. <https://asobanca.org.ec/wp-content/uploads/2022/12/8.-Guia-Produccion-de-azucar.pdf>
- Bader, Z. (2025). *Etanol vs. gasolina: ¿cuál es mejor para el medio ambiente?* <https://www.iowafarmbureau.com/Article/Ethanol-vs-gasoline-Which-one-is-better-for-the-environment-and-the-US>
- Bai, F. W., Anderson, W. A., & Moo-Young, M. (2008). Ethanol fermentation technologies from sugar and starch feedstocks. *Biotechnology Advances*, 26(1), 89-105. <https://doi.org/10.1016/j.biotechadv.2007.09.002>
- Barciela, P., Perez-Vazquez, A., Fraga-Corral, M., & Prieto, M. A. (2023). Utility Aspects of Sugarcane Bagasse as a Feedstock for Bioethanol Production: Leading Role of Steam Explosion as a Pretreatment Technique. *Processes*, 11(11). <https://doi.org/10.3390/pr11113116>
- Barroso, T., Sganzerla, W., Rosa, R., Castro, L., Maciel-Silva, F., Rostagno, M., & Forster-Carneiro, T. (2022). Semi-continuous flow-through hydrothermal pretreatment for the recovery of bioproducts from jabuticaba (*Myrciaria cauliflora*) agro-industrial by-product. *Food Research International*, 158, 111547. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2022.111547>
- Bertranda, R. L. (2019). Lag Phase Is a Dynamic, Organized, Adaptive, and Evolvable Period That Prepares Bacteria for Cell Division. *Journal of Bacteriology*, 201(7),

- e00697-18. <https://doi.org/10.1128/JB.00697-18>
- Bezerra, T. L., & Ragauskas, A. J. (2016). A review of sugarcane bagasse for second-generation bioethanol and biopower production. *Biofuels, Bioproducts and Biorefining*, 10(5), 634-647.
<https://doi.org/10.1002/BBB.1662>;WGROU:STRING:PUBLICATION
- Bioleader. (2025). *¿Es la caña de azúcar una fruta o una verdura?*
<https://www.bioleaderpack.com/es/es-la-cana-de-azucar-una-fruta-o-una-verdura/>
- Bogolitsyn, K. G., Gusakova, M. A., & Krasikova, A. A. (2021). Molecular self-organization of wood lignin–carbohydrate matrix. *Planta*, 254(2).
<https://doi.org/10.1007/s00425-021-03675-4>
- Bragato, M., Joshi, K., Carlson, J. B., Tenório, J. A. S., & Levendis, Y. A. (2012). Combustion of coal, bagasse and blends thereof: Part I: Emissions from batch combustion of fixed beds of fuels. *Fuel*, 96, 43-50.
<https://doi.org/10.1016/j.fuel.2011.12.072>
- Broda, M., Yelle, D. J., & Serwańska, K. (2022). Bioethanol Production from Lignocellulosic Biomass—Challenges and Solutions. *Molecules*, 27(24).
<https://doi.org/10.3390/molecules27248717>
- Canilha, L., Santos, V. T. O., Rocha, G. J. M., Almeida E Silva, J. B., Giulietti, M., Silva, S. S., Felipe, M. G. A., Ferraz, A., Milagres, A. M. F., & Carvalho, W. (2011). A study on the pretreatment of a sugarcane bagasse sample with dilute sulfuric acid. *Journal of Industrial Microbiology and Biotechnology*, 38(9), 1467-1475. <https://doi.org/10.1007/s10295-010-0931-2>
- Cardona, C. A., & Sánchez, Ó. J. (2007). Fuel ethanol production: Process design trends and integration opportunities. *Bioresource Technology*, 98(12), 2415-2457.
<https://doi.org/10.1016/j.biortech.2007.01.002>
- Chacha Solano, A. M., & Chiluisa Villa, P. D. (2023). *Aprovechamiento del bagazo de caña de azúcar (Saccharum officinarum) para la obtención de envases biodegradables*. Ecuador : Latacunga: Universidad Técnica de Cotopaxi (UTC).
<http://repositorio.utc.edu.ec/handle/27000/10564>
- Chandler, C., Villalobos, N., González, E., Arenas, E., Mármol, Z., Ríos, J., Cateryna, Y., Mazzarri, A., & Básicas, C. (2012). Hidrólisis ácida diluida en dos etapas de bagazo de caña de azúcar para la producción de azúcares fermentables. *MULTICIENCIAS*, 12, 245-253.
- Chávez-Sifontes, M., & Domine, M. E. (2013). LIGNINA, ESTRUCTURA Y APLICACIONES: MÉTODOS DE DESPOLIMERIZACIÓN PARA LA OBTENCIÓN DE DERIVADOS AROMÁTICOS DE INTERÉS INDUSTRIAL LIGNIN, STRUCTURE AND APPLICATIONS: DEPOLYMERIZATION METHODS FOR OBTAINING AROMATIC DERIVATIVES OF INDUSTRIAL INTEREST. *Av. cien. ing*, 4(4), 15-46.
http://www.exeedu.com/publishing.cl/av_cienc_ing/15
- Ciolkosz, D. (2024). *Etanol combustible: ¿héroe o villano?*
<https://extension.psu.edu/fuel-ethanol-hero-or-villain>
- Código Orgánico del Ambiente | Descargar PDF Código Orgánico del Ambiente | Actualizado 2026*. (s. f.). Recuperado 1 de febrero de 2026, de <https://www.lexis.com.ec/biblioteca/codigo-organico-ambiente>
- Contreras Morales, C. A., & Del Campo Romero, M. C. (2015). *Productos de la fermentación alcohólica; un beneficio para la salud*.
<http://hdl.handle.net/10819/2613>
- CUNNINGHAM, R., & LÓPEZ, G. (1994). *ETANOL DE LIGNOCELULÓSICOS TECNOLOGÍA Y PERSPECTIVAS*. <https://www.researchgate.net/profile/Gerardo->

- Lopez-
12/publication/320336377_Etanol_de_lignocelulosicos_tecnologia_y_perspectivas
/links/5a04a15caca2726b4c711594/Etanol-de-lignocelulosicos-tecnologia-y-
perspectivas.pdf
- Dadlani, M. (2024). *Guía de las etapas de crecimiento microbiano y su orden secuencial* | CosmosID. <https://www.cosmosid.com/blog/a-guide-to-microbial-growth-stages-sequential-order/>
- Dashko, S., Zhou, N., Compagno, C., & Piškur, J. (2014). Why, when, and how did yeast evolve alcoholic fermentation? *FEMS Yeast Research*, *14*(6), 826-832. <https://doi.org/10.1111/1567-1364.12161>
- de Almeida, M. A., & Colombo, R. (2021). Production Chain of First-Generation Sugarcane Bioethanol: Characterization and Value-Added Application of Wastes. *BioEnergy Research* *2021 16:2*, *16*(2), 924-939. <https://doi.org/10.1007/S12155-021-10301-4>
- Deshpande, S., Marathe, R., Jaybhaye, H., Kakade, A., & Dhote, V. (2022). Characterization of Lignocellulosic Biomass for Bioenergy : A Review. *International Journal of Engineering Research & Technology*, *11*(5). <https://doi.org/10.5281/ZENODO.18446752>
- Dessbesell, L., Paleologou, M., Leitch, M., Pulkki, R., & Xu, C. (Charles). (2020). Global lignin supply overview and kraft lignin potential as an alternative for petroleum-based polymers. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, *123*. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2020.109768>
- Determinación del porcentaje de humedad* | DOCX. (s. f.). Recuperado 5 de febrero de 2026, de <https://es.slideshare.net/slideshow/determinacin-del-porcentaje-de-humedad/40901102>
- Diaz Perez, J. Y., & Alarcon Llamo, Y. R. (2022). *Determinación de Parámetros de Fermentación para la Obtención de una Bebida Alcohólica a Base de Pitahaya (Hylocereus Megalanthus)*. Universidad Nacional de Jaén. <http://repositorio.unj.edu.pe/handle/UNJ/463>
- Echeverría Narváez, W. P. (2021). *Determinación del contenido de lignina presente en biomásas residuales procedentes del sector agrícola ecuatoriano*. Quito: UCE. <http://www.dspace.uce.edu.ec/handle/25000/23939>
- Ewanick, S., & Bura, R. (2011). The effect of biomass moisture content on bioethanol yields from steam pretreated switchgrass and sugarcane bagasse. *Bioresource Technology*, *102*(3), 2651-2658. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2010.10.117>
- Fagnäs, L., Brammer, J., Wilén, C., Lauer, M., & Verhoeff, F. (2010). Drying of biomass for second generation. *Biomass and Bioenergy*, *34*(9), 1267-1277. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2010.04.005>
- Gabisa, E. W., & Gheewala, S. H. (2020). Can substitution of imported gasoline by locally produced molasses ethanol in Ethiopia be sustainable? An eco-efficiency assessment. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, *123*, 109770. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2020.109770>
- García - Breijo, F., & Roselló - Caselles, J. (2007). *Biología y Botánica Volumen 2*. https://www.researchgate.net/publication/258222778_Biologia_y_Botanica_Volumen_2
- García-Navas, J. (2022). *Metabolismo de la glucosa en la fermentación alcohólica*. <https://pintabeer.com/es/ciencia-y-tecnologia/metabolismo-de-la-glucosa-en-la-fermentacion-alcoholica/>
- Gimena Zamora Rueda, G. C. M. G. (2016). *Vista de Determinación del contenido de humedad del bagazo de caña de azúcar por medio de microondas*.

- <https://publicaciones.eeaoc.gob.ar/index.php/riat/article/view/160/145>
- GoConqr. (2018). *Tipos de muestreo | Mapa Mental*.
<https://www.goconqr.com/mapamental/3316488/tipos-de-muestreo>
- González, M., Marcos, X., Abbud, V., Alemán, F., Crawford, R., & Buenaventura, C. (2004). *FISIOLOGÍA, FLORACIÓN Y MEJORAMIENTO GENÉTICO DE LA CAÑA DE AZÚCAR EN ECUADOR*.
- Grilli, A., Lama, P., Escudero, S., & Arenas, N. (2015). *Degradación y utilización de la hemicelulosa contenida en especies forrajeras por Pseudobutyrvibrio ruminis y Pseudobutyrvibrio xylanivorans*.
<http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=382842590018>
- Hahn-Hägerdal, B., Galbe, M., Gorwa-Grauslund, M. F., Lidén, G., & Zacchi, G. (2006). Bio-ethanol - the fuel of tomorrow from the residues of today. *Trends in Biotechnology*, 24(12), 549-556. <https://doi.org/10.1016/j.tibtech.2006.10.004>
- Haq, I. U., Qaisar, K., Nawaz, A., Akram, F., Mukhtar, H., Zohu, X., Xu, Y., Mumtaz, M. W., Rashid, U., Ghani, W. A. W. A. K., & Choong, T. S. Y. (2021). Advances in Valorization of Lignocellulosic Biomass towards Energy Generation. *Catalysts* 2021, Vol. 11, Page 309, 11(3), 309. <https://doi.org/10.3390/catal11030309>
- Hawaz, E., Tafesse, M., Tesfaye, A., Kiros, S., Beyene, D., Kebede, G., Boekhout, T., Groenwald, M., Theelen, B., Degefe, A., Degu, S., Admasu, A., Hunde, B., & Muleta, D. (2024). Bioethanol production from sugarcane molasses by co-fermentation of *Saccharomyces cerevisiae* isolate TA2 and *Wickerhamomyces anomalus* isolate HCJ2F-19. *Annals of Microbiology* 2024 74:1, 74(1), 13-.
<https://doi.org/10.1186/s13213-024-01757-8>
- Hiranobe, C. T., Gomes, A. S., Paiva, F. F. G., Tolosa, G. R., Paim, L. L., Dognani, G., Cardim, G. P., Cardim, H. P., dos Santos, R. J., & Cabrera, F. C. (2024). Sugarcane Bagasse: Challenges and Opportunities for Waste Recycling. *Clean Technologies* 2024, Vol. 6, Pages 662-699, 6(2), 662-699.
<https://doi.org/10.3390/CLEANTECHNOL6020035>
- Jain, S. (2019). The current and future perspectives of biofuels. *Biomass, Biopolymer-Based Materials, and Bioenergy: Construction, Biomedical, and other Industrial Applications*, 495-517. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-102426-3.00021-7>
- Jaishankar, J., & Srivastava, P. (2017). Molecular basis of stationary phase survival and applications. *Frontiers in Microbiology*, 8(OCT).
<https://doi.org/10.3389/fmicb.2017.02000>
- Jiménez Islas, D., Corona, A. A., López, V. E., López, Y., Jurado, A. T., & Gracida Rodríguez, J. N. (2012). Obtención de azúcares fermentables mediante hidrólisis ácida de *Beta vulgaris* L. *Revista internacional de contaminación ambiental*, 28(2), 151-158. http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0188-49992012000200006&lng=es&nrm=iso&tlng=es
- Joaquín, O., Álvarez, D., & Daniel Gonzalez Villalba, J. (2019). *GUÍA TÉCNICA*.
- Johnny, O., Pineda, J., Angel, M., García, G., Javier, J., & Alzate, F. (2012). *Remoción de los inhibidores de la fermentación etanólica usando membranas de polidimetilsiloxano (PDMS) por pervaporación Removal of ethanolic fermentation inhibitors using polydimethylsiloxane (PDMS) membranes by pervaporation*.
- Jönsson, L. J., Alriksson, B., & Nilvebrant, N. O. (2013). Bioconversion of lignocellulose: Inhibitors and detoxification. *Biotechnology for Biofuels*, 6(1), 16-.
<https://doi.org/10.1186/1754-6834-6-16>
- Kellogg, E. A. (2015). Description of the Family, Vegetative Morphology and Anatomy. *Flowering Plants. Monocots*, 3-23. https://doi.org/10.1007/978-3-319-15332-2_1

- Legislativo, D. (2008). CONSTITUCIÓN DE LA REPÚBLICA DEL ECUADOR. *Registro Oficial*, 449(20), 25-2021. www.lexis.com.ec
- Lin, Y., & Tanaka, S. (2006). Ethanol fermentation from biomass resources: current state and prospects. *Applied Microbiology and Biotechnology* 2005 69:6, 69(6), 627-642. <https://doi.org/10.1007/s00253-005-0229-x>
- Maceda, A., Soto-Hernández, M., Peña-Valdivia, C. B., Trejo, C., & Terrazas, T. (2021). Lignina: composición, síntesis y evolución. *Madera y Bosques*, 27(2), e2722137-e2722137. <https://doi.org/10.21829/myb.2021.2722137>
- Magdalena Domínguez Domínguez, M., Castillo, A. Á., Rosales, T. C., Granados Baeza, M. J., Javier, F., Campos, H., Alcalá Octaviano, V. H., Carlos, J., & Picazo, T. (2011). ESTUDIO DE LA CINÉTICA DE LA HIDRÓLISIS ÁCIDA DEL BAGAZO DE CAÑA DE AZÚCAR SIN PRETRATAMIENTO PARA LA OBTENCIÓN DE AZÚCARES REDUCTORES. *Rev. Iberoam. Polim*, 12(3), 153-159.
- Mahmud, M. A., & Anannya, F. R. (2021). Sugarcane bagasse - A source of cellulosic fiber for diverse applications. *Heliyon*, 7(8), e07771. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2021.e07771>
- Manahan, S. E. (2022). 14.9: Lignina - LibreTexts Español. [https://espanol.libretexts.org/Bookshelves/Quimica/Qu%C3%ADmica_Ambiental/La_qu%C3%ADmica_verde_y_los_diez_mandamientos_de_la_sustentabilidad_\(Manahan\)/14%3A_Alimentar_a_la_Antrosfera_-_Utilizando_Materiales_Renovables_y_Biol%C3%B3gicos/14.09%3A_Lignina](https://espanol.libretexts.org/Bookshelves/Quimica/Qu%C3%ADmica_Ambiental/La_qu%C3%ADmica_verde_y_los_diez_mandamientos_de_la_sustentabilidad_(Manahan)/14%3A_Alimentar_a_la_Antrosfera_-_Utilizando_Materiales_Renovables_y_Biol%C3%B3gicos/14.09%3A_Lignina)
- Manikandan, S., Arulvel, R., Chozhavendhan, S., & Subbaiya, R. (2021). Application of nanomaterials in the production of biofuels and bioenergy: challenges and opportunities. *Nanomaterials: Application in Biofuels and Bioenergy Production Systems*, 591-605. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-822401-4.00018-0>
- Melesse, G. T., Hone, F. G., & Mekonnen, M. A. (2022). Extraction of Cellulose from Sugarcane Bagasse Optimization and Characterization. *Advances in Materials Science and Engineering*, 2022(1), 1712207. <https://doi.org/10.1155/2022/1712207>
- Melgarejo Torres, L. K., & Urquizo Rosado, A. C. (2019). *Influencia de la temperatura y concentración de ácido sulfúrico en la hidrólisis ácida de raquis del banano, variedad musa cavendish, para la obtención de bioetanol por saccharomyces cerevisiae atcc 4126*.
- Mensah, R. Q., Yingkamhaeng, N., Venkatachalam, P., Show, P. L., Mussatto, S. I., Sriariyanun, M., Sukyai, P., Parakulsuksatid, P., & Rattanaporn, K. (2023). Application of green produced xylooligosaccharides from sugarcane residues and their properties – Recent progress towards sustainability. *Bioresource Technology Reports*, 23. <https://doi.org/10.1016/j.biteb.2023.101537>
- Mercado-Mata, C. (2006). *Rendimiento de etanol y producción de vinaza con cuatro sustratos para la fermentación de melaza con Saccharomyces cerevisiae*. <https://bdigital.zamorano.edu/server/api/core/bitstreams/00d985d4-fde3-4ae0-9c32-d976283f9418/content>
- Micheal, A., & Moussa, R. R. (2021). Investigating the Economic and Environmental Effect of Integrating Sugarcane Bagasse (SCB) Fibers in Cement Bricks. *Ain Shams Engineering Journal*, 12(3), 3297-3303. <https://doi.org/10.1016/J.ASEJ.2020.12.012>
- Millones-Chapoñan, M., Muñoz-Pérez, S. P., Villanueva-Meza, C. D., Millones-Chapoñan, M., Muñoz-Pérez, S. P., & Villanueva-Meza, C. D. (2023). La Ceniza de Bagazo de Caña de Azúcar Como Aditivo Estabilizador en Suelos Arcillosos con Fines de Pavimentación: Una Revisión Literaria. *Ingeniería y competitividad*,

- 25(1). <https://doi.org/10.25100/iyc.v25i1.11801>
- Mohd Azhar, S. H., Abdulla, R., Jambo, S. A., Marbawi, H., Gansau, J. A., Mohd Faik, A. A., & Rodrigues, K. F. (2017). Yeasts in sustainable bioethanol production: A review. *Biochemistry and Biophysics Reports*, *10*, 52-61. <https://doi.org/10.1016/j.bbrep.2017.03.003>
- Msomba, B. H., Ndaki, P. M., & Joseph, C. O. (2024). Sugarcane sustainability in a changing climate: a systematic review on pests, diseases, and adaptive strategies. *Frontiers in Agronomy*, *6*. <https://doi.org/10.3389/fagro.2024.1423233>
- Mussatto, S. I., Dragone, G., Guimarães, P. M. R., Silva, J. P. A., Carneiro, L. M., Roberto, I. C., Vicente, A., Domingues, L., & Teixeira, J. A. (2010). Technological trends, global market, and challenges of bio-ethanol production. *Biotechnology Advances*, *28*(6), 817-830. <https://doi.org/10.1016/j.biotechadv.2010.07.001>
- Muthu Dinesh Kumar, R., & Anand, R. (2019). Production of biofuel from biomass downdraft gasification and its applications. *Advanced Biofuels: Applications, Technologies and Environmental Sustainability*, 129-151. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-102791-2.00005-2>
- Najafpour, G., Younesi, H., & Ku Ismail, K. S. (2004). Ethanol fermentation in an immobilized cell reactor using *Saccharomyces cerevisiae*. *Bioresour Technol*, *92*(3), 251-260. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2003.09.009>
- Neves, P. V., Pitarelo, A. P., & Ramos, L. P. (2016). Production of cellulosic ethanol from sugarcane bagasse by steam explosion: Effect of extractives content, acid catalysis and different fermentation technologies. *Bioresource Technology*, *208*, 184-194. <https://doi.org/10.1016/J.BIORTECH.2016.02.085>
- Niezwida, S. R., Michalus, J. C., & Gavazzo, G. B. (2023). Literature review of solid urban waste. *InGenio Journal*, *6*(2), 30-39. <https://doi.org/10.18779/INGENIO.V6I2.678>
- Nunes, J. R., John, M., Cangussu, N., Luiza, M., Vieira, C., & Maia, L. (2023). Environmental Analysis of the Incorporation of Sugarcane Bagasse in Medium Density Particleboard Panels through Life Cycle Assessment. *Recycling 2023*, Vol. 8, Page 44, *8*(2), 44. <https://doi.org/10.3390/RECYCLING8020044>
- Office of Research. (s. f.). (2026). *Política de Equipos de Protección Individual (EPP)*. https://www.bu.edu/research/ethics-compliance/safety/laboratory-safety/personal-protection-equipment-in-laboratories-policy/?utm_source=chatgpt.com
- Oh, Y. K., Hwang, K. R., Kim, C., Kim, J. R., & Lee, J. S. (2018). Recent developments and key barriers to advanced biofuels: A short review. *Bioresource Technology*, *257*, 320-333. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2018.02.089>
- Onofre Ramos, D. I. (2020). *Sistemas de información geográfica en la producción de caña de azúcar (Saccharum officinarum), en el Ecuador*. BABAHOYO: UTB, 2020. <http://dspace.utb.edu.ec/handle/49000/9706>
- Oriez, V., Peydecastaing, J., & Pontalier, P. Y. (2019). Lignocellulosic Biomass Fractionation by Mineral Acids and Resulting Extract Purification Processes: Conditions, Yields, and Purities. *Molecules*, *24*(23), 4273. <https://doi.org/10.3390/molecules24234273>
- Ortega, C. (2023, julio 20). *Muestreo selectivo*. <https://www.questionpro.com/blog/es/muestreo-selectivo/>
- Ostelea. (2024). *Biocombustibles: qué son, tipos, ventajas y desventajas* | Ostelea. <https://www.ostelea.com/actualidad/blog-turismo/que-es-el-biocombustible>
- Padrón, D., Hernández, Y., Mora, L., Padrón, J., & García, J. (2019). *Estudio del comportamiento de nuevos cultivares de caña de azúcar (Saccarum Officinarum) en condiciones de riego*.

- <https://www.redalyc.org/journal/5862/586262449003/html/>
- Palmqvist, E., & Hahn-Hägerdal, B. (2000). Fermentation of lignocellulosic hydrolysates. I: inhibition and detoxification. *Bioresource Technology*, 74(1), 17-24. [https://doi.org/10.1016/S0960-8524\(99\)00160-1](https://doi.org/10.1016/S0960-8524(99)00160-1)
- Parapouli, M., Vasileiadis, A., Afendra, A. S., & Hatziloukas, E. (2020). *Saccharomyces cerevisiae* and its industrial applications. *AIMS Microbiology*, 6(1), 1. <https://doi.org/10.3934/microbiol.2020001>
- Parekh, V. J., Rathod, V. K., & Pandit, A. B. (2011). Substrate Hydrolysis: Methods, Mechanism, and Industrial Applications of Substrate Hydrolysis. *Comprehensive Biotechnology, Second Edition*, 2, 104-118. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-088504-9.00094-5>
- Pascual, A. R., Víctor, E. E., Martín, C., Broda, M., Yelle, D. J., & Serwá Nska, K. (2022). Bioethanol Production from Lignocellulosic Biomass—Challenges and Solutions. *Molecules* 2022, Vol. 27, Page 8717, 27(24), 8717. <https://doi.org/10.3390/molecules27248717>
- Peng, N., Yao, Z., Wang, Z., Huang, J., Khan, M. T., Chen, B., & Zhang, M. (2021). Fungal deterioration of the bagasse storage from the harvested sugarcane. *Biotechnology for Biofuels* 2021 14:1, 14(1), 152-. <https://doi.org/10.1186/s13068-021-02004-x>
- Ponce García, N. (2015). *Caña de azúcar: Generalidades y factores agrometeorológicos*. <http://ri.uaemex.mx/bitstream/handle/20.500.11799/32462/secme-8641.pdf;jsessionid=670F2708D4DD9A494D327A699F7DDD3F?sequence=1>
- Practica 2 Determinacion de Cenizas PDF | PDF | Alimentos | Incineración*. (s. f.). Recuperado 5 de febrero de 2026, de <https://es.scribd.com/document/428153923/347677578-Practica-2-Determinacion-de-Cenizas-pdf>
- Radio la voz del Ángel. (2025). *Cana de Azucar*. https://radiolavozdelangeldetusalud.mx/blog/post/1331/Cana_de_Azucar
- Raj, S. B., Ramaswamy, S., & Plapp, B. V. (2014). Yeast Alcohol Dehydrogenase Structure and Catalysis. *Biochemistry*, 53(36), 5791-5803. <https://doi.org/10.1021/bi5006442>
- Ramírez Méndez, G. G., Magaña Medina, D. E., Ojeda López, R. N., Ramírez Méndez, G. G., Magaña Medina, D. E., & Ojeda López, R. N. (2022). Productividad, aspectos que benefician a la organización. Revisión sistemática de la producción científica. *Trascender, contabilidad y gestión*, 7(20), 189-208. <https://doi.org/10.36791/tcg.v8i20.166>
- Ravagnani, M. A. S. S., Reis, M. H. M., Filho, R. M., & Wolf-Maciel, M. R. (2010). Anhydrous ethanol production by extractive distillation: A solvent case study. *Process Safety and Environmental Protection*, 88(1), 67-73. <https://doi.org/10.1016/j.psep.2009.11.005>
- Reinoso, H. (2024). *La Fermentación del vino: Explicación técnica de la fermentación Alcoh - Notas de Cata | Los mejores vinos en Perú*. <https://notasdecata.pe/blogs/news/la-fermentacion-del-vino-explicacion-tecnica-de-la-fermentacion-alcoholica-y-malolactica>
- Rencoret, J., Marques, G., Rosado, M. J., Benito, J., Barro, F., Gutiérrez, A., & del Río, J. C. (2023). Variations in the composition and structure of the lignins of oat (*Avena sativa* L.) straws according to variety and planting season. *International Journal of Biological Macromolecules*, 242. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2023.124811>

- Renneboog, R. M. (2022). *Hidrólisis | Química | Ideas para la investigación | Investigación de EBSCO*. <https://www.ebsco.com/research-starters/chemistry/hydrolysis>
- Resano, D., Guillen, Oscar W, Ubillús, F. D. R., & Barranzuela, J. L. (2022). *Caracterización fisicoquímica del bagazo de caña de azúcar industrial y artesanal como material de construcción*. 33(2), 247-258. <https://doi.org/10.4067/S0718-07642022000200247>
- Resano, D., Guillen, Oscar W., Ubillús, F. D. R., Barranzuela, J. L., Resano, D., Guillen, O. W., Ubillús, F. D. R., & Barranzuela, J. L. (2022). Caracterización fisicoquímica del bagazo de caña de azúcar industrial y artesanal como material de construcción. *Información tecnológica*, 33(2), 247-258. <https://doi.org/10.4067/s0718-07642022000200247>
- Rezende, C. A., De Lima, M., Maziero, P., Deazevedo, E., Garcia, W., & Polikarpov, I. (2011). Chemical and morphological characterization of sugarcane bagasse submitted to a delignification process for enhanced enzymatic digestibility. *Biotechnology for Biofuels* 2011 4:1, 4(1), 54-. <https://doi.org/10.1186/1754-6834-4-54>
- Rivas, E. V., & Urióstegui, L. G. (2024). Hemicelulosas: transformando fibras vegetales a polímeros biomédicamente versátiles. *BIOCYT Biología Ciencia y Tecnología*, 17, 1255-1258. <https://doi.org/10.22201/fesi.20072082e.2024.17.90407>
- Rodríguez, B. S., García, R. M., Leão, R. M., Amico, S. C., & Luz, S. M. (2018). Remoción de hemicelulosa en fibras de Curaua (*Ananas erectifolius*) para compósitos de poliéster. *Nova scientia*, 10(21), 154-172. <https://doi.org/10.21640/ns.v10i21.1509>
- Rumbero, D. (2023). The Pros and Cons of Ethanol as a Renewable Fuel Source. *Organic Chemistry: Current Research*, 12(5), 1-1. <https://doi.org/10.35841/2161-0401.23.12.325>
- Salcedo, M. (2025). *Celulosa - Qué es, características, función, usos e historia*. <https://concepto.de/celulosa/>
- Salimon, J., Abdullah, B. M., & Salih, N. (2011). Hydrolysis optimization and characterization study of preparing fatty acids from *Jatropha curcas* seed oil. *Chemistry Central Journal*, 5(1). <https://doi.org/10.1186/1752-153X-5-67>
- Salous, A. El, Angulo-González, A., & Flores, L. S. (2019). Acceleration of cocoa fermentation through the action of bacteria (*Acetobacter aceti*) and yeast (*Saccharomyces cerevisiae*). *Espirales revista multidisciplinaria de investigación científica*, 3(28). <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=573263327001>
- Sanchez, S., & Amable, A. (2020). *Comportamiento de tres cultivares de caña de azúcar (saccharum officinarum sp.) en la granja experimental Santa Inés*. Machala : Universidad Técnica de Machala. <http://repositorio.utmachala.edu.ec/handle/48000/15556>
- Sarmiento, J. (2017). *Técnico cañade azúcar - Ecuauímica*.
- Schmatz, A. (2023, abril). *Variación del grado BRIX*. https://www.researchgate.net/figure/BRIX-variation-during-S-SSF-using-sugarcane-bagasse-from-different-pretreatments-T_fig4_370245197
- Singh, P., Bharti, P., & Kumari, A. (2025). Comparative study of physico-chemical properties in by-products of the sugar industry. *Environmental Reports*, 125-128. <https://doi.org/10.51470/er.2025.7.1.125>
- Sonaje, N. (2015, octubre). (PDF) *Contenido de humedad en subproductos de la industria azucarera: una revisión crítica*. https://www.researchgate.net/publication/282704170_Moisture_Content_in_Bypro

- ducts_of_Sugar_Industry_A_Critical_Review
- Suárez-Machín, C., Garrido-Carralero, N., & Guevara-Rodríguez, C. (2016). *Levadura Saccharomyces cerevisiae y la producción de alcohol. Revisión bibliográfica*. <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=223148420004>
- Taherzadeh, M. J., & Karimi, K. (2007). Enzyme-based ethanol. *BioResources*, 2(4), 707-738.
- Tamers, M. (2006). *Distinguiendo entre el bioetanol y el etanol de petróleo*. <https://www.betalabservices.com/espanol/biocombustibles/bioetanol-versus-etanol-de-petroleo.html>
- Valenzuela Huamán, C. J., Velazque Rojas, L., Cordova Villavicencio, C. J., Flor Cutimpo Paucar, T. de la, Valenzuela Huamán, C. J., Velazque Rojas, L., Cordova Villavicencio, C. J., & Flor Cutimpo Paucar, T. de la. (2021). Fermentación alcohólica por *Saccharomyces cerevisiae* y cuantificación de flavonoides del zumo de *Citrus x clementina* (naranja). *Revista Colombiana de Ciencias Químico - Farmacéuticas*, 50(3), 677-684. <https://doi.org/10.15446/rcciquifa.v50n1.100225>
- Vasco, P. (2018). *Cuestiones sobre fermentacion alcohólica | Biología 2º Bachillerato*. https://biologia-geologia.com/biologia2/722311_cuestiones_sobre_fermentacion_alcoholica.html
- Vázquez, H. J., & Dacosta, O. (2007). *Fermentación alcohólica: Una opción para la producción de energía renovable a partir de desechos agrícolas*. https://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1405-77432007000400004
- Verónica Hernao, L., & Antonio Giraldo, G. (s. f.). *CUANTIFICACIÓN DE CELULOSA PROVENIENTE DE RESIDUOS DE LA INDUSTRIA DEL MUEBLE*.
- Verónica Hernao, L., & Antonio Giraldo, G. (2009). *CUANTIFICACIÓN DE CELULOSA* }.
- Viñals-Verde, M., Bell-García, A., Michelena-Álvarez, G., & Ramil-Mesa, M. (2012). *Obtención de etanol a partir de biomasa lignocelulósica*. <https://www.redalyc.org/pdf/2231/223123848002.pdf>
- Walker, G. A., Nelson, J., Halligan, T., Lima, M. M. M., Knoesen, A., & Runnebaum, R. C. (2021). Monitoring Site-Specific Fermentation Outcomes via Oxidation Reduction Potential and UV-Vis Spectroscopy to Characterize “Hidden” Parameters of Pinot Noir Wine Fermentations. *Molecules*, 26(16), 4748. <https://doi.org/10.3390/molecules26164748>
- Walker, G. M., & Stewart, G. G. (2016). *Saccharomyces cerevisiae* in the Production of Fermented Beverages. *Beverages 2016, Vol. 2, Page 30*, 2(4), 30. <https://doi.org/10.3390/beverages2040030>
- Wang, A., Han, T., Zhang, B., & Bao, J. (2025). Minor Phenolic Compounds in Detoxified Lignocellulosic Hydrolysates Are the Determinant Factor on Cell Growth and Metabolic Activity of *Escherichia coli*. *Biotechnology journal*, 20(11). <https://doi.org/10.1002/biot.70155>
- Yasarla, L. R., & Ramarao, B. V. (2013). Lignin removal from lignocellulosic hydrolyzates by flocculation with polyethylene oxide. *Journal of Biobased Materials and Bioenergy*, 7(6), 684-689. <https://doi.org/10.1166/jbmb.2013.1398>
- Yaverino-Gutierrez, M. A., Ramos, L., Ascencio, J. J., & Chandel, A. K. (2024). Enhanced Production of Clean Fermentable Sugars by Acid Pretreatment and Enzymatic Saccharification of Sugarcane Bagasse. *Processes 2024, Vol. 12, Page 978*, 12(5), 978. <https://doi.org/10.3390/PR12050978>
- Yuliana, M. C. D., & Martinez, V. (2021). *PH Potencial de hidrogeno*.
- Zabed, H., Sahu, J. N., Suely, A., Boyce, A. N., & Faruq, G. (2017). Bioethanol

production from renewable sources: Current perspectives and technological progress. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 71, 475-501.
<https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.12.076>

Zavrel, M. , D. D. , B. J. , & M. H. (2015). *Process for the hydrolysis of lignocellulosic material*.

9. ANEXOS

Registro fotográfico del proceso de caracterización y desarrollo experimental

En el presente anexo se documenta de manera visual el proceso experimental realizado para la obtención de etanol a partir de un sustrato fermentable. Las fotografías presentadas evidencian las distintas etapas del procedimiento, desde la preparación del material y el proceso de fermentación, hasta la etapa de destilación y recolección del destilado. Asimismo, se incluyen registros fotográficos correspondientes a los resultados finales obtenidos en la producción de etanol, así como a los análisis realizados durante la etapa de caracterización de la materia prima. Este registro fotográfico tiene como finalidad respaldar la metodología aplicada, evidenciar los resultados alcanzados y demostrar la correcta ejecución del experimento.

9.1. ANEXO A

9.1.1. Proceso de caracterización

Anexos 1 Materia prima: bagazo de caña de azúcar.



Elaborado por: Los Autores.

Anexos 2 Determinación de pH del bagazo

Elaborado por: Los Autores.

Anexos 3 Determinación de humedad del bagazo

Elaborado por: Los Autores.

Anexos 4 Determinación del contenido de cenizas del bagazo

Elaborado por: Los Autores.

Anexos 5 Determinación del contenido de celulosa del bagazo

Elaborado por: Los Autores.

Anexos 6 Determinación del contenido de lignina del bagazo



Elaborado por: Los Autores.

9.2. ANEXO B

9.2.1. Desarrollo experimental para la obtención de etanol

Anexos 7 Preparación de la solución ácida para la hidrólisis



Elaborado por: Los Autores

Anexos 8 Ajuste de pH a 10 del hidrolizado.

Elaborado por: Los Autores.

Anexos 9 Decantación del hidrolizado.

Elaborado por: Los Autores.

Anexos 10 Filtración del hidrolizado decantado.

Elaborado por: Los Autores.

Anexos 11 Ajuste de pH a 5 del hidrolizado.

Elaborado por: Los Autores.

Anexos 12 Adsorción con carbón activado.

Elaborado por: Los Autores.

Anexos 13 Hidrolizado detoxificado.

Elaborado por: Los Autores

Anexos 14 Inoculación en ambiente estéril de levaduras.

Elaborado por: Los Autores.

Anexos 15 Proceso de fermentación alcohólica embaces rotulados

Elaborado por: Los Autores.



Elaborado por: Los Autores.



Elaborado por: Los Autores.

Anexos 16 Proceso de fermentación día 3

Elaborado por: Los Autores.

Anexos 17 Proceso de fermentación día 5

Elaborado por: Los Autores.

Anexos 18 Proceso de fermentación día 7

Elaborado por: Los Autores.

Anexos 19 Destilación del etanol final

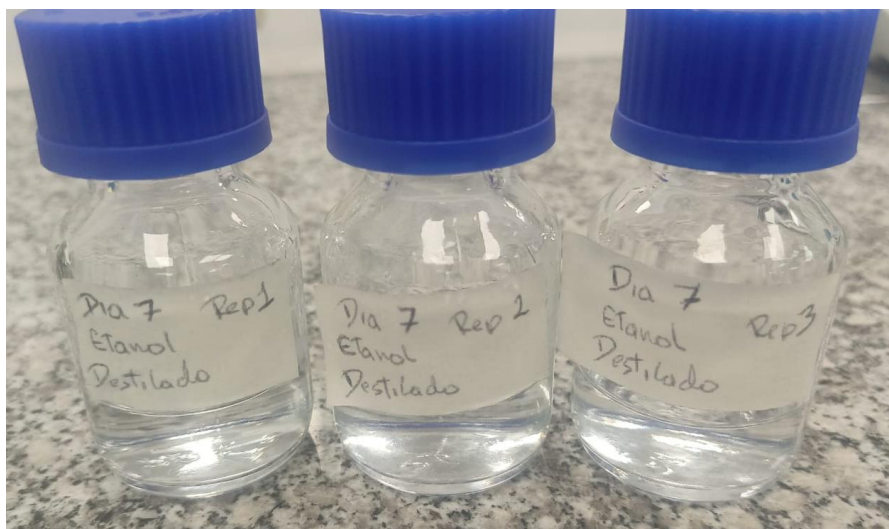
Elaborado por: Los Autores.

Anexos 20 Etanol obtenido de los días 3, 5, y 7

Elaborado por: Los Autores.



Elaborado por: Los Autores.



Elaborado por: Los Autores.

9.2.2. Evidencia de resultados de etanol final

Anexos 21 porcentaje de alcohol de las tres repeticiones del día 3



Elaborado por: Los Autores.

Anexos 22 porcentaje de alcohol de las tres repeticiones del día 5



Elaborado por: Los Autores.

Anexos 23 porcentaje de alcohol de las tres repeticiones del día 7



Elaborado por: Los Autores.