



Universidad de San Carlos de Guatemala
Facultad de Ingeniería
Escuela de Ingeniería Química

**EVALUACIÓN DEL PROCESO DE OBTENCIÓN DE ETANOL A PARTIR DEL
RESIDUO SÓLIDO DEL EJE DE LA INFLORESCENCIA DE LA PIÑA (*ANANNAS
COMOSUS*, *L. MERR.*, *ESPECIE CAYENA LISA*) A ESCALA LABORATORIO**

Sergio García Barahona

Asesorado por el Ing. Adrián Antonio Soberanis Ibañez

Guatemala, agosto de 2013

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

**EVALUACIÓN DEL PROCESO DE OBTENCIÓN DE ETANOL A PARTIR DEL
RESIDUO SÓLIDO DEL EJE DE LA INFLORESCENCIA DE LA PIÑA (*ANANNAS
COMOSUS*, *L. MERR.*, *ESPECIE CAYENA LISA*) A ESCALA LABORATORIO**

TRABAJO DE GRADUACIÓN

PRESENTADO A LA JUNTA DIRECTIVA DE LA
FACULTAD DE INGENIERÍA
POR

SERGIO GARCÍA BARAHONA

ASESORADO POR EL ING. ADRIÁN ANTONIO SOBERANIS IBAÑEZ

AL CONFERÍRSELE EL TÍTULO DE

INGENIERO QUÍMICO

GUATEMALA, AGOSTO DE 2013

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA
FACULTAD DE INGENIERÍA



NÓMINA DE JUNTA DIRECTIVA

DECANO	Ing. Murphy Olympto Paiz Recinos
VOCAL I	Ing. Alfredo Enrique Beber Aceituno
VOCAL II	Ing. Pedro Antonio Aguilar Polanco
VOCAL III	Ing. Elvia Miriam Ruballos Samayoa
VOCAL IV	Br. Walter Rafael Véliz Muñoz
VOCAL V	Br. Sergio Alejandro Donis Soto
SECRETARIO	Ing. Hugo Humberto Rivera Pérez

TRIBUNAL QUE PRACTICÓ EL EXAMEN GENERAL PRIVADO

DECANO	Ing. Murphy Olympto Paiz Recinos
EXAMINADORA	Inga. Dina Lissete Estrada Moreira
EXAMINADOR	Ing. José Manuel Tay Oroxom
EXAMINADOR	Ing. Orlando Posadas Váldez
SECRETARIO	Ing. Hugo Humberto Rivera Pérez

HONORABLE TRIBUNAL EXAMINADOR

En cumplimiento con los preceptos que establece la ley de la Universidad de San Carlos de Guatemala, presento a su consideración mi trabajo de graduación titulado:

**EVALUACIÓN DEL PROCESO DE OBTENCIÓN DE ETANOL A PARTIR DEL
RESIDUO SÓLIDO DEL EJE DE LA INFLORESCENCIA DE LA PIÑA (ANANNAS
COMOSUS, L. MERR., ESPECIE CAYENA LISA) A ESCALA LABORATORIO**

Tema que me fuera asignado por la Dirección de la Escuela de Ingeniería Química, con fecha enero 2013.



Sergio Garcia Barahona

Guatemala 02 de julio de 2013

Ingeniero

Victor Manuel Monzón Valdez

Director Escuela de Ingeniería Química

Universidad De San Carlos De Guatemala

Por este medio hago constar que he revisado y aprobado el Informe Final de Trabajo de Graduación del estudiante Sergio García Barahona, con carné 200915022, el cual se titula: **“EVALUACIÓN DEL PROCESO DE OBTENCIÓN DE ETANOL A PARTIR DEL RESIDUO SÓLIDO DEL EJE DE LA INFLORESCENCIA DE LA PIÑA (*Anannas Comosus*, L. Merr., especie Cayena Lisa) A ESCALA LABORATORIO.”**

En base a lo anterior, lo someto a su consideración a efecto de continuar con el trámite respectivo para continuar con su aprobación.

Atentamente



Ing. Qco. Adrián Soberanis

ASESOR

Colegiado 1515

Adrian Soberanis
Ingeniero Químico
Colegiado 1515



Guatemala, 18 de julio de 2013
Ref. EIQ.TG.204.2013

Señores
Área de Lingüística
Facultad de Ingeniería
Presente

Estimados Señores

Como consta en el Acta TG-084-2012-IF le informo que reunidos los Miembros de la Terna nombrada por la Escuela de Ingeniería Química, se practicó la revisión del:

INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADUACIÓN

Solicitado por el estudiante universitario: **Sergio García Barahona.**

Identificado con número de carné: **2009-15022.**

Previo a optar al título de **INGENIERO QUÍMICO.**

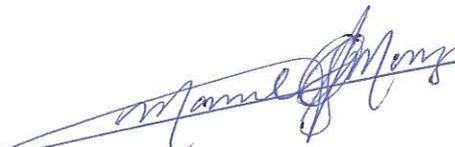
Siguiendo los procedimientos de revisión interna de la Escuela de Ingeniería Química, los Miembros de la Terna han procedido a **APROBARLO** con el siguiente título:

EVALUACIÓN DEL PROCESO DE OBTENCIÓN DE ETANOL A PARTIR DEL RESIDUO SÓLIDO DEL EJE DE LA INFLORESCENCIA DE LA PIÑA (*Anannas Comosus, L. Merr.*, especie Cayena Lisa) A ESCALA LABORATORIO

El Trabajo de Graduación ha sido asesorado por el Ingeniero Químico: **Adrian Antonio Soberanis Ibañez.**

Habiendo encontrado el referido informe final del trabajo de graduación **SATISFACTORIO**, se autoriza al estudiante, proceder con los trámites requeridos de acuerdo a las normas y procedimientos establecidos por la Facultad para su autorización e impresión.

"ID Y ENSEÑAD A TODOS"


Ing. Víctor Manuel Monzón Valdéz
DIRECTOR
Escuela de Ingeniería Química



C.c.: archivo

PROGRAMA DE INGENIERÍA QUÍMICA
ACREDITADO POR
Agencia Centroamericana de Acreditación de
Programas de Arquitectura y de Ingeniería
Período 2009 - 2015



ACAAI

Agencia Centroamericana de Acreditación de
Programas de Arquitectura y de Ingeniería



El Director de la Escuela de Ingeniería Química de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer el dictamen del Asesor y de los Miembros del Tribunal nombrado por la Escuela de Ingeniería Química para revisar el Informe del Trabajo de Graduación del estudiante, **SERGIO GARCÍA BARAHONA** titulado: **"EVALUACIÓN DEL PROCESO DE OBTENCIÓN DE ETANOL A PARTIR DEL RESIDUO SÓLIDO DEL EJE DE LA INFLORESCENCIA DE LA PIÑA (ANANNAS COMOSUS, L. MERR., ESPECIE CAYENA LISA) A ESCALA LABORATORIO"**. Procede a la autorización del mismo, ya que reúne el rigor, la secuencia, la pertinencia y la coherencia metodológica requerida.

Ing. Víctor Manuel Monzón Valdez
DIRECTOR
Escuela de Ingeniería Química



Guatemala, agosto 2013

Cc: Archivo
VMMV/ale

Universidad de San Carlos
de Guatemala

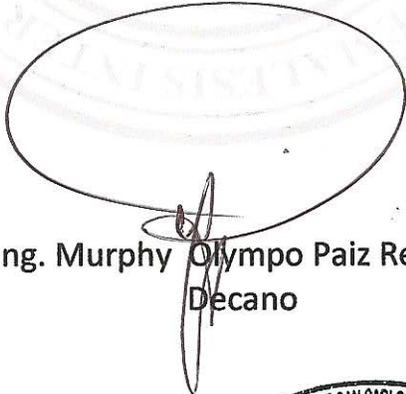


Facultad de Ingeniería
Decanato

DTG. 534 .2013

El Decano de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer la aprobación por parte del Director de la Escuela de Ingeniería Química, al Trabajo de Graduación titulado: **EVALUACIÓN DEL PROCESO DE OBTENCIÓN DE ETANOL A PARTIR DEL RESIDUO SÓLIDO DEL EJE DE LA INFLORESCENCIA DE LA PIÑA (*ANANNAS COMOSUS*, *L. MERR.*, *ESPECIE CAYENA LISA*) A ESCALA LABORATORIO**, presentado por el estudiante universitario: **Sergio García Barahona**, autoriza la impresión del mismo.

IMPRÍMASE:



Ing. Murphy Olympo Paiz Recinos
Decano

Guatemala, 2 de agosto de 2013

/gdech



ACTO QUE DEDICO A:

- Dios** Por guiarme y protegerme diariamente, ayudándome a crecer como persona y como profesional. Por ser ese pilar fundamental en mi vida.
- Virgen María** Por ser el modelo de fortaleza y perseverancia; por interceder, guiar, bendecir y proteger mi camino.
- Mi papá** Sergio García, por ser un ejemplo a seguir, por enseñarme algo nuevo cada día, y estar presente en mis triunfos y fracasos.
- Mi mamá** Sandra Barahona, por guiarme sabiamente cada día, y enseñarme a crecer y aceptar las circunstancias de la vida.
- Mi hermana** Samanta García, por su apoyo y comprensión.
- Mis padrinos** Edgar García y Rosalina Pacheco, por siempre estar junto a mí, por sus consejos, por su preocupación y ayuda constante.

AGRADECIMIENTOS A:

Dios	Por ser un guía incondicional ayudándome en todos los aspectos de mi vida.
Mis padres	Sergio y Sandra por darme una vida llena de bendiciones, darme una familia, y apoyarme en todos mis sueños.
Mi hermana	Por ser un ejemplo a seguir.
Mis abuelos	Alfonso García, Carmen Smith, Graciela Márquez, Oscar Barahona (q.e.p.d.); por ser un ejemplo a seguir.
Andrea Arias	Por ser incondicional a lo largo de este camino.
Mis amigos	Por el afecto sincero y desinteresado, a lo largo del tiempo; por las experiencias compartidas; por el apoyo en las buenas y malas circunstancias, porque siempre estuvieron ahí.
Ing. Adrián Soberanis	Por las enseñanzas profesionales y personales. Por ser más que un maestro, un amigo.
Inga. Adela Marroquín	Gracias por los consejos, enseñanzas y su amistad.

Inga. Esther Roquel

Gracias por los consejos, enseñanzas y su amistad.

Facultad de Ingeniería

Gracias por formarme en mi carrera profesional.

**Universidad de San
Carlos de Guatemala**

Gracias por todas las oportunidades.

ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES.....	VII
LISTA DE SÍMBOLOS.....	IX
GLOSARIO.....	XI
RESUMEN.....	XIII
OBJETIVOS / HIPÓTESIS.....	XV
INTRODUCCIÓN.....	XVII
1. ANTECEDENTES.....	1
2. MARCO TEÓRICO.....	3
2.1. Piña.....	3
2.1.1. Taxonomía.....	3
2.1.2. Clasificación taxonómica.....	5
2.1.2.1. Tallo.....	5
2.1.2.2. Hojas.....	5
2.1.2.3. Raíces.....	6
2.2. Producción de piña en Guatemala.....	6
2.2.1. Especies de piña cultivada en Guatemala.....	7
2.2.1.1. Cayena lisa.....	8
2.2.1.2. Española roja.....	8
2.2.1.3. Montúfar.....	8
2.3. Materiales lignocelulósicos.....	8
2.3.1. Celulosa.....	9
2.3.2. Hemicelulosa.....	10
2.3.3. Lignina.....	10

2.3.4.	Azúcares fermentables	11
2.3.5.	Celulasa	11
2.3.5.1.	Mecanismo de reacción	12
2.3.5.1.1.	Primera etapa	12
2.3.5.1.2.	Segunda etapa	12
2.3.5.1.3.	Tercera etapa	12
2.3.6.	Levadura	13
2.3.6.1.	<i>Saccharomyces cerevisiae</i>	14
2.4.	Procedimiento experimental	15
2.4.1.	Pretratamiento del material.....	15
2.4.1.1.	Secado	15
2.4.1.2.	Reducción de partícula	16
2.4.1.3.	Deslignificación.....	16
2.4.2.	Tratamiento del material	17
2.4.2.1.	Hidrólisis enzimática	17
2.4.2.2.	Fermentación alcohólica	18
2.5.	Biocombustibles	19
2.5.1.	Biocombustibles líquidos	20
2.5.1.1.	Biocombustibles líquidos de primera generación.....	20
2.5.1.2.	Biocombustibles líquidos de segunda generación.....	21
2.5.1.3.	Biocombustibles líquidos de tercera generación.....	21
2.6.	Etanol.....	21
2.6.1.	Etanol como combustible.....	22
2.6.1.1.	Balance energético	22
2.6.1.2.	Obtención de etanol como combustible	23

3.	DISEÑO EXPERIMENTAL	25
3.1.	Variables	25
3.2.	Delimitación del campo de estudio	26
3.3.	Recurso humano	27
3.4.	Recurso material disponible.....	27
3.5.	Técnica cualitativa o cuantitativa	29
3.6.	Recolección de la información	30
3.6.1.	Procedimiento	30
3.6.1.1.	Determinación de celulosa	30
3.6.1.1.1.	Alcance	31
3.6.1.1.2.	Aparatos.....	31
3.6.1.1.3.	Reactivos	31
3.6.1.1.4.	Muestra	31
3.6.1.1.5.	Procedimiento	32
3.6.1.2.	Determinación de lignina.....	33
3.6.1.2.1.	Alcance	33
3.6.1.2.2.	Principio	33
3.6.1.2.3.	Aparatos.....	34
3.6.1.2.4.	Reactivos	34
3.6.1.2.5.	Muestra	34
3.6.1.2.6.	Procedimiento	35
3.6.1.3.	Determinación de humedad	35
3.6.1.3.1.	Alcance	36
3.6.1.3.2.	Principio	36
3.6.1.3.3.	Aparatos.....	36
3.6.1.3.4.	Muestra	36
3.6.1.3.5.	Procedimiento	37
3.6.1.4.	Eliminación de lignina.....	38
3.6.1.4.1.	Procedimiento	38

	3.6.1.5.	Hidrólisis enzimática	38
	3.6.1.6.	Determinación de azúcares fermentables	39
	3.6.1.7.	Fermentación.....	40
	3.6.1.8.	Determinación de alcohol	40
	3.6.1.9.	Manejo de productos y residuos	41
3.7.		Análisis estadístico.....	42
	3.7.1.	Número de repeticiones.....	42
	3.7.2.	Media de una muestra	43
	3.7.3.	Desviación estándar	44
	3.7.4.	ANOVA.....	44
3.8.		Procesamiento de la información	46
	3.8.1.	Determinación de azúcares fermentables.....	46
		3.8.1.1. Azúcares fermentables teóricos	46
		3.8.1.2. Azúcares fermentables reales.....	47
	3.8.2.	Rendimiento de conversión de azúcares fermentables.....	47
	3.8.3.	Determinación de porcentaje de alcohol real	48
	3.8.4.	Determinación de porcentaje de alcohol teórico	48
	3.8.5.	Rendimiento de conversión del etanol	48
4.		RESULTADOS	51
	4.1.	Conversión de celulosa a azúcares fermentables	51
	4.2.	Porcentaje de conversión de azúcares fermentables a etanol	52
	4.3.	Análisis estadístico.....	54
	4.4.	Relación energética entre el eje de inflorescencia de la piña y el etanol.....	55

5. INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS.....	59
CONCLUSIONES.....	65
RECOMENDACIONES.....	67
BIBLIOGRAFÍA.....	69
APÉNDICES.....	73
ANEXOS	99

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

FIGURAS

1.	Estructura de la piña	4
2.	Distribución de la producción de piña a nivel nacional en 2011 según el MAGA.....	7
3.	Molécula de celulosa.....	10
4.	Mecanismo de hidrólisis enzimática de la celulosa.....	13
5.	Levadura <i>Saccharomyces cerevisiae</i>	15
6.	Relación entre el porcentaje de conversión de celulosa a azúcares fermentables y el porcentaje de etanol presente en función del porcentaje de levadura.....	54

TABLAS

I.	Producción de biocombustibles por países, 2007.....	20
II.	Variables de proceso	25
III.	Variables a manipular.....	26
IV.	Técnica cuantitativa	30
V.	Análisis de varianza	45
VI.	Rendimiento de conversión de celulosa a azúcares fermentables	51
VII.	Rendimiento de conversión de azúcares fermentables a etanol.....	52
VIII.	Porcentaje de etanol obtenido para cada variación de levadura.....	53
IX.	Análisis de varianza de un factor.....	55
X.	Evaluación de hipótesis estadística.....	55

XI.	Diferencia energética entre el eje de inflorescencia de la piña y el destilado al 26,5% al tomando en cuenta el secado	56
XII.	Relación de poderes caloríficos entre el eje de inflorescencia de la piña y el etanol	56
XIII.	Matriz energética entre el poder calorífico del eje de inflorescencia de la piña y el producto obtenido en relación con diversos combustibles.....	57
XIV.	Producción de etanol estimada en base al consumo mensual de piña.....	58

LISTA DE SÍMBOLOS

Símbolo	Significado
BEP	Barril equivalente de petróleo
cm	Centímetros
x_i	Dato iésimo
s	Desviación Estándar
USA	Estados Unidos de América
F	Factor de ANOVA
ferment	Fermentables
GJ	Gigajulio
°C	Grados Celsius
GL	Grados de libertad
g	Gramos
Hi	Hipótesis alternativa
Ho	Hipótesis Nula
kg	Kilogramo
kJ	Kilojulio
L	Litro
\bar{x}	Media de la muestra
m	Metro
m³	Metro cúbico
µm	Micrómetro
MTEP	Millones de toneladas equivalentes de petróleo
mm	Milímetro
mL	Mililitros

M	Molaridad
n	Número de datos
PM	Peso Molecular
PCI	Poder calorífico inferior
PCM	Poder calorífico medio
PCS	Poder calorífico superior
%	Porcentaje
%	Porcentaje de masa en volumen
P	Probabilidad
RPM	Revoluciones por minuto
T	Temperatura
ton	Tonelada

GLOSARIO

Ananás	Nombre científico que se asigna a la piña.
Etanol de segunda generación	Etanol obtenido a partir de biomasa rica en celulosa y hemicelulosa, sin valor alimenticio. La tecnología de procesamiento de estos materiales es más compleja, requiriendo elevado costo de inversión y producción.
Eje de inflorescencia	Nombre que recibe el conocido comúnmente como “corazón de piña”.
Enzima	Moléculas biológicas que catalizan reacciones químicas.
Hidróxido de sodio	Compuesto inorgánico, con fórmula química Na(OH), que en solución se comporta como base.
Hipótesis	Enunciado o conjunto de enunciados que precede a otros enunciados y constituye su fundamento.
Inflorescencia	Disposición de las flores sobre los ramos o las extremidades del tallo, su límite está determinado por una hoja normal.

Micrones	Unidad equivalente a la milésima parte de un milímetro. Unidad de medida utilizada en los tamices.
Tamaño de partícula	Diámetro promedio que posee cierta cantidad de masa.
Tamiz	Malla de poro definido que retiene y permite el paso de determinado tamaño de partícula.
Tamizado	Método físico para separar mezclas, mediante el empleo de tamices, según el tamaño de partícula.
Reactivo de Benedict	Disolución alcalina que presenta el ion cúprico, de color azul intenso, capaz de identificar azúcares fermentables.
Rendimiento porcentual	Relación entre el rendimiento real y el rendimiento teórico.
Rendimiento real	Cantidad de producto obtenido experimentalmente en una reacción química.
Rendimiento teórico	Cantidad de producto que se predice en base a la ecuación química balanceada cuando ha reaccionado todo el reactivo limitante.

RESUMEN

El objetivo principal del presente estudio fue evaluar el rendimiento de obtención de etanol de segunda generación a partir de la celulosa del eje de inflorescencia de la piña (*Ananas Comosus*, L. Merr., especie Cayena Lisa). Para este estudio se seleccionó como primer parámetro el rendimiento de conversión de la celulosa en azúcares fermentables; y como segundo, el rendimiento de conversión de azúcares fermentables en etanol, a escala laboratorio. Asimismo, se determinó la producción energética a partir del eje de inflorescencia por medio de la comparación de los poderes caloríficos de otros combustibles.

Para evaluar la conversión de celulosa a azúcares fermentables, se utilizó una solución de hidróxido de sodio para realizar un ataque básico al eje de inflorescencia de la piña, logrando así la deslignificación. Luego se procedió a realizar una hidrólisis enzimática por medio de celulasa, para posteriormente determinar el rendimiento de conversión de la celulosa a azúcares fermentables por medio del reactivo de Benedict, analizando la precipitación del óxido de dicobre. El rendimiento de conversión promedio de celulosa a azúcares fermentables fue de $46,94 \pm 0,0052$ por ciento.

El proceso de fermentación se realizó utilizando levadura (*Saccharomyces cerevisiae*). Se realizaron cinco diferentes variaciones de concentración de levadura, para poder determinar el efecto de ésta en el rendimiento de la fermentación, obteniendo rendimientos de conversión distintos para cada porcentaje. El rendimiento máximo obtenido fue de $98,11 \pm 0,0077$ por ciento para un porcentaje de 10 por ciento de levadura.

El efecto que poseen las variaciones de los porcentajes de levadura en el rendimiento de conversión, se evaluó por medio de un análisis de varianza de un factor, determinando que sí existe diferencia significativa entre ellos.

Se analizó la ganancia energética del proceso realizado, evaluando la energía obtenida al quemar la biomasa (eje de inflorescencia de la piña) y los poderes caloríficos de la misma. Primero se relacionó la energía utilizada para secar el bagazo y el poder calorífico del bagazo seco, obteniendo una diferencia negativa de energía de 169,96 kilojulios. Con lo anterior se concluye que se pierde más energía en secar que la que se puede obtener al quemar la biomasa seca.

Luego de ello se evaluó la ganancia energética comparando el poder calorífico del eje de inflorescencia de la piña seco con el poder calorífico del destilado al 26,5 por ciento, teniendo una relación de 1,583 veces entre ambos, obteniendo una ganancia neta positiva de energía. Asimismo, se compararon ambos poderes con los poderes caloríficos de los combustibles más utilizados.

OBJETIVOS

General

Evaluar el rendimiento de la obtención de etanol de segunda generación a partir de la celulosa del eje de la inflorescencia de la piña (*Ananas Comosus*, *L. Merr.*, especie Cayena Lisa).

Específicos

1. Evaluar la conversión de celulosa a azúcares fermentables.
2. Evaluar el porcentaje de conversión de azúcares fermentables a etanol.
3. Determinar la producción energética a partir del eje de inflorescencia de la piña.

HIPÓTESIS

Hipótesis Científica

Es posible producir etanol de segunda generación a partir del eje de inflorescencia de la piña procedente de los subproductos originados del procesamiento industrial de esta fruta.

Hipótesis Estadística

Hipótesis alternativa (Hi):

Los porcentajes de conversión de azúcares fermentables a etanol no son iguales al variar la concentración de levadura durante la fermentación.

Hipótesis nula (Ho):

Los porcentajes de conversión de azúcares fermentables a etanol son iguales al variar la concentración de levadura durante la fermentación.

INTRODUCCIÓN

A nivel industrial la producción agrícola produce varios desechos, los cuales en ocasiones no son utilizados de forma útil para que la cadena productiva sea integral, constituyendo un problema para la salud y el medio ambiente. Es por ello que se buscó seguir un modelo de desarrollo compatible con el entorno, mediante un proceso técnico de transformación para la obtención de diferentes productos que pueden utilizarse como biomasa, alimento para animales y producción de etanol.

Hoy en día, el alcance de la sostenibilidad en la producción es un reto para las industrias; por ello se sabe que en los próximos años, debido a la innovación tecnológica en busca de energía alternativa, se estudiarán e investigarán nuevas fuentes de energía ecológicamente viables.

Las fuentes de energía convencional, como es el caso de los combustibles fósiles, se están agotando, por lo que es evidente la necesidad de buscar fuentes de energía sostenibles. Este proyecto de investigación, se enfocó en la producción de biocombustible de segunda generación a partir de los desechos productivos de la piña, específicamente del eje de inflorescencia de esta fruta.

La piña es una de las frutas tropicales de la familia de las *bromeliaceae*, más importantes en la producción mundial. Es rica en vitaminas A, B, C y tiene actividad proteolítica debida a la bromelina. Esta biomolécula se utiliza a nivel industrial como ablandadora de carnes, complemento alimenticio y acciones farmacológicas.

La producción de piña en Guatemala representa un porcentaje significativo de la producción agrícola nacional. El 90 por ciento de esta fruta se comercializa en fresco en el mercado interno y el 10 por ciento restante, se vende a fábricas que la procesan como jaleas y mermeladas.

Es usual que en la producción de jaleas y mermeladas no se utilice el eje de la inflorescencia de la piña, por lo cual dicha materia es considerada como un subproducto. En algunas ocasiones, dependiendo de la empresa, es utilizado para producción de abono o como concentrado para animales de granja.

Tomando de referencia las justificaciones anteriores, el presente proyecto de investigación desarrolló su fase experimental de la siguiente manera. Se realizó un pretratamiento a la materia prima (eje de inflorescencia de la piña) con hidróxido de sodio, para que un mayor porcentaje de celulosa se encontrara expuesta para su posterior ataque con la enzima celulasa. Al realizar la hidrólisis enzimática se logró obtener azúcares fermentables, los cuales después con ayuda de levadura se convirtieron en etanol.

1. ANTECEDENTES

La producción de etanol a partir de biomasa es una técnica que en los últimos años ha sido un tema de gran interés, debido a que la biomasa utilizada es en su mayoría un subproducto de desecho en los procesos productivos tradicionales.

En la producción agrícola de la piña, los desechos en su mayoría son utilizados para la producción de abono o comida para animales.

En análisis y estudios más profundos se ha encontrado que para el aprovechamiento de los desechos del cultivo de piña, existen precedentes para la producción de alcohol a partir del rastrojo de esta fruta. Éste fue realizado en la Universidad de Costa Rica, como trabajo de graduación con el título, Determinación del efecto de la concentración de la base NaOH, de la celulosa y celobiasa en la hidrólisis para la producción de etanol a partir del rastrojo de la piña realizado por Maureen Daniela Córdoba Pérez en 2011.

En el trabajo de graduación mencionado anteriormente se realizaron variaciones del pretratamiento con NaOH en donde el tiempo fue la variable a manipular, encontrando que no existe diferencia significativa al variar la concentración de este compuesto durante el pretratamiento. Con el desarrollo de la parte experimental se concluyó lo siguiente: al pretratar el rastrojo de la piña por un tiempo de 20, 30 y 40 minutos con concentraciones de NaOH de 0,75, 1,00, 1,25 y 1,50, en porcentajes de relación entre masa y volumen, a una temperatura de 120 grados centígrados y 1,5 kilogramos por centímetro

cuadrado, estadísticamente, ni el tiempo ni la concentración de NaOH son significativos respecto a la concentración y rendimientos de glucosa.

Los mayores rendimientos de glucosa se alcanzan a 20 y 30 minutos de pretratamiento. La conclusión anterior sintetiza los datos de mayor relevancia para el estudio actual.

Entre las recomendaciones a considerar se encuentra la siguiente: utilizar otro método para la cuantificación de la concentración de etanol, como cromatografía. El objetivo de ésta es lograr una determinación más exacta sobre la cantidad de etanol presente.

2. MARCO TEÓRICO

2.1. Piña

Es una fruta que actualmente posee una alta producción en el territorio nacional, tanto para consumo interno como para exportaciones. Este fruto proporciona la materia prima utilizada en este trabajo de investigación, el eje de inflorescencia de la piña. Es por ello que se realiza una descripción detallada de la misma.

2.1.1. Taxonomía

Científicamente la piña es conocida como *Anannas Comosus (L) Merr*, pertenece al género Ananás de la familia *Bromeliáceae*. Las *bromeliceas* son originarias de América del Centro y del Sur, exceptuando la especie *Illandsiausneoides L.*, que al parecer es originaria de la parte meridional de Norteamérica.

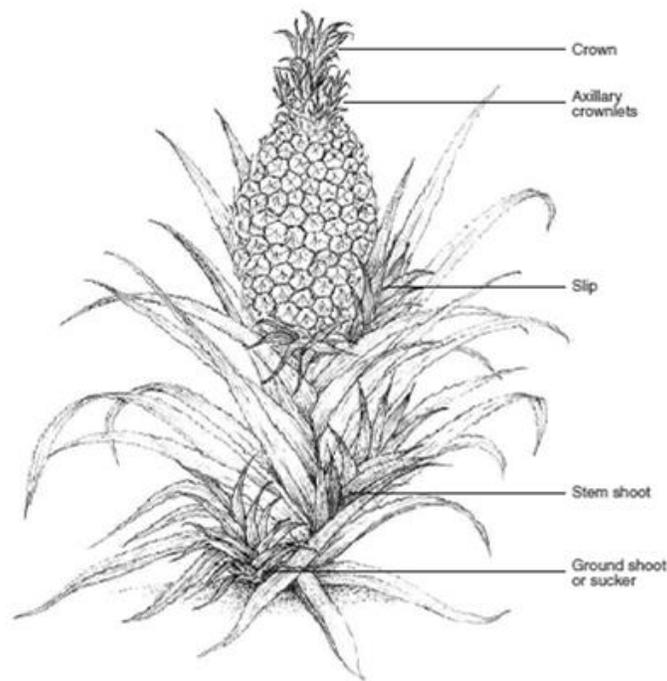
El ananás es una planta herbácea perenne, terrestre, creciendo aproximadamente un metro de alto, con tallo corto y pecíolos expandidos y apropiadamente juntos que forman un tipo de tanques de almacenamiento de agua en la base de la planta.

Las hojas actúan como áreas de conducción, contención y como tanques de reservorio. El agua es absorbida desde estos tanques, por medio de sus raíces adventicias parecidas a pelos en las hojas.

Después de la recolección del fruto, las yemas axilares del tallo prosiguen su desarrollo y forman una nueva planta semejante a la primera, que da un segundo fruto o retoño, generalmente de tamaño inferior al primero, al tiempo que las yemas axilares del hijo se desarrollan a su vez para dar un tercer fruto.

De esta forma pueden sucederse numerosas generaciones vegetativas, pero en la práctica, para la mayoría de los agricultores no resulta rentable ir más allá de las dos o tres cosechas.

Figura 1. **Estructura de la piña**



Fuente: D.P. Bartholomew, *The Pineapple Botany, Production and Uses*. London: 2003. p.25.

2.1.2. Clasificación taxonómica

La clasificación taxonómica sirve para determinar las características que posee cualquier tipo de planta o animal; siendo un desglose de las características principales y secundarias de objeto de estudio. A continuación se detalla la clasificación taxonómica de la materia prima de esta investigación.

Reino: vegetal

Clase: *magnoliopsida*

Orden: *bromeliales*

Familia: *bromeliaceae*

Género: *ananás*

Especie: *A. comosus (L) Merr.*

2.1.2.1. Tallo

El tallo posee regularmente la forma similar a una manzana, con 25-30 centímetros de largo por 2,5-3,5 centímetros de ancho. Las características del tallo dependen de la especie, región y el clima el cual se realiza el cultivo.

2.1.2.2. Hojas

La planta en su madurez presenta de 70 a 80 hojas, dispuestas en rosca con las hojas más jóvenes en el centro y las más antiguas en el exterior. La forma de las hojas es variable y depende de la posición en la planta. Las características de las hojas dependen de la especie, región y el clima en el cual se realiza cultivo el fruto.

2.1.2.3. Raíces

Las raíces llamadas primarias, tienen por origen el embrión de las semillas y por tanto existen sólo sobre las semillas, desapareciendo para dar lugar a las raíces adventicias. Este tipo de raíz posee numerosas monocotiledóneas que nacen del tejido muy vascularizado que separa el cilindro central de la corteza.

Las raíces secundarias son ramas secundarias de las precedentes.

2.2. Producción de piña en Guatemala

El cultivo de piña fue introducido en Guatemala alrededor de 1920 por una empresa alemana. Las especies cultivadas son: *Sugarloaf* o azucarona, Española roja y Cayena lisa, las primeras en ser establecidas.

De acuerdo con el IV Censo Nacional Agropecuario 2011 realizado por el MAGA, la producción nacional de piña se encuentra distribuida de la siguiente forma: Guatemala (36 por ciento), Izabal (14 por ciento), Escuintla (11 por ciento) y los demás departamentos de la república suman el 39 por ciento restante.

El 74,4 por ciento de la superficie cultivada se encuentra concentrada en cinco departamentos: Guatemala (29,9 por ciento), Izabal (15,2 por ciento), Alta Verapaz (11,7 por ciento), Escuintla (9,3 por ciento) y Petén (8,3 por ciento).

De lo mencionado anteriormente, un 90 por ciento se comercializa en fresco en el mercado interno y el 10 por ciento restante, se vende a fábricas que la procesan como jaleas y mermeladas.

Figura 2. **Distribución de la producción de piña a nivel nacional en 2011 según el MAGA**



Fuente: *El agro en cifras 2011*. MAGA, 2011.

2.2.1. Especies de piña cultivada en Guatemala

Actualmente Guatemala destina un porcentaje significativo de tierras cultivables para la producción de la piña. Dentro de las especies con mayor producción, se pueden identificar varios grupos, que son los siguientes:

2.2.1.1. Cayena lisa

Se cultiva en los departamentos de Retalhuleu, Escuintla y Suchitepéquez, con maduración entre junio y julio, con un peso de alrededor de 3,2 kilogramos. Posee las hojas con márgenes lisos, de color verde o rojizo y las hojas del fruto no tienen espinas. Se caracteriza por su forma cilíndrica, con pulpa de color blanco que puede ser utilizada en conservas y consumo en fresco.

2.2.1.2. Española roja

El cultivo de esta especie de piña es común en los departamentos de Retalhuleu, Escuintla y Suchitepéquez. Las hojas tienen márgenes con espinas cerca del ápice, hasta casi la mitad de las mismas, el fruto tiene espinas en las hojas y forma cilíndrica que se caracteriza por un color morado, con pulpa de sabor dulce-ácido. Las variedades pertenecientes a este grupo son la *Singapore Spanish*, *Selangor verde*, *Castilla*, *Cabezona* y la P.R.

2.2.1.3. Montúfar

Se cultiva en las aldeas Navajoa y Tenedores ubicadas en Morales, Izabal. Tiene hojas con espinas en los márgenes, siendo verde o verde amarillento; y las hojas del fruto son dentadas. El fruto tiene un peso entre 1-1,4 kilogramos. Con forma cónica y de color verde, pulpa amarilla, dulce y poco ácida.

2.3. Materiales lignocelulósicos

Los materiales lignocelulósicos se refieren a los materiales presentes en la biomasa vegetal y permiten la obtención de productos sustentables y no

contaminantes del medio ambiente, entre los que destaca el etanol. Estos materiales se encuentran en mayor o menor proporción de acuerdo al tipo de biomasa.

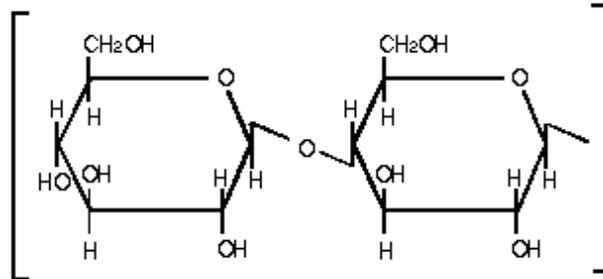
2.3.1. Celulosa

La celulosa es un compuesto formado por residuos de D-glucopiranososa unido por enlaces glucósidos β (1,4). Es el polisacárido estructural más importante de las plantas. Debido a que la celulosa representa alrededor de un tercio de la biomasa de las plantas, es la sustancia orgánica más abundante de la Tierra.

Varios pares de moléculas de celulosa sin ramificar, que pueden contener hasta 12 000 unidades de glucosa cada una, se mantienen juntas por enlaces de hidrógeno para formar flejes en forma de láminas denominadas microfibrillas.

La celulosa tiene una estructura lineal o fibrosa, en la que se establecen múltiples puentes de hidrógeno entre los grupos hidroxilo de distintas cadenas yuxtapuestas de glucosa, haciéndolas muy resistentes e insolubles al agua. De esta manera, se originan fibras compactas que constituyen la pared celular de las células vegetales, dándoles así la necesaria rigidez.

Figura 3. **Molécula de celulosa**



Fuente: HENDRICKS, A., & ZEEMAN, G. *Pretreatments to enhance the digestibility of lignocellulosic biomass*. 2009. p.150.

2.3.2. Hemicelulosa

Es un compuesto heterogéneo que representa, en general, 15-35 por ciento de la biomasa de la planta. Consiste en cadenas cortas y ramificadas de azúcares. Contiene azúcares de cinco carbonos, como xilosa y arabinosa; azúcares de seis carbonos como galactosa, glucosa y manosa, así como ácidos urónicos.

Además sirve como conexión entre la lignina y las fibras de celulosa, debido a su naturaleza ramificada, es amorfa y con azúcares relativamente fáciles de hidrolizar.

2.3.3. Lignina

La principal función de la lignina es dar soporte a la estructura de la planta, impermeabilidad, resistencia contra ataques microbianos y al estrés oxidativo.

Posee una estructura amorfa que consiste en unidades diferentes de fenilpropano. Los monómeros que forman la lignina se denominan alcoholes cinamílicos, diferenciados entre sí por las diferentes sustituciones que presenta el anillo aromático, estos alcoholes son el p-cumarílico y coniferílico.

Entre sus propiedades químicas se puede mencionar que es insoluble en agua y ópticamente inactiva. No contiene azúcares pero encierra a la celulosa y hemicelulosa que sí los contienen, e impide que estas moléculas sean alcanzadas para ser hidrolizadas.

2.3.4. Azúcares fermentables

Azúcares que poseen el grupo carbonilo, y que a través del mismo pueden reaccionar como reductores con otras moléculas. Estos azúcares pueden ser oxidados por agentes oxidantes débiles como el reactivo de Benedict.

La reacción sólo se puede producir con azúcares que pueden revertir a la forma de cadena abierta. Se consideran a todos los monosacáridos como azúcares fermentables.

2.3.5. Celulasa

La celulasa es una mezcla de varias enzimas, los grupos principales son: endogluconasa, exogluconasa o celobiohidrolasa y β -glucosidasa. Específicamente, los tres tipos de enzimas que incluye una celulasa son: la endo- β -1,4-glucanasa o 1,4- β -D-glucanglucanhidrolasa; la exo- β -1,4-glucanasa o 1,4- β -D-glucancelobiohidrolasa y la β -1,4-glucosidasa o β -D-glucósido glucohidrolasa.

2.3.5.1. Mecanismo de reacción

Por medio de una hidrólisis catalítica los componentes de la celulasa producen la ruptura del enlace β -1,4-glicosídico del polímero celulósico, aunque cada uno de ellos actúa de forma específica.

2.3.5.1.1. Primera etapa

Primero la endo β -1,4-glucanasa actúa sobre los enlaces β -1,4 glucósidos internos presentes entre las unidades de glucosa que forman la molécula de la celulosa, y convierte las cadenas largas a oligosacáridos los cuales mantienen la configuración β de su estructura.

2.3.5.1.2. Segunda etapa

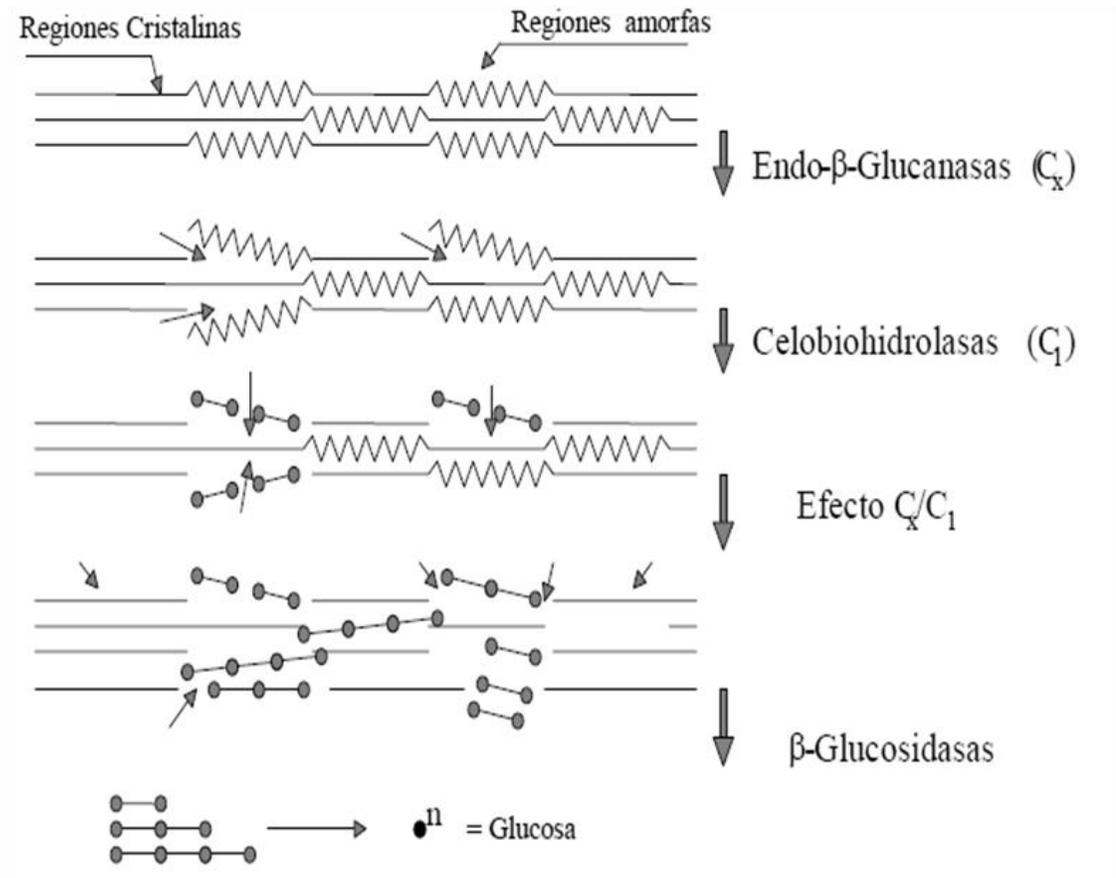
La exo β -1,4-glucanasa corta las cadenas 1,4 β -D-glucano a partir del extremo no reductor de la molécula de celulosa y de las celodextrinas provocando la remoción de unidades de celobiosa o glucosa, después de que las zonas amorfas son degradadas.

2.3.5.1.3. Tercera etapa

Se da en la región cristalina como resultado de la acción de la endogluconasa y la exogluconasa. Finalmente, se da la hidrólisis de la celobiosa mediante la acción de la β -1,4-glucosidasa. La celobiosa inhibe la acción de las glucanasas limitando la degradación de la celulosa.

Las investigaciones actuales proponen el mecanismo de reacción que se muestra en la siguiente figura.

Figura 4. **Mecanismo de hidrólisis enzimática de la celulosa**



Fuente: HENDRICKS, A., & ZEEMAN, G. *Pretreatments to enhance the digestibility of lignocellulosic biomass*. 2009. p.289.

2.3.6. Levadura

Las levaduras son cuerpos unicelulares de un tamaño aproximado de 2 a 4 micrómetros y que están presentes de forma natural en algunos productos como las frutas, cereales y verduras. Son lo que se denominan: organismos anaeróbicos facultativos.

2.3.6.1. Saccharomyces cerevisiae

Perteneciente al género *Saccharomyces*, está abarca numerosas especies, tanto levaduras cultivadas como levaduras en su estado natural.

Las células de *Saccharomyces cerevisiae* son redondas, ovals u oviformes, (3-7) x (4-14) milímetros. La relación entre longitud y anchura es por lo general menor de 2. Con frecuencia se encuentran cadenas celulares rígidas ramificadas de cultivos en cámara húmeda. Los límites de temperatura para la formación de células se encuentran entre 3 y 40 grados centígrados.

Las esporas, que se forman en cantidad de 1-4 en un asca, son redondeadas y lisas, midiendo 3,5 milímetros de diámetro. Con frecuencia se forma una cuña protoplasmática entre las esporas, de manera que éstas reciben un aspecto característico de pared doble.

El óptimo de temperatura para la esporogénesis se encuentra hacia los 30 grados centígrados, y a esta temperatura las esporas se pueden desarrollar en el transcurso de 40 horas; en el intervalo de 12-15 grados centígrados se desarrollan en el curso de 4-6 días.

Figura 5. **Levadura *Saccharomyces cerevisiae***



Fuente: Hansen. *Microbiología de las Fermentaciones Industriales*. 1959. 156 p.

2.4. Procedimiento experimental

El procedimiento experimental detalla los procesos que debe sufrir la materia prima para lograr los objetivos planteados. Esta se divide en 2 partes: el pre tratamiento de la materia prima y el tratamiento de la materia prima, las cuales se detallan a continuación.

2.4.1. Pretratamiento del material

El pre tratamiento de la materia prima, se refiere a los procesos que no son del interés de estudio, sin embargo la materia prima debe pasar por ellos para poderla acondicionar para los procesos de interés.

2.4.1.1. Secado

Proceso que se caracteriza por el intercambio simultáneo de calor y masa entre el aire del ambiente de secado y el sólido. Para que el secado se ejecute, la humedad debe ganar calor de sus alrededores y de esta manera poder

evaporarse para ser liberado por un medio transportador. La acumulación de vapor sobre la superficie de secado influye en la velocidad de secado y el manejo adecuado de estas condiciones es determinante para lograr un proceso satisfactorio.

El proceso de secado se realiza con el fin de conservar la materia prima (eje de inflorescencia de la piña), evitando la procreación de microorganismos que puedan alterar las características de la materia.

2.4.1.2. Reducción de partícula

Se realiza para disminuir el tamaño de partícula de la biomasa mediante un proceso de trituración. El objetivo de la trituración es reducir el tamaño de la partícula y la cristalinidad del material para incrementar la superficie y reducir el grado de polimerización.

Al reducir el tamaño de partícula se incrementa el rendimiento de la hidrólisis en 5-25 por ciento dependiendo del tipo de biomasa y del tamaño de partícula. También reduce el tiempo de digestión en un intervalo del 23-59 por ciento.

2.4.1.3. Deslignificación

El pretratamiento se realiza con el fin de separar la lignina de los carbohidratos, alterando la estructura de la misma. El ataque alcalino se realiza a bajas temperaturas y presiones. Comparado con el pretratamiento ácido, el proceso alcalino causa menos degradación de azúcares.

Luego del pretratamiento, la estructura de la celulosa es más densa y termodinámicamente más estable que la celulosa natural. El pretratamiento con hidróxido de sodio diluido provoca que la biomasa se hinche aumentando la superficie interior mientras que el grado de polimerización disminuye.

2.4.2. Tratamiento del material

En esta etapa del procedimiento experimental, se detallan los procesos de interés. Estos sirven para poder cumplir con los objetivos planteados en la investigación. A continuación se detallan los procesos que se llevarán a cabo.

2.4.2.1. Hidrólisis enzimática

La hidrólisis de la celulosa hasta glucosa puede realizarse enzimática o químicamente.

La sacarificación de residuos lignocelulósicos por vía enzimática, requiere un pretratamiento para aumentar la susceptibilidad de los mismos a la hidrólisis. Sin un pretratamiento adecuado, la biodegradación de la lignocelulosa es lenta y con un bajo rendimiento en azúcares fermentables.

La hidrólisis enzimática presenta varias ventajas sobre la química: las celulasas, enzimas que llevan a cabo la degradación de la celulosa, no forman productos secundarios. Además, al final del proceso no se requiere una neutralización del producto. De igual manera, los costos se reducen porque las temperaturas de trabajo son suaves, no hay necesidad de emplear materiales resistentes a la corrosión y el rendimiento de glucosa es mayor.

El producto de la hidrólisis, la D-glucosa, tiene múltiples posibilidades de uso:

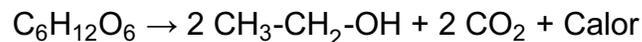
- Refinada, puede destinarse a la industria alimentaria.
- Se puede transformar por isomerización en fructosa, que es un potente edulcorante.

Puede ser sustrato para procesos fermentativos que rinden:

- Etanol.
- Biomasa microbiana.
- Biopolímeros.
- Productos químicos y fármacos tales como antibióticos, L-aminoácidos, ácido cítrico, acetona, butanol.

2.4.2.2. Fermentación alcohólica

La fermentación alcohólica es el proceso de conversión de la glucosa en etanol, por la acción de microorganismos. Esta transformación se produce a partir de los hidratos de carbono, por medio de una compleja secuencia de reacciones químicas, que puede expresarse por la siguiente ecuación:



Según esta reacción, de 100 kilogramos de glucosa se obtienen 51,1 kilogramos de etanol y 48,9 kilogramos de dióxido de carbono. En la práctica, el rendimiento real en etanol es menor que el valor teórico, ya que aproximadamente un 5 por ciento de glucosa es utilizado por el microorganismo para producir nuevas células y otros productos de su metabolismo.

Los microorganismos generalmente empleados son las levaduras, hongos unicelulares ampliamente distribuidos en la naturaleza. Los más utilizados en la fermentación alcohólica son los de la familia *Saccharomyces* (*S. cerevisiae*). En la acción de las levaduras influyen numerosos factores, entre los que destaca la temperatura, el pH y la concentración de azúcares.

Tradicionalmente, la fermentación alcohólica ha sido un proceso discontinuo de duración entre 2 y 3 días, después de los cuales se retira la masa fermentada para su destilación.

2.5. Biocombustibles

Los biocombustibles son una fuente de energía renovable, ya que son una forma de energía transformada. Se pueden producir a partir de una amplia gama de fuentes de biomasa, como: alimentos, fibras y residuos de madera, cultivos energéticos, cultivos de rotación breve y desechos agrícolas.

Estos se pueden clasificar según la fuente de la cual se derivan, como productos forestales, agrícolas y pesqueros o desechos municipales. Además se clasifican según su tipo en sólidos, líquidos o gaseosos.

Otra de sus clasificaciones puede ser, biocombustibles primarios (sin elaborar) y secundarios (elaborados). En el primer grupo encontramos a la leña, astillas, etc.; los cuales se caracterizan porque su combustión es de forma directa y en general se usa para cocinar o generar calor. Los del segundo grupo, por ejemplo: el etanol, biodiesel, biogás, carbón vegetal, gas de síntesis y el hidrógeno, pueden utilizarse en diversas aplicaciones como transporte y procesos industriales a altas temperaturas.

2.5.1. Biocombustibles líquidos

Los biocombustibles líquidos poseen principalmente aplicación industrial, su producción sólo cubre una parte de la demanda mundial. Entre los combustibles líquidos más importantes tenemos: el bioetanol y el biodiesel.

2.5.1.1. Biocombustibles líquidos de primera generación

Los combustibles de primera generación se refieren a aquellos realizados utilizando cultivos como: azúcar, almidones, aceites vegetales, grasa animal y tecnologías convencionales.

En la actualidad los principales productores de bioetanol son Brasil y Estados Unidos, aportando el 90 por ciento de la producción mundial. La producción mundial de biocombustibles se puede observar en la siguiente tabla.

Tabla I. **Producción de biocombustibles por países, 2007**

País/Grupo de País	Etanol		Biodiésel		Total	
	Millones de litros	MTEP	Millones de litros	MTEP	Millones de litros	MTEP
Brasil	19 000	10,44	227	0,17	19 227	10,60
Canadá	1 000	0,55	97	0,07	1 097	0,62
China	1 840	1,01	114	0,08	1 954	1,09
India	400	0,22	45	0,03	445	0,25
Indonesia	0	0	409	0,30	409	0,30
USA	26 500	14,55	1 688	1,25	28 188	15,80
Unión Europea	2 253	1,24	6 109	4,52	8 361	5,76
Mundo	52 009	28,57	10 204	7,56	62 213	36,12

Fuente: datos provenientes de la base de datos FAO AgLink-Cosimo.

2.5.1.2. Biocombustibles líquidos de segunda generación

Estos biocombustibles incluyen aquellos realizados a partir de materia prima proveniente de biomasa lignocelulósica. Se espera que la producción a nivel industrial sea impulsada en los próximos diez años.

2.5.1.3. Biocombustibles líquidos de tercera generación

Estos biocombustibles se basan en la utilización de algas para su producción. Las algas son organismos unicelulares procariotas y autotróficos.

El alga prolifera rápidamente y utiliza de manera eficiente la radiación solar, CO₂ y elementos inorgánicos. En la actualidad existen algas modificadas genéticamente para la producción directa de etanol.

2.6. Etanol

El etanol es un compuesto químico conocido como alcohol etílico. Su fórmula química es C₂H₅O, y se caracteriza por ser un líquido incoloro a temperatura y presión normal. Es común utilizarse como materia prima en muchas bebidas alcohólicas como licores, vino y cerveza. También puede estar presente en la composición de algunas medicinas, productos de estética, perfumes, disolventes y desinfectantes.

2.6.1. Etanol como combustible

La obtención de etanol a partir de residuos orgánicos es una alternativa energética, pues el proceso no demanda tecnología avanzada.

Energéticamente hablando, cada gigajulio obtenido de etanol puro al arder, produce 71,35 kilogramos de dióxido de carbono. Si se compara con el combustible común, la gasolina, la producción sería de 67,05 kilogramos de dióxido de carbono por cada gigajulio de etanol. A igualdad de energía producida en la combustión, el etanol produce un 6 por ciento más de dióxido de carbono que la gasolina, lo cual puede poner en duda la idea de que es más ecológico.

Una ventaja ambiental del uso de este combustible, es el dióxido de carbono de la atmósfera absorbido durante el crecimiento de la planta que produce el etanol, que no se volvería a emitir si éste no se quemara.

Así también pueden agregarse los procesos de transformación que sufren las materias primas antes de ser un combustible utilizable o también el hecho que los motores que utilicen etanol tengan un rendimiento mayor que los de gasolina.

2.6.1.1. Balance energético

Para que la producción de etanol sea significativa para las necesidades energéticas, se necesita tener un balance energético neto positivo. Para evaluar la energía neta del etanol hay que considerar cuatro variables: la cantidad de energía contenida en el producto final del etanol, la cantidad de energía consumida directamente para hacer el etanol, la calidad del etanol que resulta

comparado a la calidad de la gasolina refinada y la energía consumida indirectamente.

Existen precedentes que afirman que el proceso de producción de etanol toma tanta o más energía que un combustible fósil para crear una actividad equivalente de energía. Es decir la energía necesitada para funcionar los tractores, para producir el fertilizante, para procesar el etanol, y la energía asociada al desgaste y al rasgón en todo el equipo usado en el proceso puede ser mayor que la energía derivada del etanol al quemarse.

Algunos estudios establecen que es mejor dejarlo en el campo para proteger el suelo contra la erosión y para agregar materia orgánica. Mientras que otros queman el co-producto para accionar la planta del etanol, pero no evitan la erosión del suelo, lo cual requeriría más energía en forma de fertilizante. Dependiendo del estudio, la energía neta varía de 0,7 a 1,5 unidades de etanol por unidad de energía de combustible fósil consumida.

En comparación si el combustible fósil utilizado para extraer etanol se hubiese empleado para extraer petróleo y gas, hubiera sido posible llenar 15 unidades de gasolina, que es un orden de magnitud mayor.

2.6.1.2. Obtención de etanol como combustible

Actualmente existen diversos métodos para la obtención de alcohol. Sin embargo existen 2 medios con la factibilidad técnica y económica para obtener etanol como combustible alternativo, por medios naturales o por medios químicos.

- Bioetanol (medio natural)

Este se obtiene de la fermentación de una gran cantidad y diversidad de materias vegetales de alto contenido en hidratos de carbono en sus diferentes formas vegetales, como almidón, sacarosa y celulosa. Luego se separa por destilación.

- Etanol (medio químico)

Éste se obtiene por síntesis química a través de hidratar etileno y usar ácido sulfúrico como catalizador químico del proceso. En esta síntesis se produce una mezcla de etanol y agua que luego se destila para poder convertir el etanol en combustible alternativo.

3. DISEÑO EXPERIMENTAL

3.1. Variables

Entre las variables que influyen en el proceso experimental, se determinaron las que se obtuvieron de manera directa e indirecta en el proceso. El resultado fue el siguiente.

Tabla II. **Variables de proceso**

Variables	Unidad	Indep.	Dep.	Ctes.	No Ctes.
Concentración de NaOH	M	X		X	
Concentración de enzima	g/L	X		X	
Cantidad azúcares fermentables	G		X		X
Cantidad de levadura	% masa				X
Concentración de alcohol	% Volumen		X		X
Temperatura	°C	X		X	

Fuente: elaboración propia.

Entre las variables que se manipularon en la fase experimental de acuerdo a los objetivos del estudio, se tiene la cantidad de levadura para el proceso de fermentación, como se observa en la tabla III.

Tabla III. **Variables a manipular**

No.	Variables	Dimensional	Rango de Variación
1	Cantidad de levadura	g	8-12%

Fuente: elaboración propia.

3.2. Delimitación del campo de estudio

Se refiere a la delimitación específica del campo, área, línea y sector industrial de los cuales forma parte la investigación, así como el lugar, espacio físico o ambiente geográfico en donde se ejecutó dicho proyecto.

- Campo: aprovechamiento de residuos sólidos.
- Área: fermentación, destilación.
- Línea: evaluación de rendimientos de conversión.
- Proyecto: evaluación del proceso de obtención de etanol a partir del residuo sólido del eje de florescencia de la piña (*Annanas Comosus*, *L. Merr.*, especie Cayena Lisa) a escala laboratorio.
- Ubicación: Laboratorio de Química de la Escuela de Ingeniería Química, Facultad de Ingeniería, primer nivel edificio T-5, Universidad de San Carlos de Guatemala, Ciudad Universitaria, zona 12, ciudad de Guatemala.

3.3. Recurso humano

Describe el conjunto de personas que intervienen directa o indirectamente en el desarrollo de este proyecto de investigación, aportando su desempeño y conocimientos, desde la preparación hasta la presentación del informe final.

- Investigador: Sergio García Barahona.
- Asesor: Ing. Qco. Adrián Antonio Soberanis Ibáñez.
- Director de Escuela de Ingeniería química: Ing. Qco. Victor Monzón.

3.4. Recurso material disponible

La parte experimental de la investigación se llevó a cabo en el Laboratorio de Química de la Escuela de Ingeniería Química, Facultad de Ingeniería, en el campus central de la Universidad de San Carlos de Guatemala. Este laboratorio contiene los instrumentos esenciales para llevar a cabo las pruebas requeridas.

- Materia prima
 - Eje de la inflorescencia de la piña
- Equipo
 - Plancha de calentamiento, *Fischer Cientific*, 11-100-49SH
 - Balanza analítica, marca Adventure
 - Campana de extracción de 110 V y 900 Watts, marca Serproma
 - Balanza analizador de humedad, Marca Sartorius, modelo MA 150
 - Horno de convección Forzada, *Ovens, PremLab*
 - Agitadores magnéticos

- Cristalería

- *Earlenmeyers* de 100 mililitros, marca Pirex
- Balones esmerilado de 500 mililitros, marca Cornin-Pirex
- Pipetas volumétrica de 5 y 10 mililitros
- Beackers de 100 y 400 mililitros, marca Pirex
- Termómetros de mercurio de 0°C-100°C
- Tubos de ensayo de 20 mililitros
- Embudo de vidrio, marca Pirex
- Condensador de tubo recto 24/40, marca Cornin-Pirex
- Conector en Y 24/40, marca Cornin-Pirex
- Balón de fondo plano 24/40, marca Cornin-Pirex
- Perlas de ebullición
- Desecadora

- Reactivos

- Hidróxido de sodio, lentejas, Merck Milipore
- Celulasa, en polvo, Química Premier
- Agua desmineralizada para uso industrial, Agua pura Salvavidas
- Carbonato de sodio, cristales, Quimiprova
- Citrato de sodio, cristales, Merk
- Levadura seca, polvo
- Sulfato de cobre pentahidratado, cristales, Quimiprova

- Equipo auxiliar

- Computadora marca HP, Intel Core2 Dúo, Windows 7 Professional
- Impresora marca Canon MP280

3.5. Técnica cualitativa o cuantitativa

Debido a la naturaleza del objeto de estudio, las variables que se manipularon en la investigación, utilizan parámetros cuantitativos. Los cuales se determinaron tomando de referencia las siguientes normas.

- Norma ANSI/ASTM D 1103-60, llamada Alfa celulosa en madera.
- Norma ANSI/ASTM D 1106-56, llamada Lignina en madera.
- Determinación de humedad.
- Eliminación de lignina.
- Determinación de azúcares fermentables.
- Determinación de porcentaje de alcohol.

Las técnicas cuantitativas que se utilizaron fueron: la determinación de azúcares fermentables y la determinación de la concentración de alcohol, realizando pruebas con el reactivo de Benedict y utilizando el proceso de destilación, respectivamente.

De acuerdo a la técnica cuantitativa se describen las variables en el procedimiento experimental de acuerdo a su clasificación en variables continua o discreta, como se presenta en la tabla IV.

Tabla IV. **Técnica cuantitativa**

Técnica cuantitativa	Instrumento / Método	Cuantitativa	
		Continua	Discreta
Determinación azúcares fermentables	Reactivo de Benedict	X	
Determinación concentración de alcohol	Destilación	X	

Fuente: elaboración propia.

3.6. **Recolección de la información**

Se detallan los métodos a través de los cuales se realizó la recopilación y el ordenamiento de los datos, es decir los métodos de experimentación necesarios para llevar a cabo la investigación.

3.6.1. **Procedimiento**

Para alcanzar los objetivos planteados se siguió una secuencia específica de procesos. A continuación se detallan las normas utilizadas, el alcance, los reactivos y materiales y lo procedimientos específicos de cada proceso.

3.6.1.1. **Determinación de celulosa**

Para determinar la celulosa presente en el eje de inflorescencia de la piña, se siguió la Norma ANSI/ASTM D 1103-60, llamada Alfa celulosa en madera. Con ello se busco determinar de forma confiable la cantidad celulosa presente en la materia prima.

3.6.1.1.1. Alcance

El método abarca la determinación indirecta de celulosa del eje central de inflorescencia de la piña. Para determinar por medio de estándares establecidos la cantidad presente de celulosa en la materia prima a utilizar en el presente trabajo.

3.6.1.1.2. Aparatos

Se necesitan beakers, cronómetro, pipetas, perillas de succión, varilla de agitación, balde para baño María, balones aforados, bomba de vacío, balanza analítica sensible a 0,1 miligramos, horno para secar con temperatura controlada de 100 y 150 grados centígrados, desecadora, guantes y lentes protectores.

3.6.1.1.3. Reactivos

Entre los reactivos a utilizar para llevar a cabo la determinación de celulosa en el eje de inflorescencia de la piña se encuentran: el hidróxido de sodio puro en lentejas (106462 Merck KGaA), ácido acético (108450 Merck KGaA).

3.6.1.1.4. Muestra

La muestra necesaria para llevar a cabo la determinación de celulosa, debe ser una muestra significativa de la materia prima. Esto para evitar variaciones en los resultados en las siguientes etapas de la parte experimental.

3.6.1.1.5. Procedimiento

El procedimiento experimental para determinar la cantidad de celulosa presente en el eje de inflorescencia de la piña, se detalla a continuación bajo los estándares establecidos por la ASTM.

- Tomar 1 gramo de madera libre de extraíbles y transferir a un beacker de 100 mililitros.
- Agregar 10 mililitros de NaOH al 17,5 por ciento, agitar y dejar reposar por 2 minutos. Luego agitar nuevamente y dejar reposar 3 minutos.
- Agregar de nuevo 5 mililitros de NaOH al 17,5 por ciento, agitar y dejar reposar 5 minutos.
- Repetir el paso 3.
- Agregar de nuevo 5 mililitros de NaOH al 17,5 por ciento, agitar y dejar reposar 30 minutos en baño María a 20 +/- 3 grados centígrados.
- Agregar 30 mililitros de agua destilada, agitar y dejar reposar por 1 hora.
- Filtrar al vacío con papel filtro Wathman N. 4 previamente tarado, lavando con una solución preparada de 33 mililitros de agua destilada y 25 mililitros de la solución de NaOH al 17,5 por ciento.
- Luego lavar con 30 mililitros de agua destilada, y dejar de aplicar vacío. Agregar 15 mililitros de una solución al 10 por ciento de ácido acético y después de 3 minutos aplicar vacío. Luego lavar con 50 mililitros de agua destilada aplicando vacío.
- Llevar la muestra a un secador eléctrico contenida en una caja Petri, a una temperatura de 80 +/- 5 grados centígrados por 4 horas. Luego transferir a una desecadora y esperar 15 minutos para luego pesar. Repetir el secado hasta peso constante.

El porcentaje de celulosa se determina por medio de la siguiente ecuación:

$$\% \text{ Celulosa} = \left\{ \frac{[P.B. - (P.T. + P.L.)] * P.M.L.}{P.M.T.} \right\} * 100 \quad [\text{Ecuación 1}]$$

Donde:

P.B = Peso bruto de la muestra

P.T. = Peso tara del papel filtro

P.L. = Peso de lignina en 1 gramo de madera (procedimiento anterior)

P.M.L = Peso de madera libre de extraíbles (base de 7,5 gramos)

P.M.T. = Peso de madera antes de la extracción, 7,5 gramos

3.6.1.2. Determinación de lignina

Para ello se seguirá la Norma ANSI/ASTM D 1106-56, llamada Lignina en madera. Antes de determinar el porcentaje de celulosa se debe determinar el contenido de lignina, ya que el método para determinar celulosa es indirecto y el dato de lignina permite obtener el contenido de celulosa.

3.6.1.2.1. Alcance

El método abarca la determinación directa de lignina, por gravimetría, del eje central de inflorescencia de la piña. Con ello se busco determinar de forma confiable la cantidad de lignina presente en la materia prima.

3.6.1.2.2. Principio

La lignina es el residuo insoluble que queda al hidrolizar los carbohidratos por medio del trato con ácidos fuertes. Los tratamientos preliminares para eliminar extraíbles son: ataque con alcohol; ataque con mezcla benceno-alcohol

o hexano, para remover resinas, ceras, grasas y aceites; y en algunos casos, ataque con agua caliente para remover materiales solubles en agua.

3.6.1.2.3. Aparatos

Sistema a reflujo de balón de fondo plano con condensador, mangueras, plancha de calentamiento para ebullición, teflón, cronómetro, pipetas, perillas de succión, plancha con agitación, bomba de vacío. Balanza analítica sensible a 0,1 miligramos, horno para secar con temperatura controlada de 80 y 120 grados centígrados, desecadora, guantes y lentes protectores.

3.6.1.2.4. Reactivos

Ácido sulfúrico al 72 por ciento, preparado a partir de ácido sulfúrico al 95-97 por ciento, gravedad específica a 20/4 grados centígrados, 1,6338 (100732 Merck KGaA): Verter 184 mililitros del ácido en 66 mililitros de agua desmineralizada, con agitación lenta, en baño con agua fría. Estandarizar la solución con una de NaOH, utilizando el indicador naranja de metilo.

3.6.1.2.5. Muestra

La muestra para la determinación de lignina, es obtenida del eje central de inflorescencia de la piña, esta muestra debe ser representativa de la materia prima para no tener variaciones en los resultados posteriores de la parte experimental.

3.6.1.2.6. Procedimiento

El procedimiento experimental para determinar la cantidad de lignina presente en el eje de inflorescencia de la piña, se detalla a continuación bajo los estándares establecidos por la ASTM.

- Colocar en un beacker de 100 mililitros, 1 gramo de madera libre de extraíbles. Agregar 15 mililitros de ácido sulfúrico al 72 por ciento.
- Agitar durante 2 horas en baño maría a 20 grados centígrados, esto en una plancha con agitación.
- Transferir a un matraz de 1 000 mililitros conteniendo 560 mililitros de agua destilada, para dar una solución de ácido aproximadamente al 3 por ciento.
- Hervir a reflujo por 4 horas en un balón con condensador.
- Decantar hasta dejar una diferencia mínima entre las dos fases.
- Filtrar la solución con papel filtro Wathman N. 4 previamente tarado.
- Lavar con agua caliente y secar hasta peso constante a 80 +/- 5 grados centígrados.

El porcentaje de lignina se determina por la siguiente ecuación:

$$\% \text{ Lignina} = (\text{Peso Bruto} - \text{Peso Tara}) * 100 \quad [\text{Ecuación 2}]$$

3.6.1.3. Determinación de humedad

Determinar la humedad de un sólido, significa cuantificar la cantidad de agua ligada o no ligada presente en el mismo. Para ello se contará con la ayuda de una balanza analítica y un horno de convección forzada.

3.6.1.3.1. Alcance

El método cubre la determinación del contenido de humedad en el eje central de inflorescencia de la piña. Con ello se busca determinar de forma confiable la cantidad de humedad presente en la materia prima.

3.6.1.3.2. Principio

El contenido de humedad (cH) es la cantidad de agua que existe en una pieza de madera, expresada como un porcentaje del peso que tendría ésta en condición completa; se representa mediante la siguiente relación:

$$cH = \frac{(\text{Peso del agua contenida})}{(\text{Peso de madera total})} * 100 \quad [\text{Ecuación 3}]$$

3.6.1.3.3. Aparatos

Dentro de los aparatos que son necesarios para la determinación de humedad en el eje de inflorescencia de la piña se tienen: balanza analítica sensible a 0,1 miligramo, horno para secar con temperatura controlada de 80 y 120 grados centígrados, y desecadora.

3.6.1.3.4. Muestra

El equipo es especial para determinar humedad en base húmeda y sólo necesita 1 gramo de eje central de inflorescencia de la piña y tamizada con un tamiz No. 40.

3.6.1.3.5. Procedimiento

El procedimiento experimental para determinar la cantidad de humedad presente en el eje de inflorescencia de la piña, se detalla a continuación bajo los estándares establecidos para la reducción de los posibles errores.

- Colocar un crisol con capacidad suficiente para la muestra de eje central de inflorescencia de la piña, colocarlo en un horno a 80 +/- 0,5 grados centígrados durante 2 horas, luego trasladar hacia una desecadora donde se enfriará por 20 minutos.
- Pesarse y anotar; introducir el crisol de nuevo durante 1 hora y luego a la desecadora por 20 minutos, hasta obtener peso constante.
- Pesarse 2 gramos de muestra y colocarlos en el crisol preparado anteriormente e introducirlo dentro del horno a 80 +/- 0,5 grados centígrados durante 2 horas, luego trasladar hacia una desecadora donde se enfriará por 20 minutos.
- Pesarse y anotar; introducir el crisol de nuevo durante 1 hora y luego a la desecadora por 20 minutos, hasta obtener peso constante.

La humedad se determina por:

$$\% \text{ Humedad} = \left[100 - \frac{(P.B. - P.T.)}{P.M.} \right] * 100 \quad [\text{Ecuación 4}]$$

Donde:

P.B. = peso bruto

P.T. = peso tara (crisol)

P.M. = peso de la muestra

3.6.1.4. Eliminación de lignina

Procedimiento experimental del artículo científico, Obtención de etanol a partir de residuos de Poda, mediante hidrólisis ácida e hidrólisis enzimática, publicado por Lesly Tejeda, Julio Quintana, Jairo Pérez y Harold Young. (2011)

3.6.1.4.1. Procedimiento

El procedimiento para llevar a cabo la eliminación de lignina, se debe realizar con la precaución necesaria, debido a que este proceso a su vez puede degradar la cantidad de lignina presente.

- Tomar una muestra de 20 gramos de eje de la inflorescencia de la piña triturado.
- Preparar una solución de NaOH a una concentración 0,1 molar.
- Sumergir la muestra durante 15 minutos en la solución de NaOH. En una relación de 1 gramo por 10 mililitro de NaOH.
- Adicionar 0,816 gramo de sulfato de calcio.
- Dejar reposar durante 3 horas.
- Eliminar los líquidos por decantación.
- Lavar los sólidos obtenidos.
- Conservar los sólidos en un lugar fresco.

3.6.1.5. Hidrólisis enzimática

El procedimiento de la hidrolisis enzimática se lleva a cabo con el fin de romper los enlaces de celulosa para producir azúcares fermentables.

Durante el proceso, se debe tener cuidado para desactivar correctamente la enzima, de lo contrario esta puede degradar el producto deseado. A continuación se detalla el procedimiento.

- Pesar una cantidad de harina del eje de inflorescencia de la piña.
- Agregar agua y agitar la solución, aplicando calor a la misma.
- Agregar 20 por ciento en peso de celulosa.
- Mezclar la solución a una temperatura constante de 50 grados centígrados durante 2 horas, hasta que desaparezca el gel que se formó.
- Desactivar la enzima con un aumento de temperatura a 80 grados centígrados durante 15 minutos.

3.6.1.6. Determinación de azúcares fermentables

La determinación de azúcares fermentables, se lleva a cabo con el fin de saber cuantitativamente por medio de estequiometría la cantidad de azúcares fermentables presentes, este proceso se llevo a cabo por medio del reactivo de Benedict.

- Pesar 100 gramos de NaCO_3 anhidro y disolver en 200 mililitros de agua hervida.
- Pesar 173 gramos citrato de sodio y disolverlo en 200 mililitros de agua hervida.
- Pesar 17,3 gramos de $\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ y disolverlo en 300 mililitros de agua hervida.
- Mezclar las tres soluciones cuando estén frías. Aforar a 1 litro con agua destilada hervida.
- Tomar 5 mililitros de una solución de azúcares y mezclarlos con 20 mililitros de la solución de Benedict.

- Calentar la mezcla hasta que comienza a burbujear.
- Observar la formación de precipitado en la mezcla y se deja enfriar.
- Filtrar el precipitado.
- Pesar cuánto óxido de dicobre se obtuvo.

3.6.1.7. Fermentación

El proceso de fermentación se llevo a cabo por medio de levadura. Durante el proceso es necesario revisar que la salida de burbujas sea únicamente en la trampa de agua para poder prevenir posibles fugas. A continuación se detalla el procedimiento a seguir.

- Colocar la muestra de azúcares fermentables en un *earlenmeyer*.
- Regular el pH en 4,8 con una solución de acetato sódico a concentración 0,05 molar.
- Establecer una agitación de 70 revoluciones por minuto.
- Agregar la concentración de levadura definida.
- Dejar reposar durante 30 horas.

3.6.1.8. Determinación de alcohol

La determinación de alcohol se lleva a cabo para conocer la cantidad real presente en el destilado. Esto se realiza por medio del equipo de destilación, para luego comparar la densidad con datos tabulados y obtener el porcentaje real de alcohol. A continuación se detalla el procedimiento.

- Pesar 100 gramos de muestra y transferir a un balón de destilación.
- Adicionar 50 mililitros de agua al recipiente de pesada para lavarlo e incorporar ésta al balón de destilación.

- Armar el sistema de destilación.
- Llevar a cabo el proceso de destilación del alcohol; y recibir el destilado en el recipiente recolector, previamente tarado.
- Mezclar el destilado y completar a 100 gramos con agua destilada.
- Determinar la gravedad específica del destilado a 20 °C/20 °C.

3.6.1.9. Manejo de productos y residuos

Como todo proceso se obtiene productos o residuos, los cuales son necesarios visualizar para poderlos desechar de una manera adecuada. Entre los productos o residuos se encuentran los siguientes con sus respectivos tratamientos.

- Jugo del eje de inflorescencia de la piña
 - Se extrae el jugo del eje de inflorescencia de la piña.
 - Se filtra para retirar los sólidos.
 - Se puede desechar en alcantarilla o usar para consumo humano, si el proceso cumple con los requisitos de higiene e inocuidad.
- Solución hidróxido de sodio
 - Neutralizar la solución dentro de la campana, usando residuos de ácidos usados en el laboratorio.
 - Verificar su condición por medio de un indicador.
 - Diluir relación 10:1 con agua.
 - Desechar en la alcantarilla.
- Reactivo de Benedict
 - Agregar azúcar a la solución de Benedict.
 - Precipitar el cobre.

- Filtrar el precipitado.
- Repetir procedimiento para asegurarse que la precipitación sea completa.
- Descartar el precipitado.

3.7. Análisis estadístico

Para el análisis de los datos obtenidos dentro del procedimiento experimental, se evaluaron estadísticamente para determinar las variaciones o anomalías que se presentan en el grupo de datos. A continuación se detallan los análisis que se llevaron a cabo.

3.7.1. Número de repeticiones

El número de repeticiones se determina con el fin de obtener la cantidad necesaria de repeticiones para que el error no afecte significativamente los datos.

Para estimar el número de corridas necesarias a realizar en la parte experimental de este proyecto, se utilizó la siguiente ecuación:

$$N = \frac{Z_{\alpha/2}^2 * P * Q}{E^2} \quad [\text{Ecuación 5}]$$

Donde:

N = número de Corridas

$Z_{\alpha/2}$ = confiabilidad

P = probabilidad de éxito

Q = probabilidad de fracaso

E = error

Con el propósito de obtener resultados, gráficas, análisis y modelos matemáticos con un mínimo de error, se utilizaron los siguientes valores:

$$\begin{array}{ll} Z_{\alpha/2} = 1,96 & P = 0,96 \\ Q = 0,04 & E = 0,225 \end{array}$$

Sustituyendo los valores en la ecuación No.7, obtenemos que:

$$N = \frac{(1,96)^2(0,96)(0,04)}{(0,225)^2} = 3$$

Son necesarias 3 corridas para desarrollar la parte experimental de este proyecto de investigación con un mínimo error.

3.7.2. Media de una muestra

La media aritmética representa el valor característico de una serie de datos cuantitativos. Se obtiene a partir de la suma de sus valores dividido dentro del número total de datos. Se realiza el cálculo por medio de la siguiente ecuación:

$$\bar{x} = \frac{x_i}{n} \quad [\text{Ecuación 6}]$$

Donde:

\bar{x} = media aritmética

x_i = dato *i*ésimo

n = número de datos

3.7.3. Desviación estándar

La desviación estándar es una herramienta estadística que permite el análisis de un conjunto de datos definiendo la medida de dispersión de los mismos. Se calcula a partir de la siguiente ecuación:

$$s = \sqrt{\frac{\sum(x_i - \bar{x})^2}{n-1}} \quad [\text{Ecuación 7}]$$

Donde:

s = desviación estándar de la muestra

\bar{x} = media aritmética

x_i = dato i ésimo

n = número de datos

3.7.4. ANOVA

Método para comparar medias y contrastar si difieren significativamente. El análisis de la varianza se puede realizar con tamaños muestrales iguales o distintos. El valor de F calculada por este análisis estadístico es contrastado posteriormente utilizando el valor crítico de t en tablas. Este valor depende del nivel de significancia y de los grados de libertad.

Tabla V. **Análisis de varianza**

Fuente de variación	Suma de Cuadrados	Grados de Libertad	Cuadrados medios	f calculada
Tratamientos	SSA	k-1	$S_1^2 = SSA/K-1$	S_1^2/S^2
Error	SSE	k(n-1)	$S^2 = SSE/ [k(n-1)]$	
Total	SST	nk-1		

Fuente: elaboración propia.

Donde:

- SST se calcula de la siguiente forma:

$$\sum Y^2 - Y_t / n = SST$$

- SSA se calcula de la siguiente forma:

$$\sum Y^2 / k - Y_t / n = SSA$$

- SSE se calcula de la siguiente forma:

$$SST - SSA = SSE$$

Los criterios de decisión sobre los valores de F calculado y crítico, son los siguientes:

Si $F_{cal} < F_{crit}$ entonces H_0 es aceptada

Si $F_{cal} > F_{crit}$ entonces H_0 es rechazada

3.8. Procesamiento de la información

Las variables de respuesta obtenidas se procesaron a través de ecuaciones y relaciones matemáticas o estequiométricas obtenidas de fundamentos teóricos y antecedentes de investigación realizados.

La información presentada en esta sección se encuentra organizada en función de la relación de las variables, además se presenta la relación matemática para su cálculo.

3.8.1. Determinación de azúcares fermentables

La determinación de azúcares fermentables se llevo a cabo para poder determinar el rendimiento de conversión de celulosa a azúcares fermentables. Para determinar la cantidad de azúcares fermentables teórica y real obtenida de la hidrólisis enzimática se procede de la siguiente forma.

3.8.1.1. Azúcares fermentables teóricos

La determinación de azúcares fermentables teóricos se realiza para conocer, qué cantidad de azúcares fermentables se debería de obtener si se realizara la conversión completa. Esto se calcula en base a la estequiometría de la reacción, y se determina de la siguiente forma.

$$\begin{aligned} X_{\text{gPiña}} * \frac{0,1926\text{g celulosa}}{1\text{g piña}} * \frac{1\text{ mol celulosa}}{162\text{ g celulosa}} * \frac{1\text{ mol glucosa}}{1\text{ mol celulosa}} * \frac{180,1\text{g glucosa}}{1\text{ mol glucosa}} \\ = Y\text{ g glucosa} \end{aligned}$$

Para determinar los gramos de glucosa teóricos en cada una de las corridas se utilizó la misma relación estequiométrica.

3.8.1.2. Azúcares fermentables reales

La determinación de azúcares fermentables reales se realiza en base a la reacción que se lleva a cabo por medio del reactivo de Benedict, la cual se muestra a continuación.



Mediante la reacción anterior, se establece estequiométricamente la relación de masas presente.

$$X \text{ gCu}_2\text{O} * \frac{1 \text{ mol Cu}_2\text{O}}{143,09\text{gCu}_2\text{O}} * \frac{1 \text{ mol glucosa}}{1 \text{ mol Cu}_2\text{O}} * \frac{180,156 \text{ g glucosa}}{1 \text{ mol glucosa}} = Y \text{ g glucosa}$$

Con lo cual se determina la cantidad de gramos reales presente de azúcares fermentables en la solución.

3.8.2. Rendimiento de conversión de azúcares fermentables

La determinación del rendimiento estequiométrico de azúcares fermentables se realiza por medio de la relación entre los azúcares fermentables reales y teóricos.

$$\text{Rendimiento Estequiométrico} = \frac{\text{Glucosa Real}}{\text{Glucosa Teórica}} * 100$$

Con lo cual se determina el rendimiento de conversión de azúcares fermentables para cada corrida.

3.8.3. Determinación de porcentaje de alcohol real

Mediante la utilización de la tabla 2-113, *Densities of Mixtures of C₂H₂OH and H₂O at 20 °C*, del Manual del Ingeniero Químico de Robert Perry y Don Green, 8va. Edición; se obtiene el porcentaje en peso para cada una de las densidades obtenidas, con ello se obtuvo el porcentaje de etanol.

De la siguiente relación estequiométrica, se obtiene la cantidad de gramos reales de alcohol.

$$\text{g etanol} = \text{Volumen de etanol} * \% \text{etanol} * \text{Densidad etanol}$$

3.8.4. Determinación de porcentaje de alcohol teórico

La determinación del porcentaje de alcohol teórico se llevo a cabo por medio de relaciones estequiométricas. A continuación se presentan detalladamente las relaciones utilizadas para la determinación del porcentaje de alcohol teorico.

$$\text{g glucosa} * \frac{1 \text{ mol de glucosa}}{180,16 \text{ g glucosa}} * \frac{2 \text{ mol de etanol}}{1 \text{ mol de glucosa}} * \frac{46,1\text{g etanol}}{1 \text{ mol de etanol}} = \text{g etanol teórico}$$

Para determinar los gramos de etanol teóricos en cada una de las corridas se utilizó la misma relación estequiométrica.

3.8.5. Rendimiento de conversión del etanol

Para poder determinar el rendimiento de conversión de etanol es necesario utilizar una relación entre los gramos de etanol reales y los gramos de etanol teóricos.

$$\text{Rendimiento Estequiométrico} = \frac{\text{Etanol Real}}{\text{Etanol Teórico}} * 100$$

4. RESULTADOS

En esta sección, los resultados se encuentran organizados en apartados correspondientes a los objetivos específicos de esta investigación.

4.1. Conversión de celulosa a azúcares fermentables

Se refiere al rendimiento promedio de conversión calculado en base al rendimiento teórico y real de conversión de celulosa a azúcares fermentables con su desviación estándar.

Tabla VI. **Rendimiento de conversión de celulosa a azúcares fermentables**

Concentración de levadura	Corrida	Rendimiento de conversión	Media	Desviación estándar
8%	1	46,33%	46,94%	0,0052
	2	46,54%		
	3	46,25%		
9%	1	47,44%		
	2	47,19%		
	3	47,88%		
10%	1	47,52%		
	2	47,34%		
	3	47,07%		
11%	1	46,35%		
	2	47,54%		
	3	46,60%		
12%	1	46,54%		
	2	46,71%		
	3	46,79%		

Fuente: elaboración propia.

4.2. Porcentaje de conversión de azúcares fermentables a etanol

Se refiere al porcentaje de conversión de azúcares fermentables a etanol, en base al rendimiento teórico y real obtenido. En esta sección, se toma en cuenta el porcentaje de etanol obtenido y el rendimiento de conversión en base al porcentaje de levadura utilizado.

Tabla VII. Rendimiento de conversión de azúcares fermentables a etanol

Concentración de levadura	Corrida	Rendimiento de conversión	Media	Desviación estándar
8%	1	36,14%	37,64%	0,01311
	2	38,58%		
	3	38,20%		
9%	1	64,07%	68,22%	0,03775
	2	69,14%		
	3	71,45%		
10%	1	97,97%	98,11%	0,00773
	2	98,95%		
	3	97,42%		
11%	1	88,32%	89,98%	0,01720
	2	89,87%		
	3	91,75%		
12%	1	56,02%	56,33%	0,01149
	2	55,37%		
	3	57,60%		

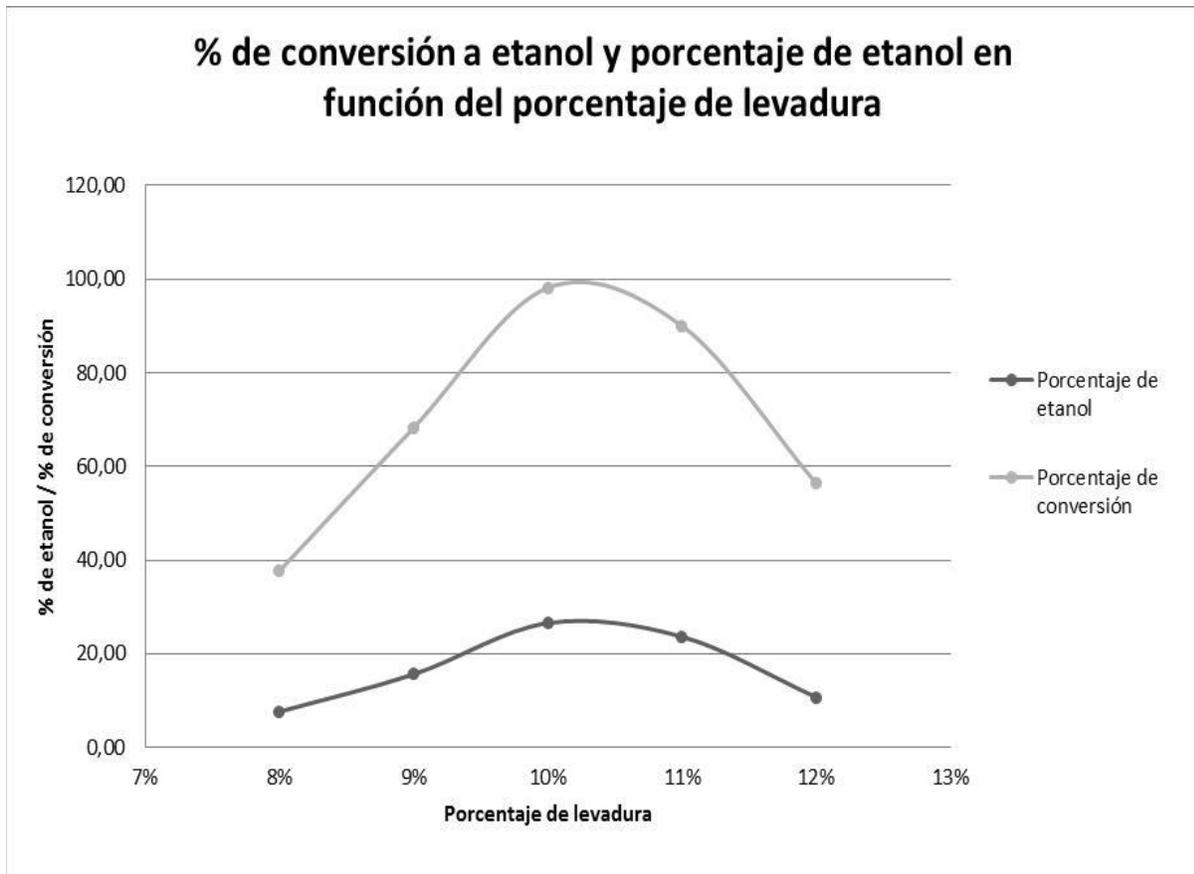
Fuente: elaboración propia.

Tabla VIII. **Porcentaje de etanol obtenido para cada variación de levadura**

Concentración de levadura	Corrida	Media % de etanol	Desviación estándar
8%	1	7,631	0,253
	2		
	3		
9%	1	15,599	0,439
	2		
	3		
10%	1	26,527	0,280
	2		
	3		
11%	1	23,634	0,322
	2		
	3		
12%	1	10,720	0,416
	2		
	3		

Fuente: elaboración propia.

Figura 6. **Relación entre el porcentaje de conversión de celulosa a azúcares fermentables y el porcentaje de etanol presente en función del porcentaje de levadura**



Fuente: elaboración propia.

4.3. Análisis estadístico

El nivel de significancia de las variaciones de los resultados obtenidos con la variación de porcentaje de levadura en el proceso de fermentación, se evaluó con un análisis de varianza de un factor.

Tabla IX. **Análisis de varianza de un factor**

Origen de las variaciones	Suma de cuadrados	GL	Promedio de los cuadrados	Valor F Calculado	P	Valor crítico para F
Entre grupos	0,727959	4	0,18199	436,45	3,57845 E-11	3,4781
Dentro de los grupos	0,00417	10	0,000417			
Total	0,732128	14				

Fuente: elaboración propia.

Los resultados obtenidos del ANOVA se utilizaron para descartar o comprobar la hipótesis alternativa planteada en esta investigación.

Tabla X. **Evaluación de hipótesis estadística**

Criterio 1	Hipótesis	Conclusión
$F_{\text{calculado}} > F_{\text{crítico}}$	Alternativa (Hi)	Aceptada
	Nula (Ho)	Rechazada

Fuente: elaboración propia.

4.4. **Relación energética entre el eje de inflorescencia de la piña y el etanol**

Se presenta la relación entre el poder calorífico del eje de inflorescencia de la piña seca con relación al producto terminado (etanol de segunda generación).

Tabla XI. **Diferencia energética entre el eje de inflorescencia de la piña y el destilado al 26,5% al tomando en cuenta el secado**

	% en peso	Masa de cada compuesto (kg)	Poder calorífico (kJ)	Diferencia de energía (kJ)
Eje de inflorescencia de la piña	0,1154	0,1154	1 813,04	-169,968
Humedad presente	0,8846	0,8846	1 983,00	

Fuente: elaboración propia.

Tabla XII. **Relación de poderes caloríficos entre el eje de inflorescencia de la piña y el etanol**

Producto	Tipo de poder calorífico	Poder calorífico		Eje de inflorescencia de la piña	Etanol 27%
Eje de inflorescencia de la piña	PCM	0,002568	BEP/ton métrica	1	0,631747
Etanol 27%	PCS	0,004065	BEP/1 000L	1,582912	1

Fuente: elaboración propia.

Tabla XIII. **Matriz energética entre el poder calorífico del eje de inflorescencia de la piña y el producto obtenido en relación con diversos combustibles**

		Producto	Poder calorífico (BEP/kg)		Eje de inflorescencia de la piña	Etanol 27%
BEP/ ton métrica	Materia prima y producto	Eje de inflorescencia de la piña	0,00257	PCM	1,000	0,632
BEP/ 1 000L		Etanol 27%	0,00406	PCS	1,583	1,000
BEP/ ton métrica	Maderas y residuos agrícolas	Bagazo húmedo	0,00172	PCM	0,668	0,422
		Bagazo seco	0,00314	PCM	1,222	0,772
		Cascara de cacahuate	0,00291	PCM	1,133	0,716
		Madera seca	0,00311	PCM	1,209	0,764
	Carbón y otros combustibles sólidos	Hulla	0,00513	PCS	1,999	1,263
		Carbón de madera	0,00551	PCS	2,145	1,355
		Coque	0,00551	PCS	2,145	1,355
		Coque de petróleo	0,00597	PCS	2,323	1,468
BEP/ 1 000L	Combustibles líquidos	Fuel oil no.1	0,00698	PCS	2,718	1,717
		Fuel oil no.2	0,00684	PCS	2,664	1,683
		Gasolina	0,00766	PCS	2,984	1,885
		Petróleo bruto	0,00784	PCS	3,053	1,929
		Queroseno	0,00760	PCS	2,960	1,870
		Etanol Puro	0,00486	PCS	1,892	1,195
		Etanol (55%)	0,00437	PCS	1,703	1,076
BEP/ 1 000m ³	Combustibles gaseosos	Gas natural	0,00719	PCS	2,801	1,769
		Hidrógeno	0,02319	PCS	9,029	5,704
		Propano	0,00825	PCS	3,211	2,029
		Butano	0,00812	PCS	3,162	1,997

Fuente: elaboración propia.

Tabla XIV. **Producción de etanol estimada en base al consumo mensual de piña**

Eje de inflorescencia mensual (kg)	Eje de inflorescencia seco (kg)	Muestras en 0,003 kilogramos	Volumen producido tentativamente al 26,5% de etanol (L)
60	6,924	2 308	110,78

Fuente: elaboración propia.

5. INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS

La producción de etanol a partir de residuos orgánicos, fue evaluada con la finalidad de determinar los porcentajes de conversión de celulosa presente en el eje de inflorescencia de la piña, a azúcares fermentables, y de azúcares fermentables a etanol. Asimismo se determinó la producción energética por medio de la comparación de poderes caloríficos.

La materia prima consistió en el eje de inflorescencia de la piña (corazón de piña), el cual se procedió a secar por un tiempo de 18 horas, para posteriormente realizar la reducción de partícula. Luego se procedió al proceso de tamizado para trabajar con el retenido del tamiz No. 40. Al tener una muestra de la materia prima se realizaron análisis preliminares respecto a la cantidad de celulosa presente, el valor determinado fue de 19,26 por ciento.

Para alcanzar el primer objetivo específico de esta investigación, la determinación del rendimiento de conversión de celulosa a azúcares fermentables; se realizó una hidrólisis básica con el fin de deslignificar la celulosa. Para esto se utilizó una solución de hidróxido de sodio con concentración 0,1 molar, a la cual se expuso la materia prima por un tiempo de 20 minutos, con una agitación de 600 revoluciones por minuto.

El siguiente paso lo constituyó una hidrólisis enzimática, la cual se llevó a cabo por medio de celulasa. Esta enzima rompe los enlaces de la celulosa, obteniendo D-glucosa como azúcar fermentable. Para el proceso se agregó un 20 por ciento en peso, con 600 revoluciones por minuto de agitación, a una temperatura constante de 50 grados centígrados durante 2 horas.

Posteriormente se dejó enfriar la mezcla anterior y se analizó por medio de precipitometría con el reactivo de Benedict; mezclando este reactivo con la solución de azúcares en relación 4:1. Al obtener el precipitado, se filtró y se determinó la cantidad de óxido de dicobre que se obtuvo.

Utilizando estequiometría se determinó la cantidad de azúcares fermentables real y teórica; la relación entre estas dos cantidades indica el rendimiento de conversión con pretratamiento de hidróxido de sodio, el cual según el desarrollo experimental fue de $46,94 \pm 0,0052$ por ciento, respecto a la celulosa presente en el eje de inflorescencia. Estos resultados pueden observarse en la tabla VI de la Sección de Resultados, en la que se observa que se calculó una media de todas las corridas realizadas.

El rendimiento de conversión de azúcares a etanol, se determinó por medio de la fermentación de los azúcares fermentables. El proceso de fermentación se llevó a cabo en un equipo realizado a nivel laboratorio, agregándole la levadura (*S.cerevisiae*) de acuerdo al siguiente rango de porcentaje entre 8 y 12, con un tiempo de fermentación de 24 horas para cada variación de concentración.

En la tabla VIII de la Sección de Resultados se muestran los datos del Porcentaje de etanol obtenido para las distintas concentraciones de levadura. Donde el máximo porcentaje de alcohol obtenido fue de $26,527 \pm 0,280$ por ciento, correspondiente a un porcentaje de levadura de 10 por ciento; y el valor mínimo obtenido fue de $7,631 \pm 0,253$ por ciento correspondiente a un porcentaje de levadura de 8 por ciento, lo cual se relaciona directamente con el Rendimiento de conversión de azúcares a etanol.

Al observar la tendencia de los valores en conjunto en la figura 6 de la sección de Resultados, se observa una tendencia cuadrática negativa. Esto es en gran parte causado por el mecanismo de reacción de la levadura, ya que después de la concentración máxima, el desarrollo de la misma se ve afectado por la cantidad de alimento y la presencia de etanol, que son factores que inhiben el crecimiento adecuado de la misma.

Los resultados obtenidos respecto al rendimiento de conversión de azúcares a etanol se observa en la tabla VII; obteniendo como máximo porcentaje de conversión $98,11 \pm 0,00773$ por ciento, correspondiente a un porcentaje de levadura de 10 por ciento; y un valor mínimo de $37,64 \pm 0,01311$ por ciento, correspondiente a un porcentaje de levadura de 8 por ciento. En la figura 6 se puede observar que el rendimiento de conversión posee una tendencia cuadrática negativa, por lo que existe un valor máximo.

En la figura 6, se relaciona el porcentaje de etanol y el rendimiento de conversión de azúcares con el porcentaje de levadura. Se puede observar que existe una tendencia igual en ambos casos, lo cual permite concluir que el porcentaje de levadura que tiene el mayor porcentaje de etanol, posee a su vez el mayor porcentaje de conversión. Siendo ambas gráficas directamente proporcionales.

La variabilidad de los resultados y el nivel de significancia fueron evaluados mediante un análisis de varianza de un factor (ANOVA). Se utilizó como variable respuesta el porcentaje de conversión de azúcares fermentables a etanol. Se utilizó un valor de confianza del 95 por ciento. Los resultados de éste se muestran en la tabla IX y la conclusión obtenida a partir de dos criterios se muestra en la tabla X, respecto a la aceptación o rechazo de las hipótesis planteadas. Debido a que el valor F calculado para la variación entre los

resultados del rendimiento de conversión de azúcares fermentables a etanol es mayor al valor F crítico.

La hipótesis alternativa planteada en esta investigación es aceptada; es decir se acepta el enunciado, los porcentajes de conversión de azúcares fermentables a etanol no son iguales al variar la concentración de levadura durante la fermentación.

Respecto a la producción energética se realizaron dos comparaciones. La primera es en relación al eje de inflorescencia de la piña húmedo y seco. Para esto se necesitaron los siguientes datos: los porcentajes del bagazo húmedo y seco, la energía necesaria para evaporar el agua presente y el poder calorífico del eje de inflorescencia de la piña seco. Se comparó el poder calorífico utilizado en un kilogramo obteniendo una diferencia negativa de energía, por lo que se concluye que se consumió mayor energía al retirar el agua no ligada que al quemar la biomasa seca. Lo anterior afirma que este proceso no es energéticamente viable.

Luego de ello se comparó el poder calorífico del eje de inflorescencia de la piña con el del destilado obtenido con mayor porcentaje de etanol. Esta comparación se realizó en barriles equivalente de petróleo, medida utilizada para combustibles alternativos. Obteniendo una relación entre ambos de 1,585, como se puede ver en la tabla XII.

Por ello respecto al poder calorífico, el proceso de transformación de esta investigación posee en el ámbito energético una ganancia neta positiva.

Además éste se relaciona con otros combustibles comunes utilizados en la actualidad por medio de una matriz energética, que se puede observar en la

tabla XIII. En esta tabla se puede comparar los poderes caloríficos de distintos combustibles en estado sólido, líquido y gaseoso. Al comparar energéticamente los combustibles por medio de sus poderes caloríficos, se puede visualizar de una mejor manera los beneficios energéticos que se puede tener al usar los mismos.

En esta tabla se puede visualizar el etanol puro y al 55 por ciento, relacionándolo con el eje de inflorescencia de la piña se observa que el puro es 1,892 veces el poder calorífico; y el etanol al 55 por ciento, 1,703 veces. Al comparar el etanol al 26,5 por ciento con estos mismos combustibles se obtiene una relación de 1,195 y 1,076 veces, respectivamente.

Al observar que el consumo mensual promedio una fábrica de mermeladas es de 2 040,81 kilogramos, se tiene que en promedio se produciría 60 kilogramos de desecho del eje de inflorescencia de la piña húmedo, que representa 6,924 kilogramos secos. Relacionando estos datos con los rendimientos obtenidos en la parte experimental, por cada 0,003 kilogramos de materia prima se obtiene 0,048 litros promedio de etanol al 26,5 por ciento, se puede obtener 110,78 litros mensuales.

Al analizar las alternativas de combustibles, se observa que puede ser energéticamente viable la sustitución de algún combustible por otro de similar poder calorífico. Sin embargo existen otros factores importantes a considerar, como el tipo de equipo de combustión que se posea, ya que no todos están adecuados para quemar las diversas formas de presentación de los combustibles, y la comparación económica entre estos.

CONCLUSIONES

1. El rendimiento de conversión de celulosa a azúcares fermentables para el eje de inflorescencia de la piña, especie (*Anannas Comosus*, *L. Merr.*, especie Cayena Lisa) es de $46,94 \pm 0,0052$ por ciento.
2. El rendimiento máximo de conversión de azúcares fermentables a etanol es $98,11 \pm 0,0077$ por ciento, con un porcentaje de etanol de $26,527 \pm 0,280$ por ciento, para un porcentaje de levadura del 10 por ciento; mientras que el rendimiento mínimo es de $37,64 \pm 0,01311$ por ciento con un porcentaje de etanol de $7,631 \pm 0,253$ por ciento, para un porcentaje de levadura de 8 por ciento; observando una proporcionalidad directa entre estas dos propiedades, con una tendencia cuadrática negativa para ambas justificada en el ciclo de vida de la levadura, según se muestra en la figura 6.
3. Al relacionar los datos obtenidos experimentalmente, se estima que con un consumo promedio mensual de piña de 2 040,81 kilogramos, se puede producir 110,78 litros de etanol al 26,5 por ciento.
4. Es posible producir etanol de segunda generación a partir del eje de inflorescencia de la piña, según lo planteado en la hipótesis científica, afirmando que existe diferencia significativa en el rendimiento de conversión de azúcares fermentables a etanol al variar los porcentajes de levadura en el proceso de fermentación.

5. Existe una relación del poder calorífico de 1,583 entre el eje de inflorescencia de la piña y el destilado con mayor rendimiento de etanol, 26,5 por ciento en promedio.

RECOMENDACIONES

1. Evaluar el rendimiento de conversión de azúcares fermentables a etanol realizando la hidrólisis enzimática de forma simultánea con la fermentación, para determinar si existe variación en los rendimientos de conversión. Además tomar en cuenta el factor de agitación constante para el diseño del sistema de fermentación, con el objetivo de determinar el efecto que este parámetro tiene en la producción de etanol.
2. Evaluar el rendimiento de conversión de celulosa a azúcares fermentables atacando a la lignina por medio de hidrólisis ácida con el fin de determinar cuál de los dos métodos (ácida o básica), produce mayor rendimiento de conversión.
3. Evaluar el rendimiento de la obtención de etanol de segunda generación a partir de la celulosa del eje de la inflorescencia de la piña de las dos especies restantes de piña presentes en el territorio nacional, Montufar y Española Roja; comparando de esta forma la producción energética de cada una de ellas y así concluir que especie es la mejor para llevar a cabo el proceso.

BIBLIOGRAFÍA

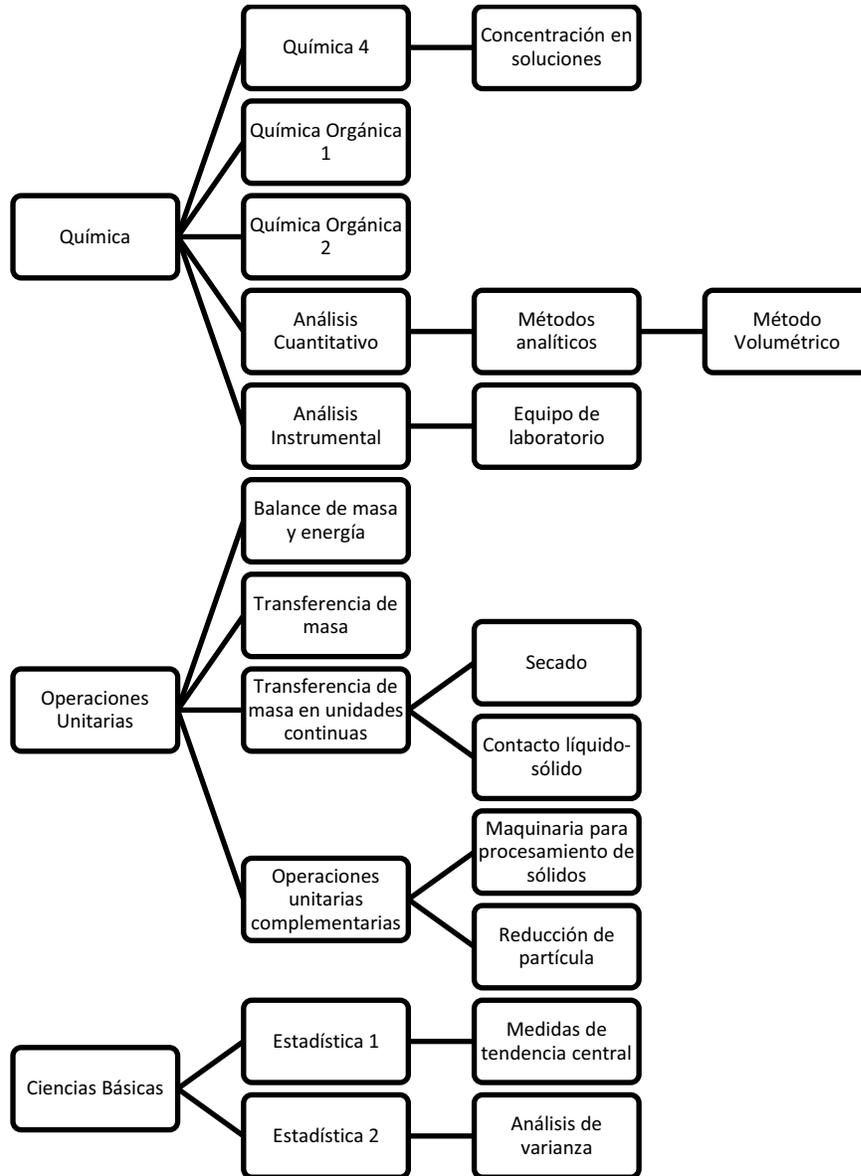
1. ALVIRA, P.; TOMÁS-PEJÓ, E.; BALLESTEROS, M.; & Negro, M. J.; *Pretreatment technologies for an efficient bioethanol production process based on enzymatic hydrolysis: A review*. Bioresource Technology. 1a ed. Inglaterra: Wiley, 2010. 5661 p.
2. Asociación Mundial de la Bioenergía. *A Review of the current state of bioenergy develops in G8+5 countries*. [en línea] Roma, Italia: 2007, Secretaría de la GBEP, FAO. <www.fao.org>. [consulta: 30 de octubre de 2012].
3. Banco de Guatemala. *Estadísticas de producción, exportación, importación y precios medios de los principales productos agrícolas*. Guatemala: BANGUAT, 2004. 150 p.
4. BARTHOLOMEW, Charles. *The Pineapple Botany, Production and Uses*. 2a ed. Inglaterra: Pearson, 2003. 550 p.
5. BIOFIELDS. *Energía Renovable y Sustentable 2010*. [en línea]. México. <<http://www.biofields.com>>. [consulta: 30 de octubre de 2012].
6. CABRERA, Mario. *La piña*. 1a ed. Guatemala: PROFRUTA 1997. 127 p.

7. CÓRDOBA PÉREZ, Maureen Daniela. *Determinación del efecto de la concentración de la base NaOH, de la celulosa y celobiasa en la hidrólisis para la producción de etanol a partir del rastrojo de la piña*. Proyecto de graduación para optar por el grado de Licenciatura en Ingeniería Química. Universidad de Costa Rica, Escuela de Ingeniería Química, Costa Rica. 2011. 201 p.
8. Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación. *El estado mundial de la agricultura y la alimentación*. Biocombustibles: perspectivas, riesgos y oportunidades. [en línea] Roma, Italia, 2008. <www.fao.org>. ISSN 0251-1371. [consulta: 30 de octubre de 2012].
9. HANSEN, Albert. *Microbiología de las Fermentaciones Industriales*. 2a ed. España: McGraw Hill, 1959. 568 p.
10. HENDRICKS, A.; ZEEMAN, G. *Pretreatments to enhance the digestibility of lignocellulosic biomass*. 3a ed. Estados Unidos: McGraw Hill, 2009. 250p.
11. KUMAR, Paul. *Methods for Pretreatment of Lignocellulosic Biomass for Efficient Hydrolysis and Biofuel Production*. 1a ed. Estados Unidos: McGraw Hill, 2009. 3 729p.
12. MELTZER, Robert L. *1979 Annual Book of ASTM Standards*. Parte 22. Madera y Adhesivos. Estados Unidos de América: Sociedad Americana de Ensayos y Materiales, 1979. pp. D 1109-60, D 1103-60, D 1105-56, D 1106-56.

13. Ministerio de Agricultura Ganadería y Alimentación. *El Agro en cifras 2011*. Guatemala, Diciembre 2011. <<http://www2.maga.gob.gt/portal.maga.gob.gt/portal/page/portal/2020/2012/PDFs/elagroencifras.pdf>>. [consulta: 30 de octubre de 2012].
14. PERRY, Robert H. *Perry's Chemical Engineers' Handbook*. 8a ed. Nueva York, Estados Unidos: McGraw-Hill, 2008. 2700 p
15. TEJEDA, Lesly. *Obtención de etanol a partir de residuos de Poda, mediante hidrólisis ácida e Hidrólisis enzimática*. Fundación Universitaria Tecnológico Comfenalco. Cartagena, Colombia. 2011.
16. QUIZHPI LÓPEZ, Luis Fernando. *Obtención de etanol a partir de los residuos orgánicos de la sección de frutas del mercado mayorista de Riobamba*. Proyecto de graduación para optar por el grado de Licenciatura en Ingeniero en Biotecnología Ambiental. Escuela de Ciencias Químicas, Escuela Superior Politécnica de Chimborazo, Ecuador. 2008. 126 p.
17. WALPOLE, Myers & Myers. *Probabilidad y estadística para ingenieros*. 6a ed. México: Pearson Education, 1999. 797p.

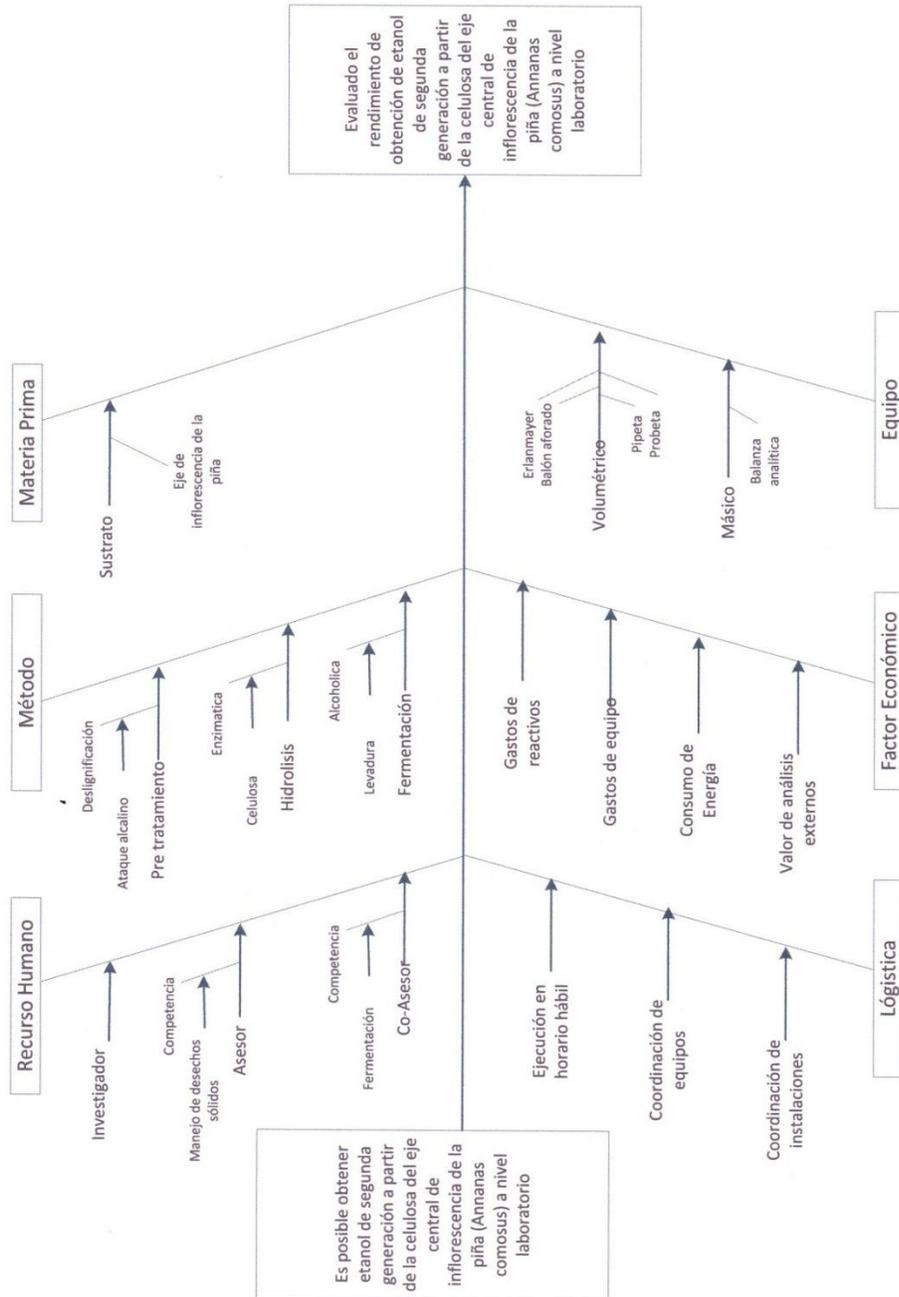
APÉNDICES

Figura 7. **Tabla de requisitos académicos**



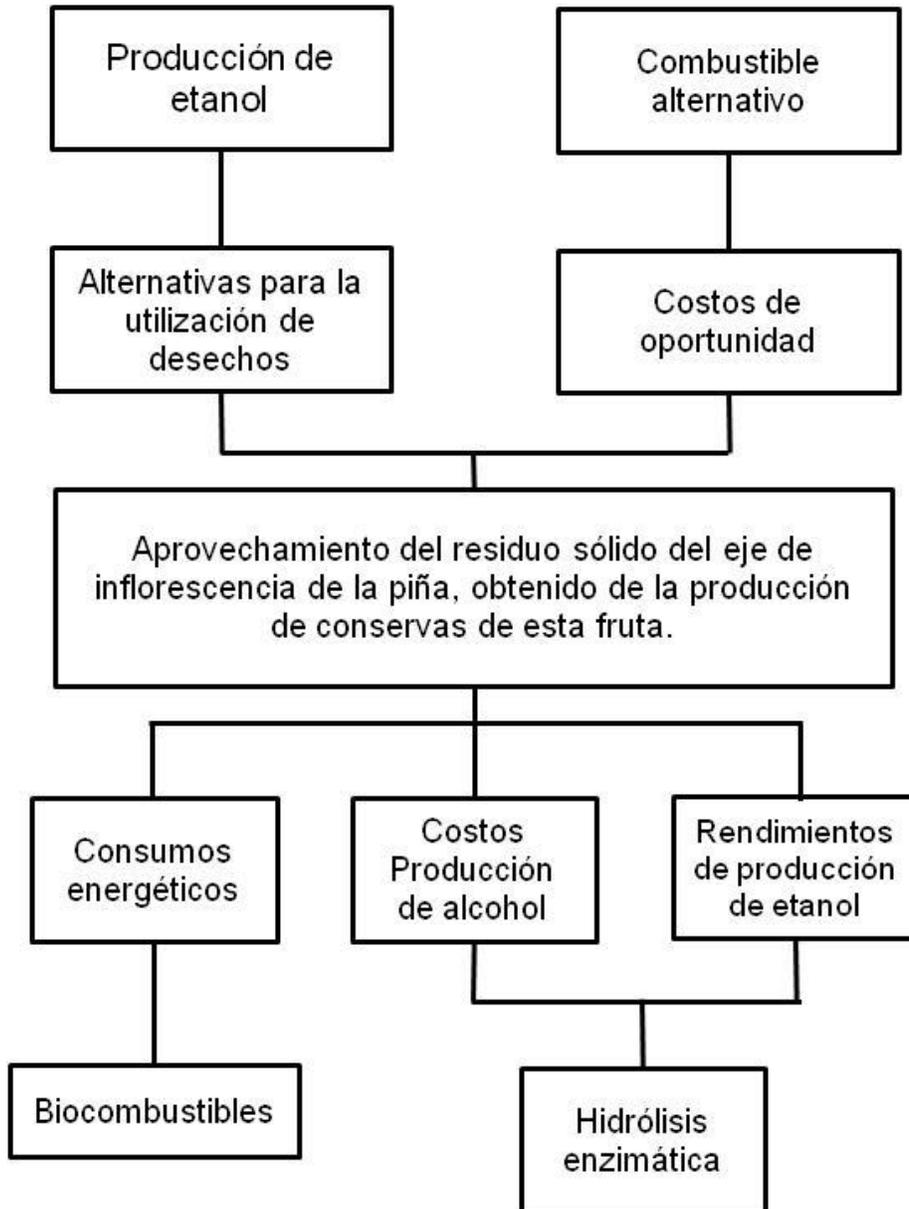
Fuente: elaboración propia.

Figura 8. Diagrama Ishikawa



Fuente: elaboración propia

Figura 9. **Árbol de problemas**



Fuente: elaboración propia.

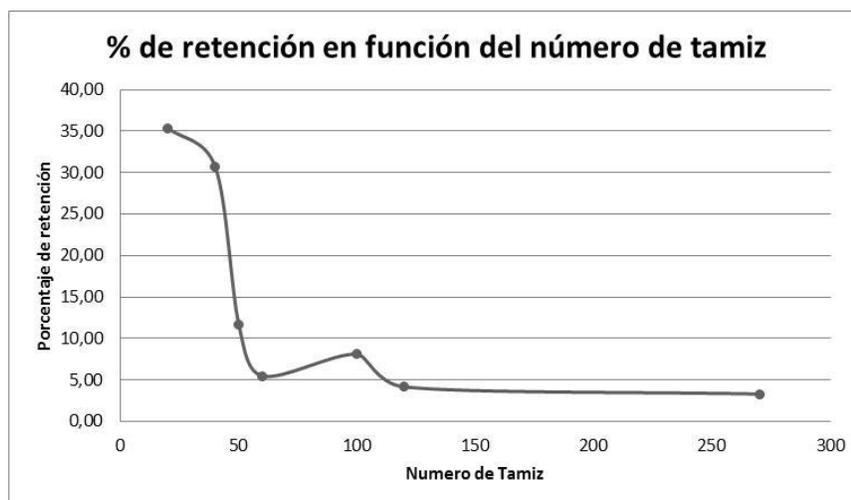
Análisis preliminares

Tabla XV. Datos para curva granulométrica

No.	Tamiz	Pulgadas	Milímetros (mm)	Micrones	% Retención
1	20	0,0331	0,840	840	35,38
2	40	0,0165	0,420	420	30,72
3	50	0,0117	0,297	297	11,65
4	60	0,0098	0,250	250	5,47
5	100	0,0059	0,149	149	8,10
6	120	0,0049	0,125	125	4,15
7	270	0,0021	0,053	53	3,29
8	Fondo	Fondo	Fondo	Fondo	1,24

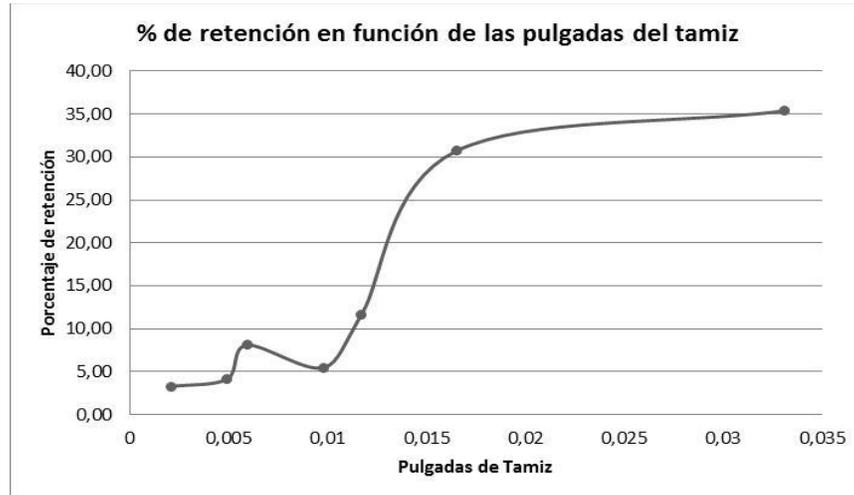
Fuente: elaboración propia.

Figura 10. Curva granulométrica en función del número de tamiz



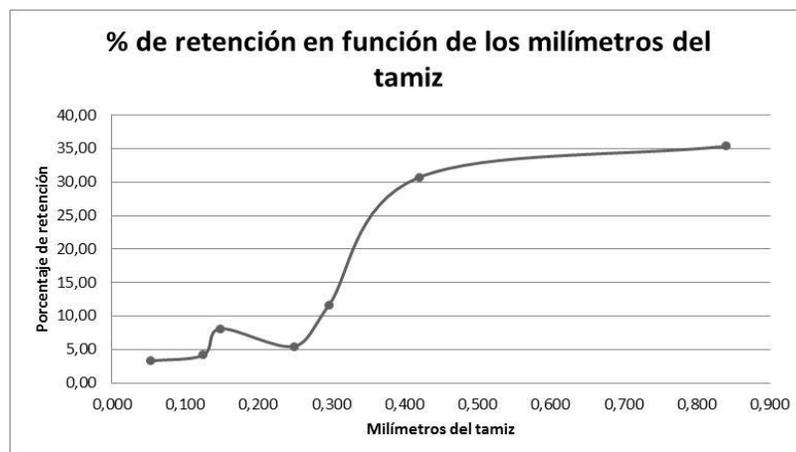
Fuente: elaboración propia.

Figura 11. **Curva granulométrica en función de las pulgadas del tamiz**



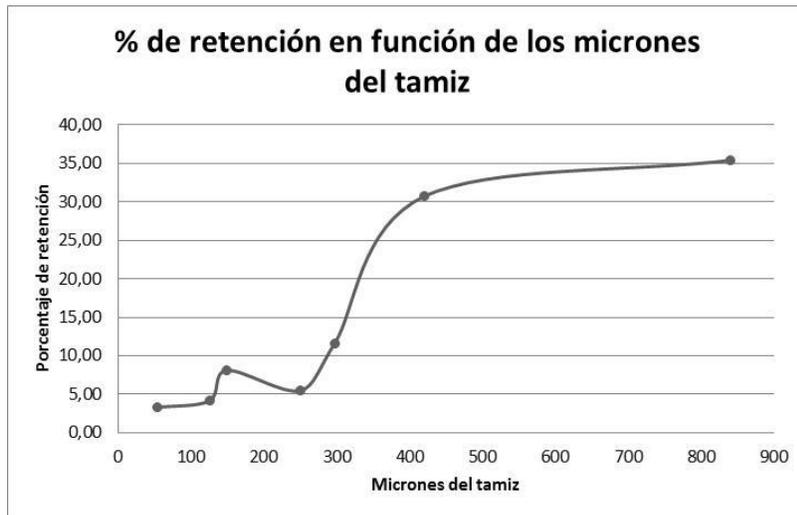
Fuente: elaboración propia.

Figura 12. **Curva granulométrica en función de los milímetros del tamiz**



Fuente: elaboración propia.

Figura 13. **Curva granulométrica en función de los micrones del tamiz**



Fuente: elaboración propia.

Tabla XVI. **Datos preliminares para la determinación de la cantidad de azúcares fermentables presentes al variar la concentración de NaOH en un tiempo estándar de 20 minutos con una muestra de 1 gramo de piña**

Concentración NaOH (M)	Corrida	Cantidad Celulosa (g)	Peso Papel Filtro (g)	Peso Total (g)	Peso Cobre (g)	Cantidad de Azúcares fermentables real (g)
0,01	1	0,1928	0,800	0,836	0,036	0,0454
	2	0,1926	0,796	0,830	0,034	0,0429
	3	0,1930	0,799	0,835	0,036	0,0454
0,05	1	0,1936	0,799	0,847	0,048	0,0606
	2	0,1931	0,796	0,844	0,048	0,0606
	3	0,1932	0,801	0,850	0,049	0,0618
0,10	1	0,1930	0,796	0,882	0,086	0,1085
	2	0,1928	0,795	0,884	0,089	0,1123
	3	0,1930	0,795	0,880	0,085	0,1073
0,15	1	0,1928	0,797	0,857	0,060	0,0757
	2	0,1926	0,799	0,853	0,054	0,0681
	3	0,1926	0,795	0,856	0,061	0,0770
0,20	1	0,1930	0,800	0,850	0,050	0,0631
	2	0,1930	0,799	0,855	0,056	0,0707
	3	0,1928	0,799	0,851	0,052	0,0656

Fuente: elaboración propia.

Tabla XVII. **Datos preliminares para la determinación de la conversión celulosa a azúcares fermentables al variar la concentración de NaOH en un tiempo estándar de 20 minutos**

Concentración NaOH (M)	Corrida	Cantidad de azúcares fermentables real (g)	Cantidad de azúcares fermentables teórica (g)	Rendimiento Conversión
0,01	1	0,0454	0,2143	21,19%
	2	0,0429	0,2141	20,04%
	3	0,0454	0,2145	21,17%
0,05	1	0,0606	0,2152	28,15%
	2	0,0606	0,2147	28,22%
	3	0,0618	0,2148	28,79%
0,10	1	0,1085	0,2145	50,58%
	2	0,1123	0,2143	52,40%
	3	0,1073	0,2145	49,99%
0,15	1	0,0757	0,2143	35,32%
	2	0,0681	0,2141	31,82%
	3	0,0770	0,2141	35,95%
0,20	1	0,0631	0,2145	29,41%
	2	0,0707	0,2145	32,94%
	3	0,0656	0,2143	30,61%

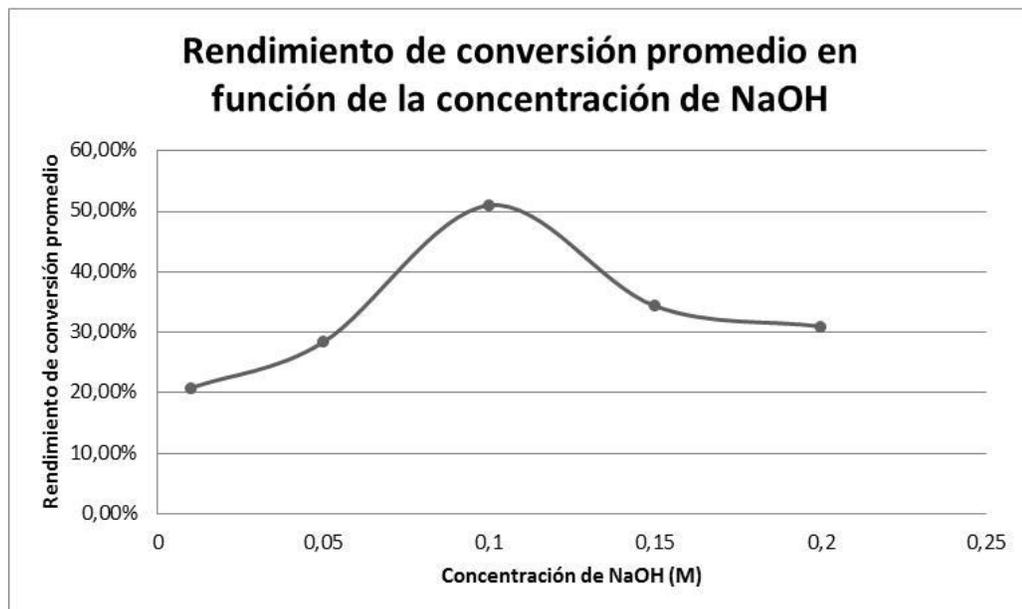
Fuente: elaboración propia.

Tabla XVIII. **Datos preliminares promedio de la conversión de celulosa a azúcares fermentables al variar la concentración de NaOH en un tiempo estándar de 20 minutos**

Concentración NaOH (M)	Rendimiento Promedio
0,01	20,80%
0,05	28,38%
0,1	50,99%
0,15	34,37%
0,2	30,99%

Fuente: elaboración propia.

Figura 14. **Rendimiento de Conversión promedio en función de la concentración de NaOH en un tiempo de 20 minutos**



Fuente: elaboración propia.

Tablas de recopilación de respuestas

Tabla XIX. **Tabla de recopilación de pesos iniciales y finales**

Cantidad Levadura	Corrida	Cantidad Inicial (g)	Peso Papel Filtro (g)	Peso Total (g)	Peso Cobre (g)
8%	1	3,002	0,800	1,036	0,236
	2	3,001	0,796	1,033	0,237
	3	3,007	0,799	1,035	0,236
9%	1	3,031	0,799	1,043	0,244
	2	3,010	0,796	1,037	0,241
	3	3,003	0,801	1,045	0,244
10%	1	3,001	0,796	1,038	0,242
	2	3,000	0,794	1,035	0,241
	3	3,005	1,135	1,375	0,24
11%	1	3,001	1,143	1,379	0,236
	2	3,000	1,107	1,349	0,242
	3	3,010	1,120	1,358	0,238
12%	1	3,001	1,101	1,338	0,237
	2	3,003	1,125	1,363	0,238
	3	3,01	1,116	1,355	0,239

Fuente: elaboración propia.

Tabla XX. **Tabla de recopilación de volumen de fermentación, masa y volumen finales**

Cantidad Levadura	Corrida	Volumen Fermentación (mL)	Peso tara (g)	Peso Total (g)	Volumen de alcohol (mL)
8%	1	75	139,518	193,712	55
	2	75	137,171	193,313	57
	3	70	138,759	193,958	56
9%	1	70	118,693	165,490	48
	2	75	106,768	157,4136	52
	3	75	139,518	193,0974	55
10%	1	80	126,280	172,319	48
	2	80	139,387	185,421	48
	3	80	139,585	185,659	48
11%	1	75	123,195	166,582	45
	2	75	106,898	151,217	46
	3	75	126,740	171,052	46
12%	1	75	151,228	209,066	59
	2	70	139,611	197,517	59
	3	70	139,518	197,386	59

Fuente: elaboración propia.

Tablas de procesamiento de la información

Tabla XXI. **Determinación de cantidad de azúcares fermentables real presentes para cada corrida de las diferentes variaciones de levadura**

Cantidad Levadura	Corrida	Cantidad Inicial (g)	Cantidad Celulosa (g)	Peso Papel Filtro (g)	Peso Total (g)	Peso Cobre (g)	Cantidad real de Azúcares ferment. (g)
8%	1	3,002	0,5782	0,800	1,036	0,236	0,2978
	2	3,001	0,5780	0,796	1,033	0,237	0,2991
	3	3,007	0,5791	0,799	1,035	0,236	0,2978
9%	1	3,031	0,5838	0,799	1,043	0,244	0,3079
	2	3,010	0,5797	0,796	1,037	0,241	0,3041
	3	3,003	0,5784	0,801	1,045	0,244	0,3079
10%	1	3,001	0,5780	0,796	1,038	0,242	0,3054
	2	3,000	0,5778	0,794	1,035	0,241	0,3041
	3	3,005	0,5788	1,135	1,375	0,24	0,3028
11%	1	3,001	0,5780	1,143	1,379	0,236	0,2978
	2	3,000	0,5778	1,107	1,349	0,242	0,3054
	3	3,010	0,5797	1,120	1,358	0,238	0,3003
12%	1	3,001	0,5780	1,101	1,338	0,237	0,2991
	2	3,003	0,5784	1,125	1,363	0,238	0,3003
	3	3,01	0,5797	1,116	1,355	0,239	0,3016

Fuente: elaboración propia.

Tabla XXII. **Determinación del rendimiento de conversión de celulosa a azúcares fermentables con media y desviación estándar**

%	No.	Cantidad real de azúcares ferment. (g)	Cantidad teórica de azúcares ferment. (g)	Rendimiento de conversión	Media (%)	Desviación estándar
8%	1	0,2978	0,6428	46,33%	46,94	0,0052
	2	0,2991	0,6426	46,54%		
	3	0,2978	0,6439	46,25%		
9%	1	0,3079	0,6490	47,44%		
	2	0,3041	0,6445	47,19%		
	3	0,3079	0,6430	47,88%		
10%	1	0,3054	0,6426	47,52%		
	2	0,3041	0,6424	47,34%		
	3	0,3028	0,6434	47,07%		
11%	1	0,2978	0,6426	46,35%		
	2	0,3054	0,6424	47,54%		
	3	0,3003	0,6445	46,60%		
12%	1	0,2991	0,6426	46,54%		
	2	0,3003	0,6430	46,71%		
	3	0,3016	0,6445	46,79%		

Fuente: elaboración propia.

Tabla XXIII. **Determinación de densidad con su media y desviación estándar para cada variación de levadura**

Cantidad Levadura	Corrida	Densidad Alcohol (g/mL)	Media	Desviación estándar
8%	1	0,98535	0,98533	0,00037
	2	0,98495		
	3	0,98570		
9%	1	0,97494	0,97436	0,00052
	2	0,97395		
	3	0,97417		
10%	1	0,95915	0,95935	0,00045
	2	0,95904		
	3	0,95988		
11%	1	0,96416	0,96364	0,00046
	2	0,96345		
	3	0,96330		
12%	1	0,98031	0,98086	0,00058
	2	0,98146		
	3	0,98081		

Fuente: elaboración propia.

Tabla XXIV. **Iteración de porcentaje de alcohol para el 8% de levadura**

Iteración					
1		2		3	
0,98523	7,700	0,98493	7,900	0,98567	7,400
0,98535	7,623	0,98495	7,888	0,98570	7,382
0,98538	7,600	0,98508	7,800	0,98582	7,300

Fuente: elaboración propia.

Tabla XXV. **Iteración de porcentaje de alcohol para el 9% de levadura**

Iteración					
1		2		3	
0,97488	15,200	0,97387	16,000	0,97412	15,800
0,97494	15,102	0,97395	15,935	0,97417	15,760
0,97501	15,000	0,97400	15,900	0,97425	15,700

Fuente: elaboración propia.

Tabla XXVI. **Iteración de porcentaje de alcohol para el 10% de levadura**

Iteración					
1		2		3	
0,95914	26,600	0,95898	26,800	0,9597	26,300
0,95915	26,604	0,95904	26,761	0,9598	26,217
0,95929	26,700	0,95914	26,700	0,9599	26,200

Fuente: elaboración propia.

Tabla XXVII. **Iteración de porcentaje de alcohol para el 11% de levadura**

Iteración					
1		2		3	
0,96411	23,300	0,9634	23,800	0,9632	23,900
0,96416	23,267	0,9634	23,767	0,9633	23,868
0,96425	23,200	0,9635	23,700	0,9634	23,800

Fuente: elaboración propia.

Tabla XXVIII. **Iteración de porcentaje de alcohol para el 12% de levadura**

Iteración					
1		2		3	
0,98019	11,200	0,98144	10,300	0,98075	10,800
0,98031	11,118	0,98146	10,287	0,98081	10,755
0,98033	11,100	0,98158	10,200	0,98089	10,700

Fuente: elaboración propia.

Tabla XXIX. **Determinación del porcentaje de alcohol en base a la densidad del destilado**

Cantidad Levadura	Corrida	% Etanol	Media	Desviación Estándar
8%	1	7,623	7,631	0,253
	2	7,888		
	3	7,382		
9%	1	15,102	15,599	0,439
	2	15,935		
	3	15,760		
10%	1	26,604	26,527	0,280
	2	26,761		
	3	26,217		
11%	1	23,267	23,634	0,322
	2	23,767		
	3	23,868		
12%	1	11,118	10,720	0,416
	2	10,287		
	3	10,755		

Fuente: elaboración propia.

Tabla XXX. **Determinación del rendimiento real, teórico y de conversión de azúcares fermentables a etanol**

Cantidad levadura	Corrida	Rendimiento real (g)	Rendimiento teórico (g)	Rendimiento de conversión
8%	1	4,131	11,430	36,14%
	2	4,429	11,479	38,58%
	3	4,075	10,668	38,20%
9%	1	7,067	11,030	64,07%
	2	8,070	11,672	69,14%
	3	8,444	11,818	71,45%
10%	1	12,248	12,502	97,97%
	2	12,319	12,451	98,95%
	3	12,079	12,399	97,42%
11%	1	10,095	11,430	88,32%
	2	10,533	11,721	89,87%
	3	10,577	11,527	91,75%
12%	1	6,430	11,479	56,02%
	2	5,957	10,759	55,37%
	3	6,223	10,804	57,60%

Fuente: elaboración propia.

Tabla XXXI. **Rendimiento de conversión, media y desviación estándar para cada variación de levadura**

Cantidad levadura	Corrida	Rendimiento de conversión	Media	Desviación estándar
8%	1	36,14%	37,64%	0,013114
	2	38,58%		
	3	38,20%		
9%	1	64,07%	68,22%	0,037751
	2	69,14%		
	3	71,45%		
10%	1	97,97%	98,11%	0,00773
	2	98,95%		
	3	97,42%		
11%	1	88,32%	89,98%	0,017201
	2	89,87%		
	3	91,75%		
12%	1	56,02%	56,33%	0,011494
	2	55,37%		
	3	57,60%		

Fuente: elaboración propia.

Tabla XXXI. **Análisis de varianza de rendimiento de conversión de acuerdo a la variación de porcentaje de levadura**

Origen de las variaciones	Suma de cuadrados	GL	Promedio de los cuadrados	F	P	Valor crítico para F
Entre grupos	0,727959	4	0,18199	436,45	3,5784 5E-11	3,4780
Dentro de los grupos	0,00417	10	0,000417			
Total	0,732128	14				

Fuente: elaboración propia.

Tabla XXXII. **Evaluación de hipótesis estadística**

Criterio 1	Hipótesis	Conclusión
$F_{\text{calculado}} > F_{\text{crítico}}$	Alternativa (Hi)	Aceptada
	Nula (Ho)	Rechazada

Fuente: elaboración propia.

Tabla XXXIII. **Poder caloríficos para el acondicionamiento del eje de inflorescencia de la piña**

	Poder calorífico (kJ/kg)
Eje de inflorescencia de la piña	15 710,92
Evaporación de agua	2 241,7

Fuente: elaboración propia.

Tabla XXXIV. **Relación energética entre el eje de inflorescencia de la piña y el destilado al 26,5% al tomar en cuenta el secado para la combustión de la biomasa**

	% en peso	Masa de cálculo (kg)	Masa de cada compuesto (kg)	Poder calorífico (kJ)	Diferencia de energía (kJ)
Eje de inflorescencia de la piña	0,1154	1	0,1154	1813,04	-169,968
Humedad presente	0,8846	1	0,8846	1983,00	

Fuente: elaboración propia.

Tabla XXXV. **Poder calorífico de la materia prima con el producto terminado obtenido**

	Categoría	Producto	Eje de inflorescencia de la piña	Etanol 27%
BEP/ton métrica	Materia prima y producto	Eje de inflorescencia de la piña	1,000	0,632
BEP/1 000L		Etanol 27%	1,583	1,000

Fuente: elaboración propia.

Tabla XXXVI. Poder calorífico para de diversos combustibles

Categoría	Producto	Tipo de poder calorífico	Poder Calorífico (kJ/kg)	BEP
Materia prima y producto	Eje de inflorescencia de la piña	PCM	15 711	0,00257
	Etanol 27%	PCS	24 869	0,00406
Maderas y residuos agrícolas	Bagazo húmedo	PCM	10 500	0,00172
	Bagazo seco	PCM	19 200	0,00314
	Cáscara de cacahuete	PCM	17 800	0,00291
	Madera seca	PCM	19 000	0,00311
	Viruta seca	PCM	13 400	0,00219
	Papel	PCS	17 500	0,00286
Carbón y otros combustibles sólidos	Hulla	PCS	31 400	0,00513
	Antracita	PCS	34 700	0,00567
	Carbón de madera	PCS	33 700	0,00551
	Coque	PCS	33 700	0,00551
	Coque de petróleo	PCS	36 500	0,00597
Combustibles líquidos	Fuel oil No.1	PCS	42 695	0,00698
	Fuel oil No.2	PCS	41 860	0,00684
	Gasolina	PCS	46 885	0,00766
	Petróleo bruto	PCS	47 970	0,00784
	Queroseno	PCS	46 500	0,00760
	Etanol Puro	PCS	29 720	0,00486
	Etanol comercial (55%)	PCS	26 750	0,00437
Combustibles gaseosos	Gas natural	PCS	44 000	0,00719
	Hidrógeno	PCS	141 853	0,02319
	Propano	PCS	50 450	0,00825
	Butano	PCS	49 675	0,00812

Fuente: elaboración propia.

Tabla XXXVII. **Matriz energética comparando el eje de inflorescencia de la piña y el destilado obtenido con diversos combustibles**

	Categoría	Producto	Eje de inflorescencia de la piña	Etanol 27%
BEP/ton métrica	Materia prima y producto	Eje de inflorescencia de la piña	1,000	0,632
BEP/ 1000L		Etanol 27%	1,583	1,000
BEP/ ton métrica	Maderas y residuos agrícolas	Bagazo húmedo	0,668	0,422
		Bagazo seco	1,222	0,772
		Cáscara de cacahuate	1,133	0,716
		Madera seca	1,209	0,764
		Viruta seca	0,853	0,539
		Papel	1,114	0,704
	Carbón y otros combustibles sólidos	Hulla	1,999	1,263
		Antracita	2,209	1,395
		Carbón de madera	2,145	1,355
		Coque	2,145	1,355
		Coque de petróleo	2,323	1,468
BEP/ 1 000L	Combustible líquido	Fuel oil No.1	2,718	1,717
		Fuel oil No.2	2,664	1,683
		Gasolina	2,984	1,885
		Petróleo bruto	3,053	1,929
		Queroseno	2,960	1,870
		Etanol Puro	1,892	1,195
		Etanol comercial (55%)	1,703	1,076
BEP/ 1 000m ³	Combustible gaseoso	Gas natural	2,801	1,769
		Hidrógeno	9,029	5,704
		Propano	3,211	2,029
		Butano	3,162	1,997

Fuente: elaboración propia.

Tabla XXXVIII. **Detalle del peso de la piña**

	Peso (kg)	Porcentaje del Peso
Peso Piña Pelada	1,210	59,28%
Peso residuo	0,771	37,78%
Peso Corazón de Piña	0,060	2,94%
Total	2,041	

Fuente: elaboración propia.

Tabla XXXIX. **Datos de consumo promedio mensual**

Consumo Promedio Mensual (kg)	2 040,816
Promedio de Piñas consumidas Mensualmente (unidades)	1 000

Fuente: elaboración propia.

Tabla XL. **Producción de etanol estimada en base al consumo mensual de piña**

Eje de Inflorescencia Mensual (kg)	Eje de inflorescencia Seco (kg)	Muestra en 3 gramos	Volumen producido por cada 3 g de eje de inflorescencia de piña (mL)	Producción tentativa con etanol al 26,5% (L)
60	6,924	2 308	110 784,00	110,78

Fuente: elaboración propia.

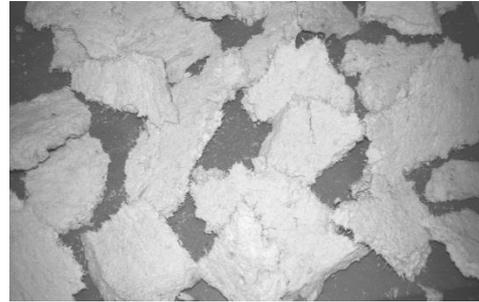
ANEXOS

Figura 15. **Eje de inflorescencia de la piña (materia prima)**



Fuente: Laboratorio de Química, edificio T-5, Facultad de Ingeniería, USAC.

Figura 16. **Secado de materia prima**



Fuente: Laboratorio de Química, edificio T-5, Facultad de Ingeniería, USAC.

Figura 17. **Equipo donde se realizó el secado**



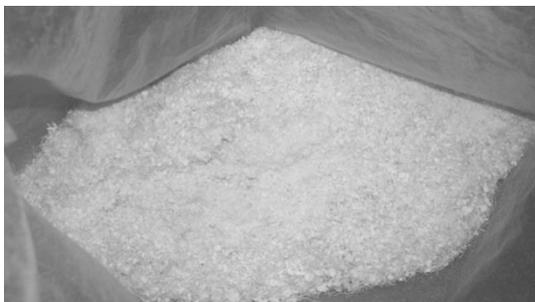
Fuente: Laboratorio de Química, edificio T-5, Facultad de Ingeniería, USAC.

Figura 18. **Equipo donde se realizó el tamizado**



Fuente: Laboratorio de Concretos, CII, edificio T-5, Facultad de Ingeniería, USAC.

Figura 19. **Partícula tamizada**



Fuente: Laboratorio de Química, edificio T-5,
Facultad de Ingeniería, USAC.

Figura 20. **Ataque con hidróxido de sodio**



Fuente: Laboratorio de Química, edificio T-5,
Facultad de Ingeniería, USAC.

Figura 21. **Ataque con hidróxido de sodio**



Fuente: Laboratorio de Química, edificio T-5,
Facultad de Ingeniería, USAC.

Figura 22. **Hidrólisis enzimática**



Fuente: Laboratorio de Química, edificio T-5,
Facultad de Ingeniería, USAC.

Figura 24. **Hidrólisis enzimática**



Fuente: Laboratorio de Química, edificio T-5,
Facultad de Ingeniería, USAC.

Figura 25. **Hidrólisis enzimática**



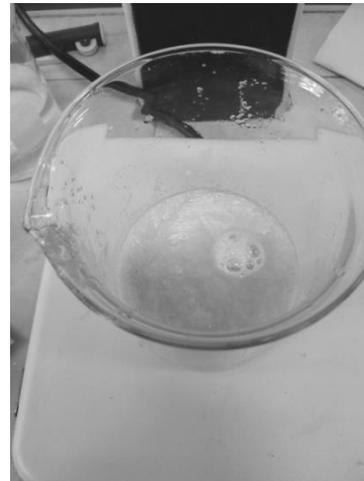
Fuente: Laboratorio de Química, edificio T-5,
Facultad de Ingeniería, USAC.

Figura 26. **Hidrólisis enzimática**



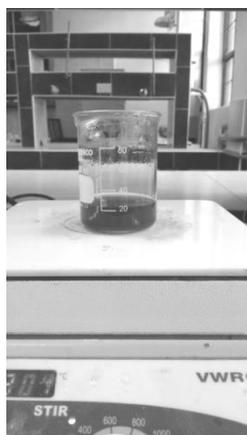
Fuente: Laboratorio de Química, edificio T-5,
Facultad de Ingeniería, USAC.

Figura 27. **Hidrólisis enzimática**



Fuente: Laboratorio de Química, edificio T-5,
Facultad de Ingeniería, USAC.

Figura 28. **Determinación de azúcares fermentables**



Fuente: Laboratorio de Química, edificio T-5, Facultad de Ingeniería, USAC.

Figura 29. **Determinación de azúcares fermentables**



Fuente: Laboratorio de Química, edificio T-5, Facultad de Ingeniería, USAC.

Figura 30. **Sistema de fermentación**



Fuente: Laboratorio de Química, edificio T-5, Facultad de Ingeniería, USAC.

Figura 31. **Burbuja de CO₂**



Fuente: Laboratorio de Química, edificio T-5, Facultad de Ingeniería, USAC.

Figura 32. **Sistema de destilación**



Fuente: Laboratorio de Química, edificio T-5,
Facultad de Ingeniería, USAC.

Figura 33. **Destilado**



Fuente: Laboratorio de Química, edificio T-5,
Facultad de Ingeniería, USAC.

Figura 34. **Destilado**



Fuente: Laboratorio de Química, edificio T-5,
Facultad de Ingeniería, USAC.

Tabla XLI. Tabla de densidades del manual de Ingeniero Químico, octava edición

TABLE 2-113 Densities of Mixtures of C₂H₅OH and H₂O at 20 °C

% alcohol by weight	g/mL										% alcohol by weight	g/mL									
	Tenths of %											Tenths of %									
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9		0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
0	0.99823	804	785	766	748	729	710	692	673	655	50	0.91384	361	339	317	295	272	250	228	206	183
1	636	618	599	581	562	544	525	507	489	471	51	160	138	116	093	071	049	026	004	*981	*959
2	453	435	417	399	381	363	345	327	310	292	52	0.90936	914	891	869	846	824	801	779	756	734
3	275	257	240	222	205	188	171	154	137	120	53	711	689	666	644	621	598	576	553	531	508
4	103	087	070	053	037	020	003	*987	*971	*954	54	485	463	440	417	395	372	349	327	304	281
5	0.98938	922	906	890	874	859	843	827	811	796	55	258	236	213	190	167	145	122	099	076	054
6	780	765	749	734	718	703	688	673	658	642	56	031	008	*982	*962	*939	*917	*894	*871	*848	*825
7	627	612	597	582	567	553	538	523	508	493	57	0.89803	780	757	734	711	688	665	643	620	597
8	478	463	449	434	419	404	389	374	360	345	58	574	551	528	505	482	459	436	413	390	367
9	331	316	301	287	273	258	244	229	215	201	59	344	321	298	275	252	229	206	183	160	137
10	187	172	158	144	130	117	103	089	075	061	60	113	090	067	044	021	*998	*975	*951	*928	*905
11	047	033	019	006	*992	*978	*964	*951	*937	*923	61	0.88852	859	836	812	789	766	743	720	696	673
12	0.97910	896	883	869	855	842	828	815	801	788	62	690	626	603	580	557	533	510	487	463	440
13	775	761	748	735	722	709	696	683	670	657	63	417	393	370	347	323	300	277	253	230	206
14	643	630	617	604	591	578	565	552	539	526	64	183	160	136	113	089	066	042	019	*995	*972
15	514	501	488	475	462	450	438	425	412	400	65	0.87948	925	901	878	854	831	807	784	760	737
16	387	374	361	349	336	323	310	297	284	272	66	713	689	666	642	619	595	572	548	524	501
17	259	246	233	220	207	194	181	168	155	142	67	477	454	430	406	383	359	336	312	288	265
18	129	116	103	089	076	063	050	037	024	010	68	241	218	194	170	147	123	099	075	052	028
19	0.96997	984	971	957	944	931	917	904	891	877	69	004	*981	*957	*933	*909	*885	*862	*838	*814	*790
20	864	850	837	823	810	796	783	769	756	742	70	0.86766	742	718	694	671	647	623	599	575	551
21	729	716	702	688	675	661	647	634	620	606	71	527	503	479	455	431	407	383	359	335	311
22	592	578	564	551	537	523	509	495	481	467	72	287	263	239	215	191	167	143	119	095	071
23	453	439	425	411	396	382	368	354	340	326	73	047	022	*968	*974	*980	*926	*902	*878	*854	*830
24	312	297	283	269	254	240	225	211	196	182	74	0.85806	781	757	733	709	685	661	636	612	588
25	168	153	139	124	109	094	080	065	050	035	75	564	540	515	491	467	443	419	394	370	346
26	020	005	*990	*975	*959	*944	*929	*914	*898	*883	76	322	297	273	249	225	200	176	152	128	103
27	0.95867	851	836	820	805	789	773	757	742	726	77	079	055	031	006	*982	*958	*933	*909	*884	*860
28	710	694	678	662	646	630	613	597	581	565	78	0.84835	811	787	762	738	713	689	664	640	615
29	548	532	516	499	483	466	450	433	416	400	79	590	566	541	517	492	467	443	418	393	369
30	382	365	349	332	315	298	281	264	247	230	80	344	319	294	270	245	220	196	171	146	121
31	212	195	178	161	143	126	108	091	074	056	81	096	072	047	022	*997	*972	*947	*923	*898	*873
32	038	020	003	*985	*967	*950	*932	*914	*896	*878	82	0.83848	823	798	773	748	723	698	674	649	624
33	0.94860	842	824	806	788	770	752	734	715	697	83	599	574	549	523	498	473	448	423	398	373
34	679	660	642	624	605	587	568	550	531	512	84	348	323	297	272	247	222	196	171	146	120
35	494	475	456	438	419	400	382	363	344	325	85	095	070	044	019	*994	*968	*943	*917	*892	*866
36	306	287	268	249	230	211	192	172	153	134	86	0.82840	815	789	763	738	712	686	660	635	609
37	114	095	075	056	036	017	*997	*978	*958	*939	87	583	557	531	505	479	453	427	401	375	349
38	0.93919	899	879	859	840	820	800	780	760	740	88	323	297	271	245	219	193	167	140	114	088
39	720	700	680	660	640	620	599	579	559	539	89	062	035	009	*983	*956	*930	*903	*877	*850	*824
40	518	498	478	458	437	417	396	376	356	335	90	0.81797	770	744	717	690	664	637	610	583	556
41	314	294	273	253	232	212	191	170	149	129	91	529	502	475	448	421	394	366	339	312	285
42	107	086	065	044	023	002	*981	*960	*939	*918	92	257	230	203	175	148	120	093	066	038	010
43	0.92897	876	855	834	812	791	770	749	728	707	93	0.80983	855	828	800	772	744	717	690	663	636
44	685	664	642	621	600	579	557	536	515	493	94	705	677	649	621	593	565	537	509	480	452
45	472	450	429	408	386	365	343	322	300	279	95	424	395	367	338	310	281	253	224	195	166
46	257	236	214	193	171	150	128	106	085	063	96	138	109	080	051	022	*993	*963	*934	*905	*875
47	041	019	*997	*976	*954	*932	*910	*889	*867	*845	97	0.79846	816	787	757	727	698	668	638	608	578
48	0.91823	801	780	758	736	714	692	670	648	626	98	547	517	487	456	426	396	366	335	305	274
49	604	582	560	538	516	494	472	450	428	406	99	243	213	182	151	120	089	059	028	*967	*966
											100	0.78934									

*Indicates change in the first two decimal places.



Facultad de Medicina Veterinaria y Zootecnia
Escuela de Zootecnia
Unidad de Alimentación Animal

Elaborado por: Aura Marina de Marroquín
Autorizado por: Lic. Miguel Ángel Rodenas

FORMULARIO BROMATO 7 INFORME DE RESULTADO DE ANÁLISIS



Edificio M6, 2º Nivel, Ciudad Universitaria zona 12
Ciudad de Cabaiguán
Teléfono: 24188307 Teléfono: 24188307 ext. 1676
E-mail: bromato2000@yahoo.es

Solicitado por: **SERGIO GARCÍA,** Dirección: **CASA U-21, CONDOMINIO STA CATARINA, Z. S.V.N.** No.018
Fecha de recibida la muestra: **22-01-2013,** Fecha de realización: **DEL 23 AL 25-01-2013.**

Reg.	Descripción de la muestra	BASE	Agua %	M.S.T. %	E.E. %	F.C. %	PROTEINA Cruda %	Cenizas %	E.L.N. %	Calcio %	Fósforo %	F.A.D. %	F.N.D. %	Lignina %	Dig. Pepsina %	Dig. K.O.H.	T.N.D.	E.B. Cal/g
34	CORAZON DE PIRA	SECA	88.46	11.54	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	19.26	26.44	9.59	.....	.....	.....	3.755
	COMO ALIMENTO	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....
	SECA	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....
	COMO ALIMENTO	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....
	SECA	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....
	COMO ALIMENTO	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....
	SECA	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....
	COMO ALIMENTO	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....

OBSERVACIONES: Dichos resultados fueron calculados en base a materia seca total y fresca. Se prohíbe la producción parcial o total de este informe, para mayor información comunicarse al teléfono 24188307.



Lic. Miguel Ángel Rodenas
Jefe Laboratorio de Bromatología

Resultados 2013/018
25/01/13

Figura 35. Análisis de laboratorio – Bromatología

