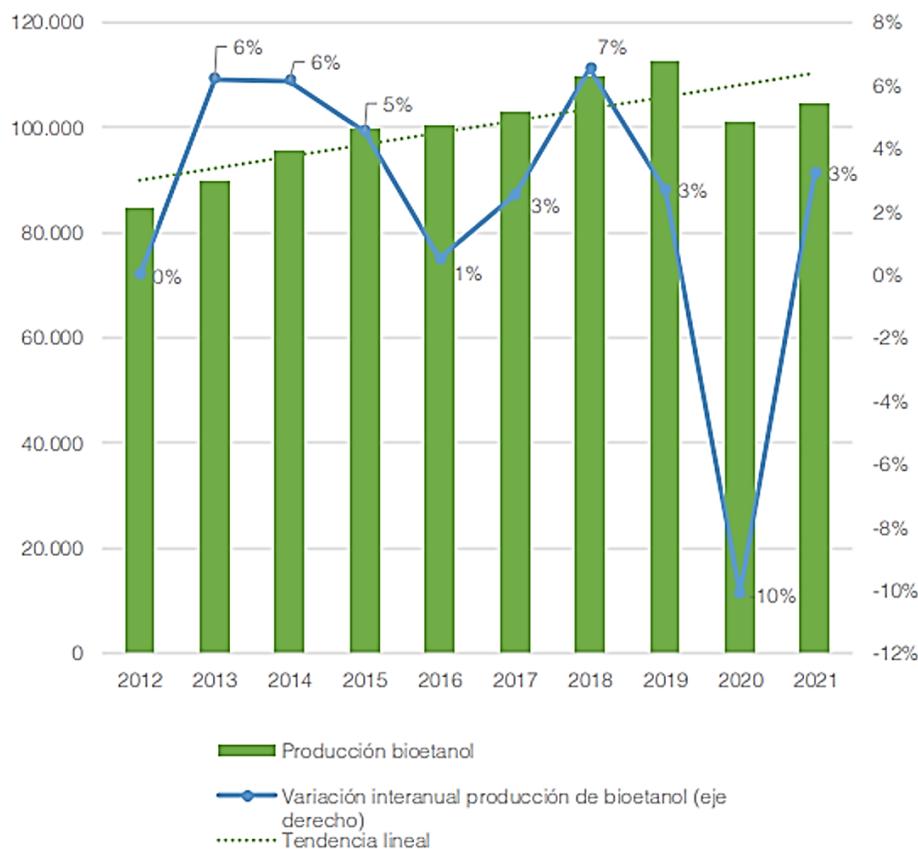


# **INTRODUCCIÓN**

## Antecedentes

El bioetanol es el biocombustible con mayor producción mundial, cuyo valor mostró un crecimiento acumulado de 23 % en la última década (2012-2021). En la figura 1 se observa la tendencia creciente de la producción, la cual en 2021 mostró un incremento de 3 %, ubicándose cerca de los 105.000.000 m<sup>3</sup>.

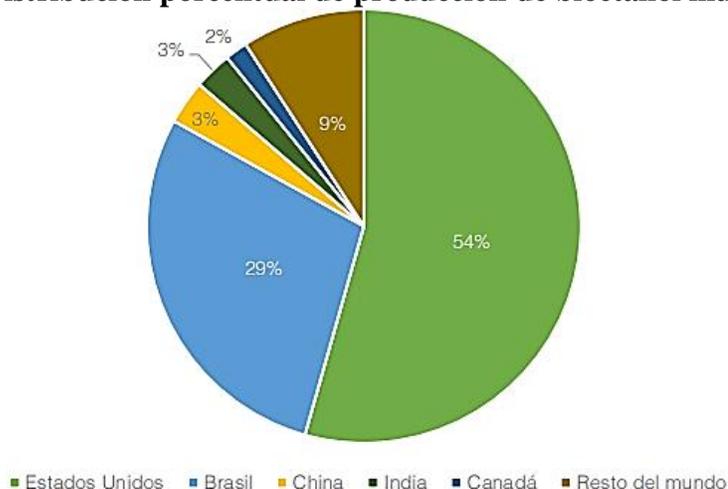
**Figura 1 Variación, tendencia y producción mundial (miles de m<sup>3</sup>) de bioetanol**



Fuente: (Torroba & Orozco, 2022)

Los cinco principales países productores de bioetanol son Estados Unidos, Brasil, China, India y Canadá. La respectiva distribución porcentual de la producción de bioetanol en el mundo el año 2021 se encuentra representada en la Figura 2:

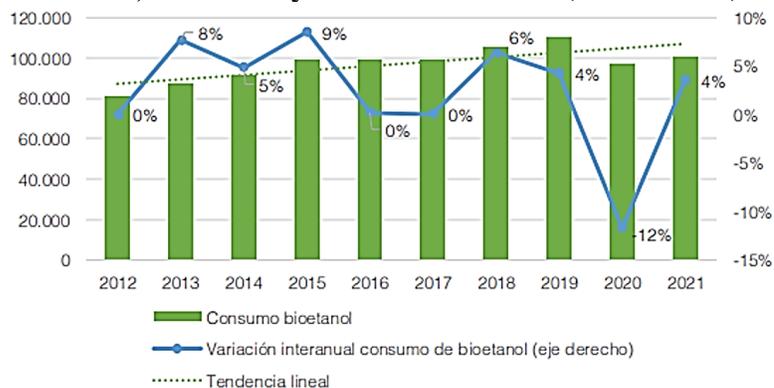
**Figura 2 Distribución porcentual de producción de bioetanol mundial 2021**



Fuente: (Torroba & Orozco, 2022)

Mientras tanto, el consumo mundial de bioetanol durante la última década (2012-2021) creció un 24 %. En el 2021 presentó un incremento interanual de 4 %, llegando a una cifra en torno a los 101.000.000 m<sup>3</sup>, tal como se aprecia en la figura 3:

**Figura 3 Variación, tendencia y consumo mundial (miles de m<sup>3</sup>) de bioetanol**



Fuente: (Torroba & Orozco, 2022)

El consumo de bioetanol se concentra principalmente en Estados Unidos, con el 53 % del total, y en Brasil, con el 28 %. Les siguen India (3 %), Canadá (3 %) y China (2 %). El 11 % restante se distribuye entre los demás países del mundo, con una participación destacada de Tailandia, Alemania, Francia, Reino Unido, Japón, y Argentina.

La actual crisis energética y ambiental del planeta, generada por el agotamiento de los combustibles fósiles y el incremento de la emisión de gases de efecto invernadero, ha inducido a la sociedad mundial a buscar otras opciones que permitan la sustitución gradual de las fuentes que proveen energía a la humanidad con base en el petróleo, diésel y gasolinas, por otras de menor impacto global y de mayor sostenibilidad general. (IBCE, 2008)

En la búsqueda de opciones, ha surgido la posibilidad de utilizar cultivos agrícolas ricos en azúcares, almidones, celulosa o aceites, para transformarlos en biocombustibles como ser el etanol o diésel. El bioetanol (alcohol etílico o alcohol carburante), cuya fórmula química es  $C_2H_5OH$ , se obtiene vía fermentativa utilizando diversas fuentes de origen vegetal. Ésta contiene azúcares no libres (almidones y celulosa principalmente) que son fermentados por distintos microorganismos para la obtención de bioetanol. Algunas de las principales materias primas para la producción de bioetanol según su clasificación se describen en la tabla 1. (Gracida & Pérez , 2014)

**Tabla 0-1 Materias primas para la producción de bioetanol**

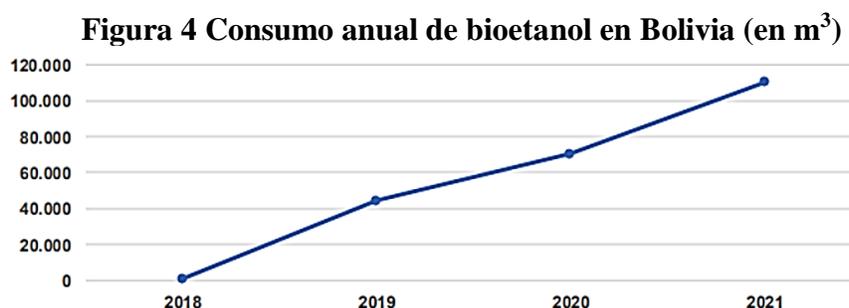
<b>Materias primas azucaradas</b>	<b>Materias primas amiláceas</b>	<b>Materias primas lignocelulósicas</b>
Caña de azúcar	Cereales	Restos vegetales
Remolacha azucarera	Tubérculos	Paja
Sorgo dulce		Restos forestales

Fuente: Los biocombustibles en Andalucía , 2015

Siguiendo la línea de biocombustibles en América Latina; en Bolivia se aprobó la Ley N° 1098 “Ley de Aditivos de Origen Vegetal”. El propósito de esta ley es establecer el marco regulatorio que permite la producción, el almacenamiento, el transporte, la comercialización y la mezcla de biocombustibles, con el objetivo de reemplazar gradualmente las importaciones y al mismo tiempo proteger la inocuidad alimentaria y la soberanía energética.

En la actualidad el porcentaje determinado por el Decreto Supremo N ° 3672 para la mezcla del Aditivo de Origen Vegetal Etanol Anhidro con Gasolina Base es del 12%

v/v. La producción anual de bioetanol en Bolivia se ha mantenido en niveles similares en los últimos cuatro años, con un leve incremento tanto para el 2020 como de manera positiva para el 2021, donde la producción casi alcanza los 200.000 m<sup>3</sup>. Mientras que la variación anual del consumo de bioetanol en Bolivia resultó ser de 56 % de 2020 a 2021 tal como se ilustra en la figura 4:



Fuente: (Torroba & Orozco, 2022)

En Bolivia la producción de bioetanol se realiza casi en su totalidad a partir de caña de azúcar y del sorgo siendo, así necesaria la investigación de otras materias primas alternativas. Debido a su elevado contenido de almidón a partir del cual se puede extraer azúcares reductores, la yuca se constituye como la materia prima de objeto de estudio del presente proyecto.

La yuca es un tubérculo rico en almidón, lo que las convierte en una fuente importante de energía alimentaria que se cultiva principalmente en las zonas tropicales de Bolivia. De acuerdo a las Estadísticas Agrícolas del Instituto Nacional de Estadísticas (INE), en la Tabla 2 se muestran los datos de producción de la yuca en Bolivia y Tarija durante la gestión 2020-2021.

**Tabla 0-2 Producción nacional y regional de yuca**

Producción Año Agrícola (t)		Rendimiento por Año Agrícola (kg/ha)		Superficie Cultivada (ha)	
Bolivia	Tarija	Bolivia	Tarija	Bolivia	Tarija
211.527	1.547	7.294	5.715	29.001	271

Fuente: INE, 2021

## **Objetivos**

### **Objetivo general**

Obtener bioetanol a escala laboratorio a partir de yuca producida en el departamento de Tarija.

### **Objetivos específicos**

- Realizar la caracterización fisicoquímica y microbiológica de la yuca como materia prima.
- Identificar y seleccionar el proceso más adecuado para la obtención experimental de bioetanol a partir de yuca.
- Desarrollar el diseño de investigación del proceso para establecer las condiciones de operación adecuadas en la hidrólisis, fermentación y destilación.
- Determinar las propiedades fisicoquímicas del bioetanol obtenido.
- Obtener y evaluar el rendimiento de producción del proceso empleado para la obtención de bioetanol.
- Efectuar un análisis de los resultados obtenidos.

## **Justificación**

### **Justificación económica**

Bolivia presenta grandes pérdidas económicas por la importación de gasolina y se pretende proporcionar una alternativa de materia prima para obtener bioetanol que posteriormente pueda ser utilizado como aditivo de la gasolina especial.

Así mismo, con el presente proyecto se busca sentar las bases que permitan el uso de la producción excedente de yuca e impulsar el crecimiento de cultivos de las materias primas alternativas para producir bioetanol a mayor escala.

### **Justificación ambiental**

La producción de biocombustibles representa una alternativa energética viable frente a la utilización de energía proveniente de combustible fósil. La principal ventaja del uso

del bioetanol como aditivo en la gasolina es que disminuye entre 6 y 10% la emisión del CO<sub>2</sub> con efecto invernadero, con respecto a la gasolina; y disminuye la emisión de monóxido de carbono, óxidos de sulfuro y óxidos de nitrógeno. También aumenta el índice de octano y permite eliminar los aditivos del plomo en los carburantes.

Por otro lado, la yuca es considerada como un cultivo rústico, debido a su alta capacidad de adaptación a suelos ácidos e infértiles, a su relativa resistencia a malezas y plagas y a su habilidad para resistir largos períodos de sequía.

### **Justificación social**

La producción de biocombustibles permite generar nuevos empleos que influyen positivamente en la sociedad. La agricultura se puede beneficiar gracias al desarrollo de la industria de la producción de biocombustibles y los productores de yuca pueden convertirse en proveedores de materia prima, con lo cual es posible incrementar sus fuentes de ingresos y estabilidad laboral, ayudando a reducir los problemas de desempleo y mejorando la calidad de vida de los agricultores.

### **Justificación tecnológica**

El bioetanol se produce tradicionalmente a partir de caña de azúcar y sorgo en Bolivia, por lo que es necesario evaluar el rendimiento del proceso de obtención de este biocombustible a partir de otros productos agrícolas disponibles en el Departamento de Tarija. El presente trabajo de investigación se enfoca en el estudio de la obtención de bioetanol a partir de una materia prima con elevado porcentaje de hidratos de carbono como lo es la yuca; mediante la aplicación de procesos tecnológicos que permiten obtener un mayor rendimiento en los procesos ya que garantiza la calidad de productos, eficiencia y reducción de tiempos de trabajo.

Las características fisicoquímicas y termodinámicas del bioetanol anhidro son determinantes para su uso como aditivo de la gasolina automotor al incrementar su octanaje, siendo necesario realizar una investigación experimental que permita optimizar el proceso de obtención de este biocombustible para incrementar volúmenes de producción.

**Justificación personal**

Mediante el presente proyecto de grado se hará posible la culminación de la etapa de estudio de la carrera de Ingeniería Química y obtener el título Académico de Licenciatura en Ingeniería Química.

Además de contribuir en mi formación dentro del área de medio ambiente, investigando el uso de alternativas energéticas renovables disponibles en nuestra región, debido a que es de mi interés personal el proceso de obtención de bioetanol a partir de una materia prima amilácea producida en el departamento de Tarija.

**CAPÍTULO I**  
**MARCO TEÓRICO**

## 1. Marco teórico

### 1.1. Bioetanol

#### 1.1.1. Definición de bioetanol

El bioetanol (alcohol etílico o alcohol carburante), cuya fórmula química es  $C_2H_5OH$ , se obtiene vía fermentativa utilizando diversas fuentes de origen vegetal. Ésta contiene azúcares no libres (almidones y celulosa principalmente) que son fermentados por distintos microorganismos para la obtención de bioetanol. Algunas de las principales materias primas para la producción de bioetanol son maíz, trigo, sorgo, remolacha azucarera, caña de azúcar, melaza, madera y residuos de podas entre otros. (Gracida & Pérez , 2014)

#### 1.1.2. Propiedades fisicoquímicas del bioetanol

En la Tabla I-1 que se observa a continuación, se muestran las características fisicoquímicas que hacen posible el uso del bioetanol como combustible.

**Tabla I- 1 Propiedades fisicoquímicas del bioetanol**

Parámetros	Unidades	Etanol
Fórmula	-	$CH_3-CH_2-OH$
Peso Molecular	kg/mol	46.07
Estado de agregación	-	Líquido
Oxígeno	% en peso	34.80
Densidad	kg/m <sup>3</sup>	789
Solubilidad en agua	% en volumen	100
Calor latente de vaporización	kJ/Kg	850
Temperatura de ebullición	°C	78
Temperatura de fusión	°C	-114
Poder calorífico inferior	kJ/Kg	26,700
Relación estequiométrica aire/combustible	-	9

Presión de vapor	kPa	15 - 17
Temperatura de ignición	°C	420
Acidez	pKa	15,9
Punto de inflamación	°C	13

Fuente: Nogueira, 2004

El alcohol hidratado con un contenido máximo de agua de 5% v/v se puede utilizar directamente en los motores de explosión convencionales que hayan sido debidamente adaptados para este combustible.

El alcohol anhidro con un contenido de agua que no supera el 0,5% v/v se puede utilizar en mezcla con la gasolina base, para incrementar el índice de octano y producir los denominados “supercarburantes sin plomo”, que reducen las emisiones de dióxido de carbono y monóxido de carbono.

### 1.1.3. Usos y aplicaciones del bioetanol

En los últimos años se han desarrollado una serie de vehículos capaces de funcionar tanto con gasolina como con etanol o una mezcla de ambos. Se denominan Flexible Fuel Vehicles (FFV). Estos automóviles disponen de un sensor que detecta la relación etanol/gasolina y en función de la mezcla ajustan la carburación del motor. La utilización del etanol modifica la mezcla de aire y combustible tratando de mantener la potencia y el consumo del automóvil en un valor óptimo. (García Camús & García Laborda, 2006)

El etanol, como combustible único, es utilizado principalmente en Brasil y Argentina. Su uso con temperaturas inferiores a 15°C puede dar lugar a problemas de encendido, para que esto no ocurra el método más común de solucionarlo es añadirle una pequeña parte de gasolina. La mezcla que se usa más ampliamente es el E85 que está compuesto de un 85% de etanol y un 15% de gasolina. (García Camús & García Laborda, 2006)

Otra alternativa para el uso del bioetanol como combustibles es transformarlo para su utilización en aditivo de la gasolina, en lugar de como su sustituto. Con la introducción de las gasolinas sin plomo, necesarias por el uso de catalizadores para la disminución

de las emisiones nocivas, se vio afectado el número de octano de la gasolina. Para recuperar el octanaje y reducir las emisiones contaminantes se añadieron aditivos oxigenantes tales como el metanol, etanol, tercbutil alcohol (TBA) o el metil-tercbutil éter (MTBE). (García Camús & García Laborda, 2006)

Las mezclas de bioetanol con gasolina se identifican con la letra “E”, seguida del número que indica el porcentaje del producto contenido por volumen en la mezcla del biocombustible. De manera que tenemos las mezclas conocidas como gasoholes, indicadas a continuación:

**Tabla I- 2 Principales mezclas del bioetanol**

<b>Denominación de la mezcla</b>	<b>Porcentaje contenido de gasolina y de bioetanol</b>	<b>Observaciones</b>
E5	5% de bioetanol con un 95% de gasolina.	Es la mezcla máxima autorizada por la regulación europea para ser vendida como gasolina normal.
E10	10% de bioetanol con 90% de gasolina.	Es la más utilizada en EEUU ya que hasta esta proporción los motores no requieren ninguna modificación.
E25	25% de bioetanol y 75% de gasolina.	Se utiliza en Brasil.
E85	85% de bioetanol y 15 % de gasolina.	Esta mezcla precisa modificación en los motores. Se usa en Estados Unidos y Brasil y en algunos países del norte de Europa.
Súper Etanol 92	88 % de gasolina base y 12 % de etanol anhidro.	Se aplica en Bolivia

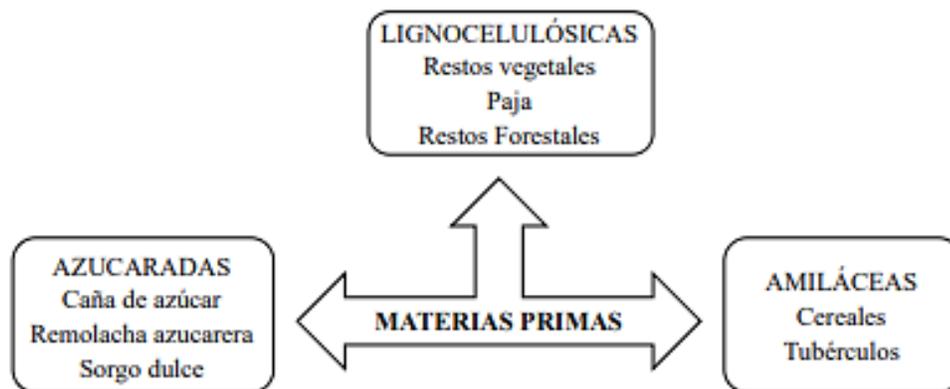
Gasolina Especial Plus (GE +).	92 % de gasolina base y 8 % de etanol anhidro.	Se aplica en Bolivia.
E95	95% de bioetanol y 5 de gasolina.	Se utiliza en flotas de autobuses de Suecia, Italia, Holanda y España.
E100	100% de bioetanol.	Se usa sobre todo en Brasil.
Etil ter-butyl éter (ETBE)	ETBE producido a partir del bioetanol, requiere 45% del mismo y 55% de isobutileno.	No se comercializa como un biocarburante sino como un aditivo de la gasolina. Es menos volátil y más miscible con la gasolina que el propio etanol.

Fuente: Elaboración propia, 2023

#### 1.1.4. Materias primas para la obtención de bioetanol

El bioetanol se obtiene a partir de biomasa de origen vegetal que contenga azúcares simples o algún compuesto que pueda convertirse en azúcares, como el almidón o la celulosa. Las especies vegetales a partir de las cuales se puede obtener el bioetanol son el maíz, trigo, sorgo, cebada, remolacha azucarera, caña de azúcar y otros.

**Figura 1- 1 Materias primas para la obtención de bioetanol**



Fuente: Los biocombustibles en Andalucía , 2015

### **1.1.5. Clasificación de materias primas**

#### ***1.1.5.1. Materias primas azucaradas***

Dentro de esta clasificación de materias primas se incluyen caña de azúcar, remolacha, melaza, jugos de fruta, etc. La preparación del mosto es muy parecida para todas ellas, ya que por su alto contenido de azúcares simples requieren poco o ningún tratamiento preliminar, sólo un método eficiente de extracción, una dilución en algunos casos y la inversión de la sacarosa cuando el biocatalizador así lo requiera. (Sánchez & Cardona , 2008)

#### ***1.1.5.2. Materias primas amiláceas***

En este grupo de materias primas se encuentran los cereales como el maíz, trigo, sorgo y cebada y así también los tubérculos como yuca, papa, etc. Se diferencian de las anteriores en que la preparación del mosto incluye una etapa previa de hidrólisis del almidón que permite dejar la glucosa disponible para el biocatalizador. (Sánchez & Cardona , 2008)

#### ***1.1.5.3. Materias primas lignocelulósicas***

Los materiales lignocelulósicos para la producción de etanol combustible pueden ser divididos en seis grupos principales: residuos de cultivos (bagazo de caña, rastrojo de maíz, paja de trigo, paja de arroz, cascarilla de arroz, cebada paja, bagazo de sorgo dulce, etc), madera dura (álamo temblón, álamo), madera blanda (pino, abeto), desechos de celulosa (papel de periódico, papel de oficina usado, papel reciclado lodo), biomasa herbácea (heno de alfalfa, pasto varilla, junco alpiste, bermuda costera, pasto timoteo) y residuos sólidos municipales (RSU). Por la estructura química de los polisacáridos, estas también requieren de una hidrólisis previa a la fermentación. Cuentan con la ventaja de que son las materias primas más abundantes y más baratas procedente de la biomasa, pero en contraposición poseen la desventaja de que como producto de la hidrólisis se obtienen azúcares no fermentables, que dificultan el proceso. (Sánchez & Cardona , 2008)

### 1.1.6. Normativa de características del Bioetanol en Bolivia

La Resolución Ministerial N°120-18 del 03 de octubre de 2018 reglamenta las características técnicas de calidad del Etanol Anhidro para su utilización como Aditivo de Origen Vegetal, las mismas se describen en la siguiente tabla:

**Tabla I- 3 Características técnicas de calidad del Etanol Anhidro**

<b>Característica</b>	<b>Unidad</b>	<b>Límite</b>
Aspecto	-	Claro y Libre de impurezas
Acidez total, máx.	mg/L	30
Conductividad eléctrica	µs/m	500
Densidad a 60°F	g/cm <sup>3</sup>	0,7968 máx.
Graduación Alcohólica	% vol	99,5 mín.
Contenido de Etanol, mín.	% vol	98
Contenido de Agua, máx.	% vol	0,5
Contenido de Metanol, máx	% vol	0,5
Cloruros	mg/kg	1
Sulfato, máx.	mg/kg	4
Cobre, máx.	mg/kg	0,07
Azufre, máx.	mg/kg	50

Fuente: (Resolución Ministerial N° 120-18, 2018)

## 1.2. Yuca

### 1.2.1. Taxonomía

La yuca (*Manihot esculenta* Crantz) pertenece a la clase Angiospermae, familia Euphorbiaceae, género Manihot. En la tabla I-3, se detalla la taxonomía de la yuca.

**Tabla I- 4 Taxonomía de la yuca**

<b>Ítem</b>	<b>Descripción</b>
Reino	Vegetal
Phylum	Teleomorphytae
División	Tracheophytae
Sub-División	Anthophyta
Clase	Angiospermae
Sub-Clase	Dicotyledoneae
Grado Evolutivo	Archichlamydeae
Grupo de Órdenes	Corolinos
Orden	Geraniales
Familia	Euphorbiaceae
Nombre científico	<i>Manihot esculenta</i> Crantz.
Nombre común	Yuca

Fuente: Herbario Universitario (T.B.), 2023

### **1.2.2. Descripción botánica**

La yuca es una especie de raíces amiláceas que se cultiva en zonas tropicales y subtropicales. A pesar de que es uno de los cultivos alimenticios más importantes de los países tropicales, fuera de ellos es muy poco conocida.

La yuca es miembro de la familia de las liláceas (euphorbiaceas) y del género de la *Manihot esculenta*. Es un arbusto que alcanza una altura entre los 90 y 150 centímetros,

tiene grandes hojas palmeadas y sus raíces son comestibles (las hojas se pueden usar como forraje). Las flores nacen en el extremo del tallo y su color varía de la púrpura al amarillo. (Velez, 2012)

La yuca se clasifica como "dulce" y "amarga", por el contenido de glucosato cianogénico (promotor de la formación de ácido cianhídrico) en las raíces. En las variedades de yuca amarga el ácido cianhídrico, veneno muy potente que interfiere la conducción de oxígeno a las células del organismo de quien las ingiere, se encuentra bajo la cáscara del tubérculo, en una capa de látex de aspecto viscoso, blanco azulado y con olor característico. Las variedades dulces registran muy baja o ninguna presencia del principio tóxico. (Velez, 2012)

La temperatura media ideal para su desarrollo oscila entre los 18 y los 35°C y la temperatura mínima que puede tolerar es de 10°C. Bajo estas condiciones puede desarrollarse en alturas hasta de 2.000 msnm. Además, es resistente a las sequías durante estas épocas la planta pierde las hojas para así conservar el agua en las raíces, las hojas rápidamente crecen de nuevo, cuando se reinician las lluvias. (Velez, 2012)

### 1.2.3. Composición química y valor nutricional de la yuca

Las raíces de la yuca tienen un aproximado de 30 a 40% de materia seca, una proporción más alta que la de otras raíces y tubérculos. El almidón y los azúcares son los componentes predominantes (aproximadamente un 90%) de la materia seca siendo el almidón mucho más importante. La energía metabolizable de la yuca seca es de 3500 a 4000 kcal/g, es similar a la de la harina de maíz. (Cock, 1989)

**Tabla I- 5 Composición química de la raíz de yuca**

<b>Componentes de Raíz</b>	<b>Contenido</b>	<b>Raíz</b>	<b>Harina</b>
<b>Energía</b>	1460 kcal/kg	162 kcal/100	335 kcal/100
<b>Humedad</b>	66%	58,9%	14,3%
<b>Carbohidratos</b>	30,7%	39,3%	80,9%

<b>Proteínas</b>	1,2%	0,8%	1,7%
<b>Grasa</b>	0,2%	0,2%	0,5%
<b>Fibra</b>	3,1%	1,1%	1,8%
<b>Ceniza</b>	1,9%	0,8%	2,6%

Fuente: Ospina & Ceballos, 2002

### 1.3. Almidón

El almidón es un carbohidrato de reserva de los vegetales, se obtiene comercialmente de los granos de cereales, de las raíces y de los tubérculos. Es una materia prima con un amplio campo de aplicaciones, que van desde la impartición de textura y consistencia en alimentos, hasta la manufactura del papel, adhesivos y empaques biodegradables. (Rios & Zelada, 2017)

El almidón o fécula es un polisacárido homogéneo formado por la mezcla de dos polisacáridos diferentes: amilosa y amilopectina, que constituye aproximadamente el 25 % en peso de polímeros de glucosa lineal (amilosa) y el 75 % de polímeros de glucosa ramificada (amilopectina). (Ellis, y otros, 1998)

#### 1.3.1. Composición del almidón

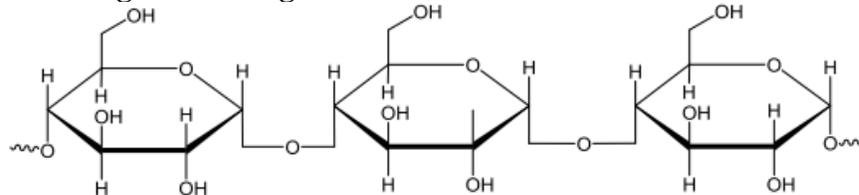
El almidón está constituido por dos tipos de polisacáridos muy similares amilosa y amilopectina, y ambas partes están conectadas por uniones glucosídicas.

- a) La amilosa, es un polímero lineal de unidades de glucosa unidas por enlaces  $\alpha$  (1-4), en el cual algunos enlaces  $\alpha$  (1-6) pueden estar presentes, esta molécula no es soluble en agua. Tiene pesos moleculares de hasta un millón y puede adquirir una conformación tridimensional helicoidal, en la que cada vuelta de hélice consta de seis moléculas de glucosa. Sin embargo, debido a su linealidad, los polímeros de la amilosa tienden a agruparse muy estrechamente en forma paralela mediante la formación de puentes de hidrógeno entre los hidroxilos de

los polímeros adyacentes reduciendo así su afinidad por el agua. (Rutenberg & Solarek, 1984)

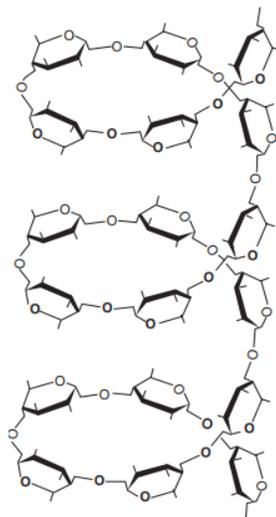
En general, la estructura lineal de la amilosa favorece la formación de películas fuertes. Este fenómeno de asociación intermolecular entre las moléculas de amilosa es comúnmente llamado retrogradación. (Kuakpetoon & Wang, 2006)

**Figura 1- 2 Segmento de la estructura de la amilosa**



Fuente: Meneses, Corrales, & Valencia , 2007

**Figura 1- 3 Enrollamiento helicoidal de la amilosa**



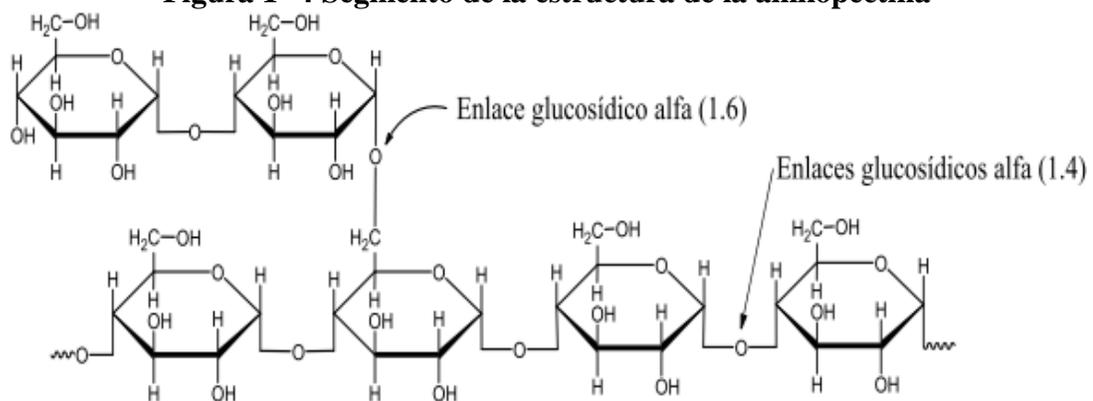
Fuente: Dergal, 2006

- b)** La amilopectina es el componente mayoritario en el almidón con un porcentaje de 70 a 80 aunque en ocasiones puede estar presente en proporciones hasta del 98%, los cuales son conocidos como almidón ceroso. La amilopectina es un polisacárido de cadena ramificada compuesto por unidades de glucosa unidas principalmente por enlaces  $\alpha$ -1,4- glucosídicos, pero con enlaces ocasionales  $\alpha$ -1,6-glucosídicos, que son responsables de la ramificación. Las ramificaciones se localizan aproximadamente a cada 15-25 unidades de glucosa, las cuales

tienen una mayor tendencia de interactuar entre ellas y formar dobles hélices. (Carvalho, 2008)

La amilopectina es parcialmente soluble en agua caliente, y por lo tanto puede formar complejos. Sin embargo, contiene partes lineales cortas, lo que ocasiona la formación de hélices cortas permitiendo únicamente envolver moléculas pequeñas dentro de ellas como el yodo, mientras que en el caso de ácidos grasos esto no es posible. (Gutiérrez E. , 2020)

**Figura 1- 4 Segmento de la estructura de la amilopectina**



Fuente: Meneses, Corrales, & Valencia , 2007

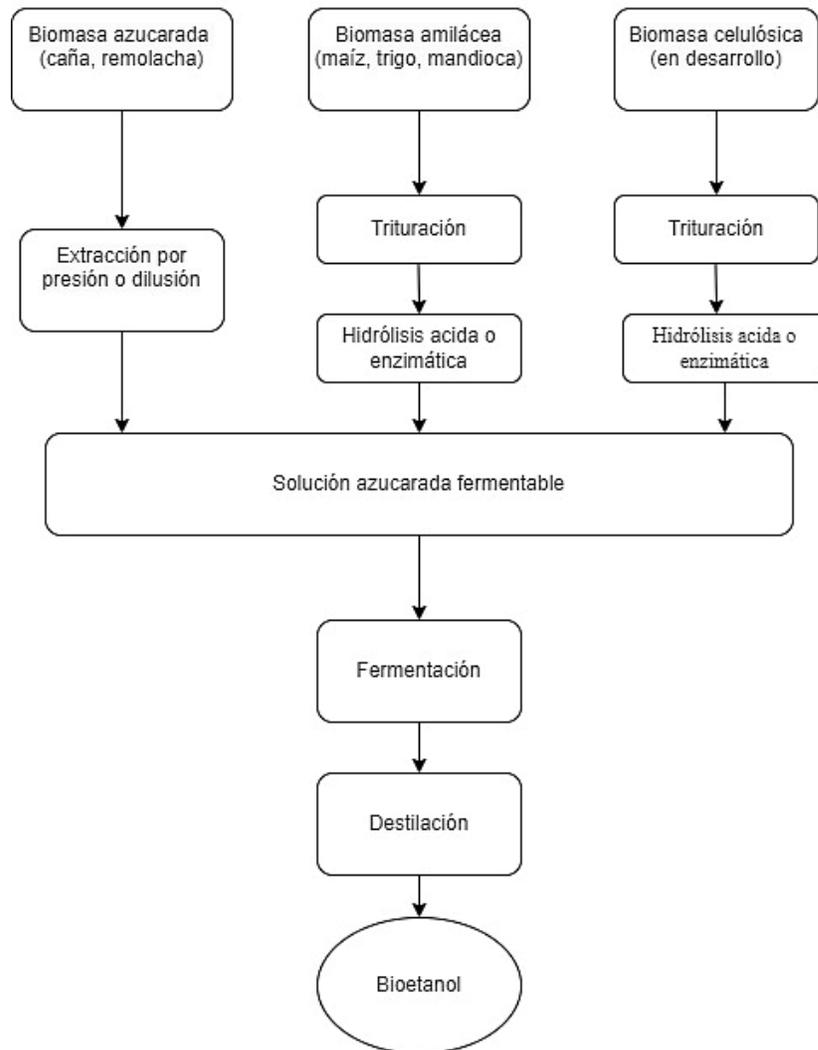
## 1.4. Proceso de obtención de bioetanol

### 1.4.1. Tipos de procesos

El proceso productivo del bioetanol depende de la materia prima utilizada. Cuando se recurra a las biomásas sacaríferas, se procederá a la extracción de los azúcares de los tejidos vegetales, la fermentación del extracto zucarino, la destilación y la deshidratación del bioetanol. Si se emplean materias primas amiláceas, la fase de fermentación será sustituida por la molienda de los granos y por la hidrólisis del almidón.

El siguiente gráfico muestra las fases necesarias para la conversión a etanol a partir de diferentes materias primas. Las secciones se diferencian en la primera fase del proceso, pero coinciden en las últimas: fermentación, destilación y deshidratación.

**Figura 1- 5 Rutas tecnológicas para la producción de bioetanol**

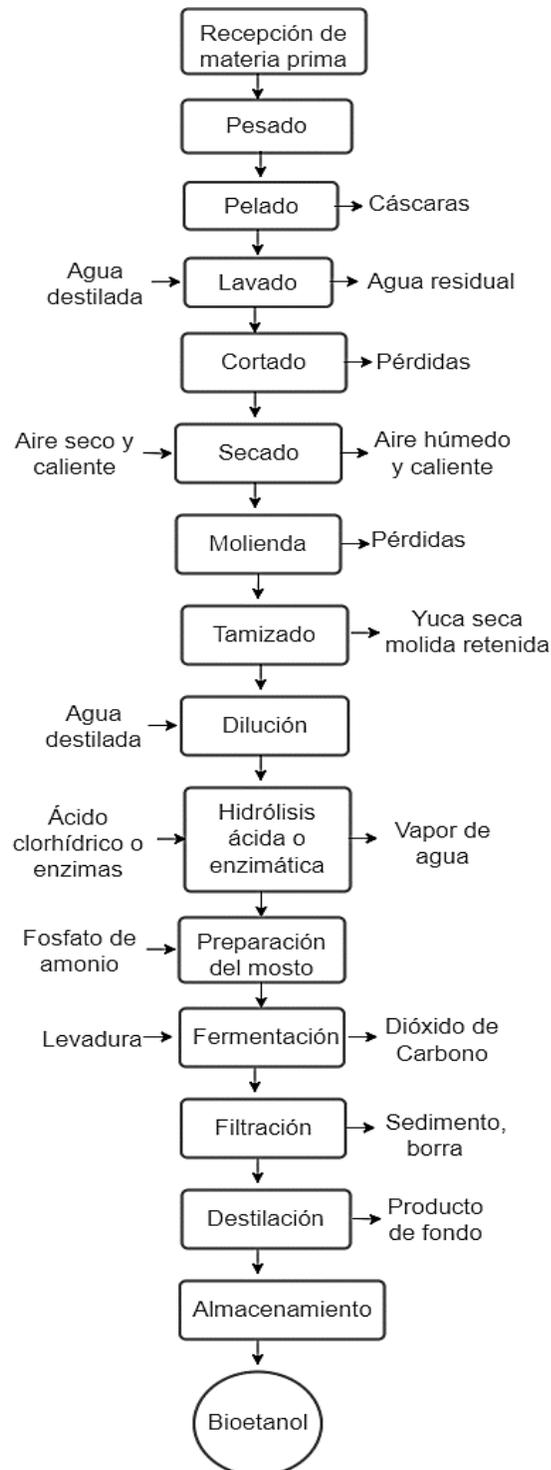


Fuente: CGEE, 2008

#### 1.4.2. Diagrama de flujo del proceso

En la Figura 1-6 que se encuentra a continuación, se observa el diagrama de flujo del proceso de obtención de bioetanol a partir de yuca:

**Figura 1- 6 Diagrama de flujo del proceso de obtención de bioetanol a partir de yuca**



Fuente: Elaboración propia, 2023

### **1.4.3. Etapas del proceso**

#### **1.4.3.1. Hidrólisis del almidón.**

Con el objetivo de producir azúcares fermentables (de menor peso molecular) por acción de microorganismos o digestión ácido, se somete a hidrólisis almidón. Esta reacción consiste en un desdoblamiento del almidón, propiciado, por exceso de agua o por una pequeña cantidad de enzima o ácido. (AGRONET, 2006)

De acuerdo con la bibliografía existen dos tipos de hidrolisis las cuales son Hidrólisis ácida e Hidrólisis enzimática.

##### ***1.4.3.1.1. Hidrólisis ácida***

El almidón es tratado con ácidos, se rompe en cadenas cortas de dextrina. El grado de degradación depende de la concentración del ácido, la temperatura, y el tiempo de hidrólisis. A medida que actúa el ácido, el peso molecular y la viscosidad de los productos decrecen y el poder reductor aumenta. (Fermema , 2000)

Los ácidos más utilizados en la producción de dextrinas son el ácido clorhídrico y el ácido nítrico. Si hervimos el almidón con ácido Clorhídrico 1N durante 1 hora, el almidón se rompe totalmente y se reduce a glucosa; esta reacción es conocida como hidrólisis intensa. (Fermema , 2000)

Los productos de degradación son principalmente el hidroximetilfurfural, el ácido levulónico, y el ácido fórmico, que da al jarabe un sabor amargo. La recombinación de unidades de D-glucosa o de esta con fragmentos como maltosas, conducen a la formación de productos de reversión los cuales pueden ser hidrolizados, un ejemplo de estos productos en la Genciobiosa. Mediante este procedimiento se logra el desdoblamiento de las moléculas de almidón por la acción de ácido sulfúrico o ácido clorhídrico diluidos. La clase de ácido, su concentración, la cantidad empleada referida a la cantidad de almidón, así como la presión y la temperatura ejercen gran influencia en la duración de la sacarificación. Por lo general, la cantidad de ácido empleado es tal que el valor de pH se ajuste a 1.5 para una solución al 33% de almidón. El agua utilizada, debe ser lo más pura posible y libre de hierro, ya que el ácido fosfórico que

existe en el almidón forma después de neutralizarse fosfatos de hierro insolubles, finamente dividido, quedando en suspensión en el jarabe y es muy difícil su separación por filtración. (Fermema , 2000)

#### **1.4.3.1.2. Hidrólisis enzimática**

La hidrólisis enzimática tiene por objeto la transformación del almidón de las materias primas amiláceas en azúcares. Dicha transformación es catalizada por enzimas  $\alpha$ -amilasa y glucoamilasa; cuya función es romper las moléculas de almidón, catalizando la ruptura de enlaces  $\alpha$ -(1,4) y  $\alpha$ -(1,6) respectivamente. (Espinoza , 2015)

Una enzima es una proteína que actúa como catalizador biológico, llevando a cabo reacciones bioquímicas a muy altas velocidades, no se consume durante la reacción y en general presenta un elevado grado de especificidad. (Badui, 2006)

Las enzimas más utilizadas para la hidrólisis enzimática son las siguientes:

**a) Amilasa:** Se encuentran ampliamente distribuidas en la naturaleza, son las enzimas responsables de la degradación del almidón, hidrolizan los enlaces glucosídicos  $\alpha$  1-4. Las amilasas se pueden dividir en tres grupos:  $\alpha$  amilasas, las cuales rompen al azar enlaces  $\alpha$  1-4 glucosídicos presentes en la parte interior del sustrato o de la cadena de amilasa y amilopectina (Endo amilasas);  $\beta$  amilasas o examilasas, que rompen enlaces  $\alpha$  1-4 y enlaces  $\alpha$ 1-6 glucosídicos ordenadamente a partir de los extremos no reductores del sustrato. (Sanchez, 2022)

La alfa amilasa (Alfa 1,4-D-glucano glucanohidrolasa), hidroliza los enlaces glucosídicos  $\alpha$ -1,4 de los polisacáridos que poseen 3 o más unidades D-glucosa en unión  $\alpha$ -1,4. El ataque se hace en forma no selectiva (tipo endoenzima) sobre varios puntos de la cadena simultáneamente, aunque los primeros productos de la hidrólisis son siempre oligosacáridos de 5-7 unidades de glucosa, o un número múltiplo. La alfa amilasa no actúa como catalizador en la hidrólisis de los enlaces  $\alpha$ -1,6 glucosídicos, tampoco en los segmentos del polímero que forman dobles hélices. Las condiciones de pH y temperatura que esta enzima tiene su mayor

actividad, así como la composición específica y el peso molecular, tienen ciertas variaciones que dependen de la fuente de donde se haya extraído dicha enzima. La estabilidad y la actividad que los iones de calcio le generan a la alfa amilasa, es un fenómeno estudiado ampliamente. Estos iones pueden provenir de sales como acetato de calcio, sulfato de calcio y cloruro de calcio, siendo esta última sal, la más comúnmente usada. La estabilidad como la actividad de la enzima, se afecta rápidamente cuando el pH es igual o menor a 3.0 y, sufre una desactivación irreversible por tratamientos a pH menor o igual a 2. Los máximos niveles de actividad de esta enzima se realizan a un pH entre 4.5 a 6.9. (Sanchez, 2022)

Las  $\beta$ -amilasas son exo-enzimas, que catalizan los enlaces  $\alpha$ -1,4 alternos de los extremos no reductores del almidón, causando la inversión de la configuración anomérica de la maltosa generada de alfa a beta, además esta enzima es incapaz de hidrolizar los enlaces  $\alpha$ -1,6 de la amilopectina por lo que la degradación de estos sustratos es incompleta, produciendo entre un 50–60% de  $\beta$ -maltosa y  $\beta$ -dextrina limitante. (Kavanagh, 2011)

**b) Amiloglucosidasa (AMG):** Es una exo hidrolasa también conocida como glucoamilasa, que hidroliza los enlaces glucosídicos  $\alpha$ -1,4 y  $\alpha$ -1,6 de la amilosa y la amilopectina, separando unidades de glucosa a partir del extremo no reductor de la cadena. Debido al bajo grado de especificidad de esta enzima, puede ser usada para catalizar la hidrólisis de los enlaces  $\alpha$ -1,4 y  $\alpha$ -1,6 glucosídicos. La velocidad de hidrólisis del almidón catalizado por esta enzima, se incrementa en proporción directa con el peso molecular del sustrato. Las fuentes más comunes para extraer esta enzima son de órganos de animales, bacterias y de origen fúngico. La enzima presenta rangos de trabajo de pH que pueden variar entre 2.94 y 6.98, y a temperaturas que varían entre 15 y 70 °C. Esta enzima requiere de la acción anticipada de la alfa amilasa, para poder catalizar con mayor eficiencia la hidrólisis de los enlaces  $\alpha$ -1,4 y  $\alpha$ -1,6 glucosídicos y así producir jarabes de D-glucosa a gran escala. Cuando se hidroliza el almidón con glucoamilasa como catalizador, los

polímeros que contienen enlaces  $\alpha$ -1,4 glucosídicos, se hidrolizan más rápidamente que los polímeros que contienen enlaces  $\alpha$ -1,6 glucosídicos. (Sanchez, 2022)

Los pasos o etapas para la hidrólisis del almidón se describen a continuación:

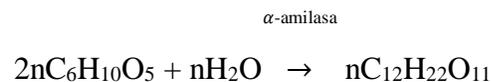
- a) Gelatinización:** Es un proceso que se da en presencia de agua en el cual, se pasa de un estado ordenado (estructura cristalina) a un estado desordenado en el que se absorbe calor; es decir, la gelatinización transforma a los gránulos insolubles del almidón, en una solución de sus moléculas constituyentes (amilosa y amilopectina) en forma individual. Entre los factores que determinan el proceso de gelatinización e hinchamiento de los gránulos destacan la relación y el contenido de amilosa y amilopectina, su grado de polimerización, así como el tamaño del gránulo de almidón y el contenido de fósforo. (Biliaderis, 1991); (Tester & Karkalas, 2001)

De acuerdo a Biliaderis (1991), son tres procesos que constituyen el fenómeno de la gelatinización; estos son eventos fuera del equilibrio que a su vez resultan en el fenómeno meta-estable de gelatinización y son: difusión del agua dentro de los gránulos de almidón, fusión de la estructura del gránulo de almidón, caracterizado por una transición hélice-enrollamiento al azar que es facilitada por la hidratación, y por último el hinchamiento del gránulo como resultado de la desintegración de las zonas cristalinas.

Si se observa a partir de la temperatura, tenemos las tres siguientes etapas: la temperatura de iniciación (primera observación de la pérdida de birrefringencia), la temperatura media, la temperatura final de la pérdida de birrefringencia, lo cual está directamente relacionado con el intervalo de temperatura y se lleva a cabo el fenómeno de gelatinización.

El grado de gelatinización es un parámetro importante que se ve afectado por la temperatura, la presión, la concentración de almidón y el tiempo de tratamiento. La viscosidad suele ser menor después del tratamiento con calor, debido a que los gránulos de almidón se mantienen intactos en su mayoría, y la amilosa solubiliza pobremente. (Rios & Zelada, 2017)

**b) Licuefacción:** El objetivo es convertir los gránulos de almidón de la suspensión concentrada, a dextrinas solubles de baja viscosidad con un adecuado manejo y equipo para la fácil conversión de glucosa por la glucoamilasa. La temperatura a la cual debe ser calentada la solución para la licuefacción depende de la fuente de la enzima. Generalmente es una temperatura superior a 94 °C y por ser resistente al calor puede ser usada a mayores temperaturas por cortos períodos. La enzima comúnmente utilizada es la alfa-amilasa. Las bacterias alfa-amilasa específicamente catalizan la hidrólisis de  $\alpha$ -1,4 enlaces glucosídicos y actúan de una manera aleatoria pero reproducible para reducir el peso molecular de los polisacáridos. (Whistler & Paschall, 1984)



Almidón + Agua  $\rightarrow$  Maltosa

La licuefacción enzimática requiere un cuidadoso control de los parámetros de la reacción tales como porcentaje de sólidos, temperatura, tiempo, pH, y niveles de calcio para garantizar una hidrólisis eficiente y minimizar costos de enzimas.

**c) Sacarificación:** El objetivo de este proceso es convertir la solución de la etapa de la licuefacción a Glucosa en rendimientos muy altos como sea posible. La glucoamilasa interviene como catalizador en la hidrólisis de enlaces  $\alpha$ -(1,6) glucosídicos de las cadenas poliméricas del almidón. Esta enzima hidroliza las cadenas de azúcares largos dextrinas, triosas y maltosas hasta obtener glucosa. Las condiciones de pH y temperatura en donde la enzima tiene su mayor rango de efectividad, así como la composición específica y el peso molecular tienen ciertas variaciones que dependen de la fuente de donde se extrajo la enzima. (Almeida, 2017)

amiloglucosidasa



Maltosa + Agua → Glucosa

Se adiciona la enzima generalmente glucoamilasa. “En una concentración de la enzima de 0.8 a 1.5 g/kg de sustrato. Los parámetros recomendables son un pH entre 4 y 6 y a una temperatura entre 50°C y 65°C en un tiempo entre 90 y 120 minutos de reacción.” (Almeida, 2017)

Los factores que afectan la velocidad de las reacciones enzimáticas son los siguientes:

**a) Efecto del pH:** los cambios del pH afectan de manera notable el carácter iónico de los grupos amino y carboxílico de las enzimas, lo que a su vez modifica marcadamente el sitio catalítico y en general su conformación. Los valores bajos o altos de pH además de producir efectos puramente iónicos, pueden determinar desnaturalización, consideración que también conduce a la inactivación enzimática. (Braverman, 1980)

**b) Efecto de la temperatura:** las reacciones enzimáticas son sensibles a los cambios de temperatura. Sin embargo, el exceso de temperatura desnaturaliza las enzimas, por lo que disminuye su concentración efectiva y por lo tanto la velocidad de la reacción. (Braverman, 1980)

Hasta determinada temperatura el efecto predominante corresponde a un incremento en la velocidad de la reacción. Sobre esa temperatura el proceso opuesto (desnaturalización térmica) adquiere cada vez más importancia hasta que este se acelera y destruye la función catalítica enzimática. (Braverman, 1980)

**c) Concentración del sustrato:** una enzima funciona de manera más eficiente cuando la concentración de sustrato está en exceso en relación con la concentración de enzima. Esto se debe a que las colisiones “exitosas” con el

reactivo son más frecuentes, asegurando así que la mayor cantidad de enzima se encuentre activa. En estas condiciones, el producto se obtiene a la máxima velocidad posible para la cantidad de enzima presente. En caso de que la concentración de sustrato sea menor, la velocidad de reacción disminuye generalmente de acuerdo con un comportamiento. (Badui, 2006)

**d) Efecto de otros agentes:** los iones de metales pesados, como mercurio, plata y plomo, generalmente inhiben la acción enzimática, mientras que varios cationes y aniones actúan como activadores; tal es el caso de los cationes de calcio, magnesio, cobre, cobalto, sodio, níquel, potasio, manganeso, hierro y cinc, así como aniones de cloro, bromo, yodo. Para cada enzima, deberá analizarse la necesidad de alguna de estas especies, o bien, el daño que pudieran ocasionar. El efecto activador se debe a que: en ocasiones forman parte del sitio activo, se requieren para la interacción de la enzima con el sustrato o ayudan a mantener la conformación tridimensional, interactuando con alguna región de la enzima. (Badui, 2006)

#### **1.4.3.2. Fermentación**

La fermentación alcohólica es el proceso a través del cual los azúcares contenidos en el mosto o medio de cultivo se convierten en alcohol etílico y gas carbónico (CO<sub>2</sub>) en un medio anaerobio y por la acción de la levadura, con la presencia de nutrientes, temperatura, pH y acidez óptima de manera que la levadura pueda actuar correctamente sobre los azúcares y la fermentación para obtener un rendimiento esperado. (Pari, 2013)

El proceso simplificado de la fermentación alcohólica es el siguiente:



##### **1.4.3.2.1. Levadura *Saccharomyces cerevisiae***

Estos microorganismos tienen una forma redondeada y tienen un núcleo diferenciado (eucariota). Estas levaduras son haploides y se reproducen asexualmente entre una y dos horas. Pueden vivir en condiciones aerobias o anaerobias. En el proceso de

fermentación es importante un medio muy rico en azúcares (como la D-glucosa), en un medio donde no existen nutrientes no se podrá lograr mayor ganancia energética, y no se realizará la fermentación. (Almeida, 2017)

#### **1.4.3.2.2. Hidrólisis y fermentación independiente (HFI)**

En el proceso HFI el pretratamiento, la hidrólisis enzimática y la fermentación se realizan en pasos separados. La ventaja primaria de este enfoque al separar cada etapa del proceso se evitan las interacciones indeseadas. Usar reactores separados permite que cada paso se lleve a cabo en sus temperaturas óptimas: 40-50°C para la hidrólisis enzimática y 30°C para la fermentación. La desventaja de este método es la inhibición de las enzimas celulasa y  $\beta$ -glucosidasa por la glucosa liberada durante la hidrólisis, lo que hace necesario disminuir la carga de sólidos y aumentar la carga enzimática para alcanzar rendimientos razonables. Bajos rendimientos de azúcar resultan en concentraciones bajas de etanol y, por lo tanto, incremento en el costo de la fermentación y recuperación de etanol. (Silverstein, Chen , Sharma-shivappa, Boyette, & Osborne, 2007)

#### **1.4.3.2.3. Sacarificación y fermentación simultánea (SFS)**

El proceso de sacarificación y fermentación simultáneas (SFS) ha sido estudiado e implementado con el fin de reducir los efectos inhibitorios de los productos finales de la hidrólisis. Los azúcares reductores producidos en la hidrólisis de la celulosa son fermentados a etanol simultáneamente, lo cual reduce en gran medida los productos de inhibición. La hidrólisis es la etapa limitante del proceso ya que las temperaturas óptimas no son las mismas para el desarrollo del microorganismo. Con el fin de evitar esto se utilizan cepas termo tolerantes. (Ballesteros , Oliva, Negro, Manzanares, & Ballesteros, 2002)

En comparación con la hidrolisis y fermentación en dos etapas, la SFS incrementa la velocidad de hidrólisis mediante la conversión de azúcares que inhiben la actividad de las celulasas, también disminuyen los requerimientos de estas, menores tiempos de proceso y menor volumen del reactor (Sun & Cheng, 2002). En cuanto a las desventajas

en este proceso, hay incompatibilidad de temperaturas y pH entre hidrólisis y fermentación, la tolerancia de algunos microorganismos al etanol y la inhibición de las enzimas por éste.

#### **1.4.3.2.4. Hidrólisis y co-fermentación simultáneas (HCS)**

En este proceso las pentosas provenientes de la hemicelulosa son fermentadas, al mismo tiempo en que se llevan a cabo la hidrólisis de la celulosa y fermentación de las hexosas obtenidas a etanol. (Decker et al., 2007)

#### **1.4.3.2.5. Mecanismo de fermentación**

El sustrato fermentable en una fermentación actúa como donador y como aceptor de electrones; no todos los compuestos se pueden fermentar, pero los azúcares, especialmente las hexosas, como la glucosa, son sustratos fermentables excelentes. La fermentación de la glucosa a través de la ruta glucolítica se puede dividir en tres etapas, cada una de ellas con reacciones enzimáticas independientes. La etapa I consiste en reacciones «preparatorias»; no son reacciones redox y no liberan energía, pero en cambio forman un intermediario clave de la ruta. En la etapa II se producen reacciones redox, se conserva la energía y se forman dos moléculas de piruvato. En la etapa III se consigue un equilibrio redox y se forman los productos de la fermentación. (Madigan, Martinko, Bender, Buckley, & Stahl, 2004)

#### **Etapa I: Reacciones preparatorias**

En la etapa I, la glucosa es fosforilada por el ATP para dar glucosa-6-fosfato, que después se isomeriza a fructosa-6-fosfato, y una segunda fosforilación produce fructosa-1,6-bisfosfato. La aldolasa después escinde la fructosa-1,6-bisfosfato en dos moléculas de 3 carbonos, gliceraldehido-3-fosfato y su isómero, dihidroxiacetona-fosfato, que se interconvierte en gliceraldehido-3-fosfato. Hasta este momento, todas las reacciones, incluidas las que consumen ATP, han tenido lugar sin ningún intercambio redox. (Madigan, Martinko, Bender, Buckley, & Stahl, 2004)

**a) Etapa II: Producción de NADH, ATP y piruvato**

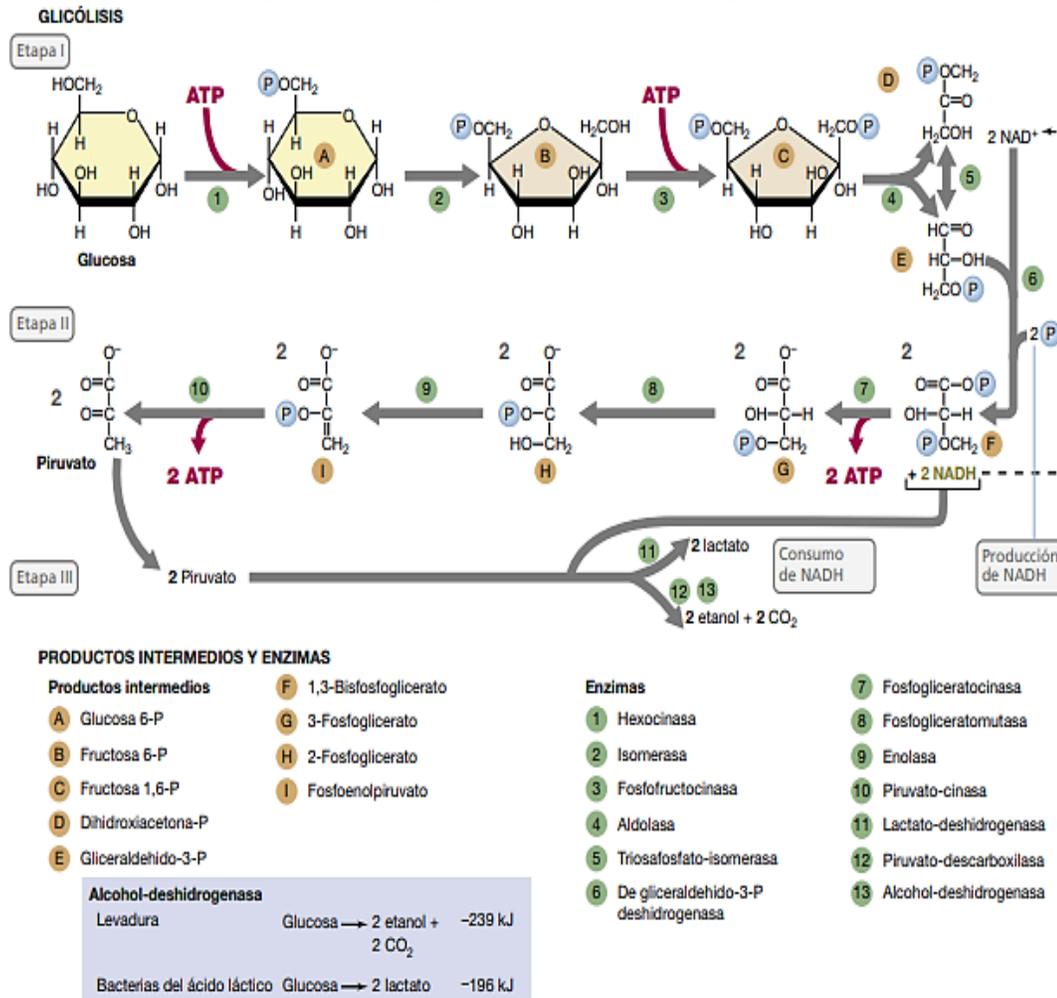
La primera reacción redox del glicólisis se produce en la etapa II, durante la oxidación del gliceraldehido-3-fosfato a ácido 1,3-bisfosfoglicérico. En esta reacción (que se lleva a cabo dos veces, una por cada molécula de gliceraldehido-3-fosfato producido a partir de la glucosa), la enzima de gliceraldehido-3-fosfato deshidrogenasa reduce su coenzima  $\text{NAD}^+$  a NADH. Simultáneamente, cada molécula de gliceraldehido-3-fosfato es fosforilada por la acción de una molécula de fosfato inorgánico se convierte en orgánico, prepara el escenario para la conservación de la energía por fosforilación a nivel de sustrato; la formación de ATP es posible porque cada uno de los fosfatos de la molécula de ácido 1,3-difoglicérico y cuando más tarde se convierte en ácido 1,3-fosfoglicérico y cuando más tarde en la vía, cada molécula fosfoenolpiruvato se convierte en piruvato. En el glucólisis, se consumen dos moléculas de ATP en las dos fosforilaciones de la glucosa y se sintetizan cuatro moléculas de ATP (dos por cada molécula de ácido 1,3-difosfoglicérico convertida a piruvato). Por tanto, la ganancia neta del organismo es de dos moléculas de ATP por cada molécula de glucosa. (Madigan, Martinko, Bender, Buckley, & Stahl, 2004)

**Etapa III: Balance redox y síntesis de productos de fermentación**

Durante la formación de dos moléculas de ácido 1-3, difosglicérico, se reducen dos moléculas de  $\text{NAD}^+$  a NADH. Sin embargo, las células contienen solo una pequeña cantidad de  $\text{NAD}^+$ , y si todo se convirtiera en NADH se detendría la oxidación de la glucosa, la oxidación continuada del gliceraldehido-3-fosfato solo se puede proseguir si está presente una molécula de  $\text{NAD}^+$  para aceptar los electrones liberados. Este bloqueo se supera en la fermentación mediante la nueva oxidación de NADH a  $\text{NAD}^+$ , a través de reacciones que suponen la reducción del piruvato a una extensa variedad de productos de fermentación. (Madigan, Martinko, Bender, Buckley, & Stahl, 2004)

En la figura ilustrada a continuación, se puede apreciar una descripción gráfica del proceso de glucólisis:

Figura 1- 7 Esquema del proceso de glucólisis



Fuente: (Madigan, Martinko, Bender, Buckley, & Stahl, 2004)

#### 1.4.3.2.6. Factores que inciden en la fermentación alcohólica

Las condiciones de operación son de mucha importancia para asegurar la reproducción del microorganismo de forma más eficiente. Los factores importantes en esta parte del proceso son la concentración de azúcares, el pH, temperatura y nutrientes.

**Tabla I- 6 Factores que inciden en la fermentación alcohólica**

<b>Factores</b>	<b>Características</b>	<b>Observación</b>
<b>Concentración de azúcares</b>	10 °Brix – 18 °Brix	<p>Los grados Brix es la unidad de medida de sólidos solubles presentes en una solución, expresados en porcentaje p/v de sacarosa. La concentración de azúcares debe mantenerse en niveles bajos para la multiplicación inicial de la levadura.</p> <p>Si el °Brix es muy bajo el grado alcohólico obtenido será pobre, por lo contrario, si el ° Brix es muy alto la fermentación no se efectúa.</p>
<b>pH</b>	3,5 - 5,5	La levadura trabaja mejor en medio relativamente ácido; por lo que deberá ajustarse el mosto a este requerimiento.
<b>Temperatura</b>	30 ° C	La descomposición de los azúcares produce una reacción exotérmica es decir con desprendimiento de calor. A mayor temperatura la fermentación alcohólica transcurre más rápidamente y es menos pura. Se produce menos etanol y más cantidad de compuestos secundarios, por otro lado, las levaduras tienen en los 30°C su temperatura óptima de desarrollo. por encima de los 35°C la actividad decrece y a 45°C mueren.

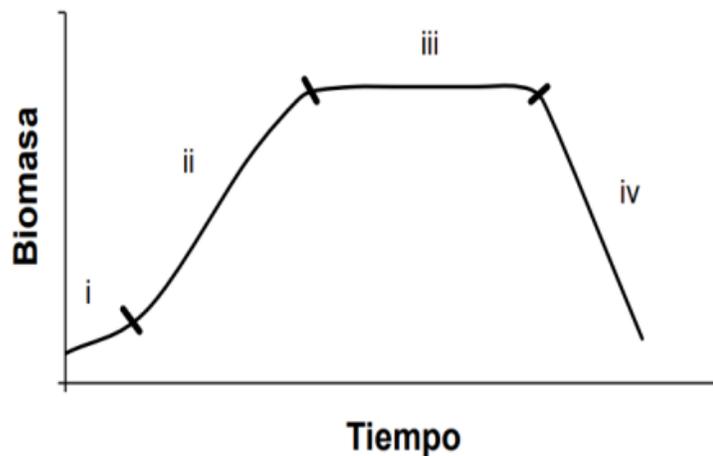
<b>Nutrientes</b>	Nitrógeno y fósforo (urea y fosfato de amonio)	La levadura necesita la presencia de nutrientes para que la fermentación sea correcta, pues como ser vivo necesita alimentarse para poder trabajar.
-------------------	--	---

Fuente: Coronel, 1991

#### 1.4.3.2.7. *Cinética de crecimiento celular*

El desarrollo de todo microorganismo está caracterizado por fases o etapas de adaptación, crecimiento, estacionaria y muerte, las cuales ocurren en función del tiempo.

**Figura 1- 8 Curva de crecimiento microbiano**



Fuente: Castro, 2018

**i) Fase de Adaptación:** Representa el periodo de adaptación de la levadura a las nuevas condiciones nutricionales y ambientales. En esta fase no existe aumento en el número de células debido a que la levadura utiliza la energía disponible para sintetizar las enzimas que requiere para su desarrollo en el nuevo medio. (Castro, 2018)

**ii) Fase logarítmica o exponencial:** En esta fase las células se multiplican de manera exponencial. La velocidad de crecimiento puede ser cuantificada con base al número de células que se producen por unidad de tiempo. La fase termina cuando

los nutrientes se agotan, las condiciones ambientales se modifican o cuando la célula produce metabolitos tóxicos que inhiben su reproducción. (Castro, 2018)

**iii) Fase estacionaria:** En esta fase la velocidad de crecimiento de la levadura es igual a la velocidad de muerte. Una vez que se obtiene la máxima concentración de células, la producción de etanol disminuye. (Castro, 2018)

**iv) Fase de muerte:** Es la fase en la que el número de muertes es mayor al número de nuevas células formadas. Esta fase continúa hasta que la población disminuye a una pequeña fracción de células resistentes o hasta que todas las células mueren. (Castro, 2018)

#### **1.4.3.3. Destilación**

La operación unitaria de destilación es un método que se usa para separar los componentes de una solución líquida, el cual depende de la distribución de estos componentes entre una fase de vapor y una fase líquida. Ambos componentes están presentes en las dos fases. La fase de vapor se origina de la fase líquida por vaporización en el punto de ebullición. (Geankoplis, 1998)

El requisito básico para separar los componentes por destilación consiste en que la composición del vapor sea diferente de la composición del líquido con el cual está en equilibrio en el punto de ebullición de este último. La destilación se basa en soluciones en las que todos los componentes son bastante volátiles, como soluciones amoníaco-agua o etanol-agua, en las que ambos componentes también están en fase de vapor. (Geankoplis, 1998)

La destilación se puede llevar a cabo en la práctica por medio de cualquiera de dos métodos principales. El primer método consiste en la producción de un vapor por ebullición de la mezcla líquida que se va a separar en una sola etapa, para recuperar y condensar los vapores. En este método no se permite que el líquido regrese al destilador de una sola etapa y se ponga en contacto con los vapores que se desprenden. El segundo método implica el retorno de una porción del condensado al destilador. Los vapores se desprenden a través de una serie de etapas o platos, y parte del condensado fluye hacia

abajo a través de la serie de etapas o platos a contracorriente con respecto a los vapores. Este segundo método se llama destilación fraccionada, destilación con reflujo o rectificación. (Geankoplis, 1998)

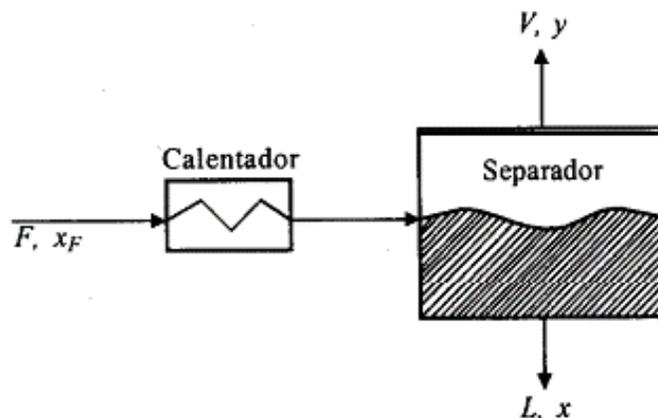
Existen tres tipos importantes de destilación que se verifican en una sola etapa o en un solo destilador y que no incluyen rectificación.

- Destilación en equilibrio o instantánea
- Destilación simple por lotes o diferencial
- Destilación simple con arrastre de vapor.

#### **1.4.3.3.1. Destilación en equilibrio o instantánea**

En este proceso, que se verifica en una sola etapa, la mezcla líquida se vaporiza parcialmente. Se permite que el vapor establezca un equilibrio con el líquido, y entonces se separan las fases de vapor y de líquido. Esto se puede hacer por lotes o en régimen continuo. (Geankoplis, 1998)

**Figura 1- 9 Destilación en equilibrio o instantánea**



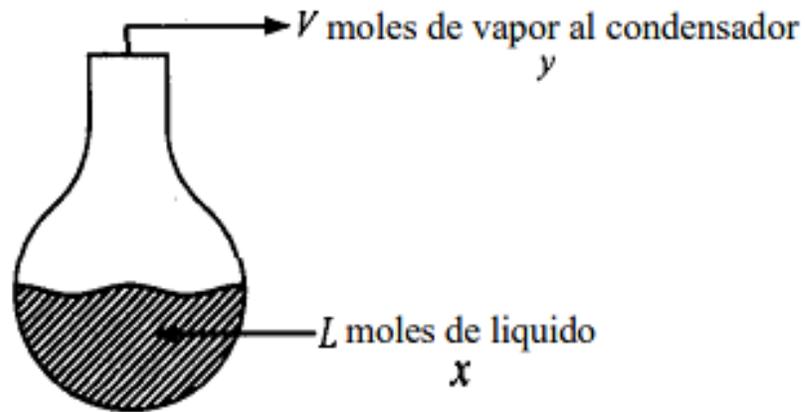
Fuente: Geankoplis, 1998

#### **1.4.3.3.2. Destilación simple por lotes o diferencial**

En este tipo de destilación, primero se introduce líquido en un recipiente de calentamiento. La carga líquida se hierve lentamente y los vapores se extraen con la misma rapidez con que se forman, enviándolos a un condensador donde se recolecta el vapor condensado (destilado). La primera porción de vapor condensado es más rica en

el componente más volátil A. A medida que se procede con la vaporización, el producto vaporizado es más pobre en A. (Geankoplis, 1998).

**Figura 1- 10 Destilación simple por lotes o diferencial**



Fuente: Geankoplis, 1998

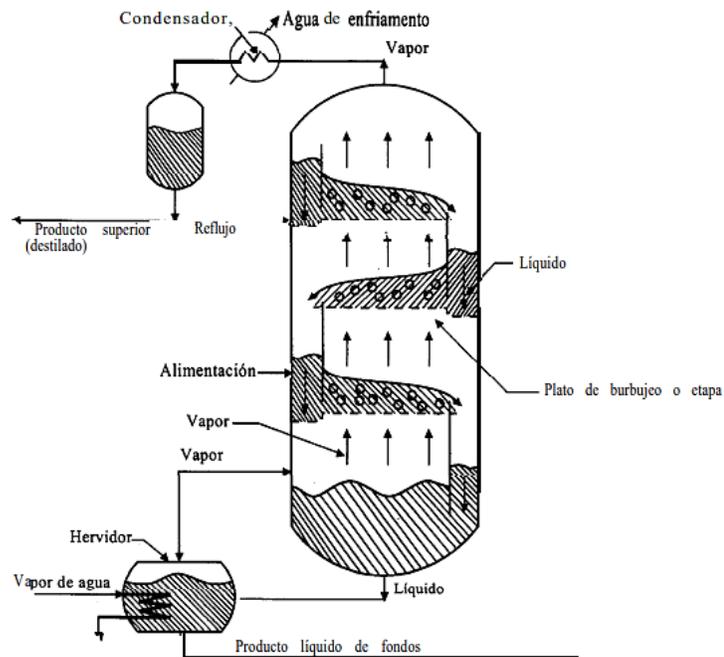
#### **1.4.3.3. Destilación simple con arrastre de vapor**

Los líquidos con alto punto de ebullición no se pueden purificar por destilación a presión atmosférica, puesto que los componentes de la mezcla líquida podrían descomponerse a las temperaturas elevadas que se requieren. Con frecuencia, las sustancias de alto punto de ebullición son casi insolubles en agua; entonces, se logra una separación a temperatura más baja por medio de una destilación simple con arrastre de vapor. (Geankoplis, 1998)

#### **1.4.3.3.4. Destilación con reflujo**

La rectificación (fraccionada) o destilación por etapas con reflujo se puede considerar desde un punto de vista simplificado como un proceso en el cual se lleva a cabo una serie de etapas de vaporización instantánea, de manera que los productos gaseosos y líquidos de cada etapa fluyen a contracorriente. El líquido de una etapa se conduce o fluye a la etapa inferior y el vapor de una etapa fluye hacia arriba, a la etapa superior. En una columna de destilación, las etapas (empaques o platos) de una torre de destilación están distribuidas verticalmente.

**Figura 1- 11 Flujo del proceso para una torre fraccionadora**



Fuente: Geankoplis, 1998

Los empaques pueden ser divididos en tres clases: empaques desordenados o rellenos, empaque estructurado o sistemáticamente arreglado, rejillas. Los empaques desordenados son unidades o piezas discretas de empaques con una forma geométrica específica, los cuales son vaciados o rellenos aleatoriamente dentro de la columna, son los de uso más común en la práctica comercial. Históricamente pueden ser divididos en tres generaciones: la primera generación (1907 a 1950) produjo dos tipos básicos de formas simples, el anillo Rasching y la silla Berl, la segunda generación (finales de 1950 principio de los setenta) produjo dos geometrías muy populares, el anillo Pall, que evolucionó del anillo Rasching, y la silla Intalox, que se desarrolló a partir de la silla Berl esta segunda generación de empaques todavía es popular y de extensivo uso en la industria y la tercera generación (mediados de los setenta hasta el presente) ha producido una multitud de geometrías comerciales, la mayoría de las cuales evolucionó de los anillos Pall y sillas Intalox. (PDVSA, 1997)

**CAPÍTULO II**  
**PARTE EXPERIMENTAL**

## 2. Parte experimental

### 2.1. Descripción y caracterización de la materia prima

En el departamento de Tarija se produce yuca en las provincias Arce y Gran Chaco; la siembra de este tubérculo se realiza entre los meses de julio a septiembre. Actualmente no se dispone de variedades mejoradas de yuca en la región, por lo que a efectos del presente proyecto se utilizaron variedades criollas adaptadas a la zona y con las características adecuadas para el consumo o procesamiento.

En el departamento de Tarija la variedad de yuca que tradicionalmente se cultiva es de pulpa amarilla, por lo que en la presente investigación se estudió esta variedad para la producción de bioetanol.

La caracterización fisicoquímica de la materia prima fue realizada en el Centro de Análisis, Investigación y Desarrollo (CEANID) de la Universidad Autónoma Juan Misael Saracho, los valores resultantes se describen en la Tabla II-1:

**Tabla II- 1 Análisis fisicoquímico de yuca**

<b>Parámetro</b>	<b>Unidad</b>	<b>Resultado</b>
<b>Azúcares reductores</b>	%	3,49
<b>Ceniza</b>	%	1,04
<b>Fibra</b>	%	1,18
<b>Grasa</b>	%	0,2
<b>Hidratos de Carbono</b>	%	30,61
<b>Humedad</b>	%	66,03
<b>Proteína total (Nx6,25)</b>	%	2,12
<b>Valor energético</b>	%	132,72

Fuente: Centro de Análisis, Investigación y Desarrollo, 2023

La cantidad de almidón presente en la materia prima es una característica muy importante para el proceso, por esta razón se llevó a cabo el análisis respectivo en el

Centro de Investigación y Desarrollo de Tecnología de Alimentos (CIDTA) de la Universidad Autónoma Gabriel Rene Moreno, el valor resultante se indica en la Tabla II-2:

**Tabla II- 2 Análisis de la cantidad de almidón presente en la yuca**

<b>Parámetro</b>	<b>Unidad</b>	<b>Resultado</b>
<b>Almidón</b>	g/100g	28,31

Fuente: Centro de Investigación y Desarrollo de Tecnología de Alimentos, 2024

De acuerdo al trabajo de investigación de (Cobana & Antezana, 2007) nos indica que en las diferentes técnicas utilizadas para la extracción de almidón por vía seca, las raíces frescas de yuca presentaron un contenido de almidón entre 30,79% y 30,85%.

Por lo tanto, evaluando el resultado obtenido del análisis de la cantidad de almidón presente en la materia prima utilizada, este obedece al rango del 25% al 30% de su peso seco.

De la misma manera el análisis microbiológico de la materia prima fue realizado en el CEANID, los resultados se aprecian en la Tabla II-3:

**Tabla II- 3 Análisis Microbiológico de yuca**

<b>Parámetro</b>	<b>Unidad</b>	<b>Resultado</b>
<b>Coliformes Totales</b>	UFC/g	$7,0 \times 10^1$
<b>Mohos y Levaduras</b>	UFC/g	$2,0 \times 10^1$
<b>Escherichia Coli</b>	UFC/g	$< 1,0 \times 10^1$ (*)

(\*): No se observa desarrollo de colonias

Fuente: Centro de Análisis, Investigación y Desarrollo, 2024

Los resultados obedecen a la naturaleza de la materia prima que, al ser un tubérculo, existe una alta probabilidad de haber sido afectada por contaminación del agua de riego y de la tierra. Además, cabe mencionar que al momento de realizar el muestreo de la materia prima no fue conveniente efectuar un lavado previo por la susceptibilidad de

incrementar la cantidad de mohos. Razón por la que el resultado de los Coliformes Totales dio un valor elevado.

## **2.2. Metodología**

### **2.2.1. Descripción del método de investigación**

La presente investigación tendrá un enfoque cuantitativo, debido a que de manera objetiva se busca correlacionar variables correspondientes al proceso de obtención de bioetanol a escala laboratorio a partir de yuca.

Considerando que se describe el proceso de producción de bioetanol a escala laboratorio, y además las características de la materia prima, así como del biocombustible obtenido, la investigación también es descriptiva.

Por último, tomando en cuenta que para determinar las relaciones entre variables con el fin de establecer los correspondientes parámetros del proceso mediante un diseño factorial, la investigación además es de tipo correlacional-explicativo, ya que también se explica en qué condiciones se produce la hidrólisis, la fermentación y la destilación.

### **2.3. Selección del proceso para la hidrólisis del almidón**

Para la obtención de bioetanol a partir de la yuca fue necesario seleccionar el tipo de hidrólisis a realizar, por lo que se analizaron los siguientes factores tanto hidrólisis ácida como enzimática:

#### **2.3.1. Aplicabilidad del proceso**

**a) Hidrólisis ácida:** Es un método simple para la hidrólisis del almidón ya que los recursos están fácilmente disponibles y son baratos. Sin embargo, esta técnica tiene una serie de inconvenientes, como un rendimiento relativamente bajo y la formación de indeseables subproductos. Además, el proceso tiene poca flexibilidad ya que el producto final solo se puede cambiar el grado de hidrólisis y el equipo utilizado debe ser capaz de resistir el ácido a la temperatura de 140-150°C. Además, si el producto de la hidrólisis está destinado a un uso posterior, entonces será necesario eliminar el subproducto no deseado, como el furano.

**b) Hidrólisis enzimática:** Al utilizar amilasas, es preciso mantener un proceso de cocción que favorezca la dispersión y la aceleración del rompimiento de las cadenas de almidón. Al comparar los dos tipos de hidrólisis se encuentra la gran ventaja de la hidrólisis enzimática sobre la ácida. Esto se debe, primordialmente, a que las enzimas son específicas para un tipo de enlace (selectividad), por lo cual, no es usual la aparición de productos de degradación; caso contrario sucede con la hidrólisis ácida, en la cual, el poco control y la selectividad pobre ocasionan la aparición de productos de degradación, inclusive tóxicos. Otra ventaja son los rangos moderados de condiciones como temperatura y pH en las que transcurre la hidrólisis enzimática (pH=4-8; T=40-60°C). Además, no se presentan sustancias extrañas añadidas como en el caso de la hidrólisis ácida para la neutralización (presencia de sales).

### **2.3.2. Influencia de temperatura, pH y tiempo**

**a) Hidrólisis ácida:** La concentración del ácido, el pH, la temperatura y el tiempo de hidrólisis son los parámetros de los cuales depende el grado de degradación. Por consiguiente, las reducciones del peso molecular y de la viscosidad son inversamente proporcionales al poder de reducción que aumenta por acción del ácido. Mientras se lleva a cabo la hidrólisis debe mantenerse un pH de 1.5 a 1.8 para una solución al 33% de almidón. Temperatura 150 °C.

**b) Hidrólisis enzimática:** La temperatura es uno de los factores cruciales en la hidrólisis enzimática. Esto se debe a que muchas enzimas se ven afectadas negativamente a las altas temperaturas y se destruyen completamente a 100 °C.

El pH de una solución puede tener varios efectos hacia la estructura y actividad de las enzimas. Las actividades máximas de las amilasas se encuentran en la región ácida entre los pH de 4,5 y 7,0, pero las formas de las curvas de actividad y la localización de los puntos óptimos difieren, dependiendo del origen de la enzima.

### **2.3.3. Confiabilidad del proceso**

**a) Hidrólisis ácida:** Este método que utiliza ácidos en concentraciones altas no tiene mucha confiabilidad por las desventajas que presentan estos al generar subproductos indeseados.

- b) Hidrólisis enzimática:** Este método proporciona mayor conversión, mayor rendimiento, menos problemas de purificación, posibilidad de usar mayores concentraciones de almidón y una mejor calidad de azúcares.

#### **2.3.4. Generación de subproductos y residuos**

- a) Hidrólisis ácida:** Los subproductos de la degradación son principalmente el hidroximetilfurfural, el ácido levulónico y el ácido fórmico.
- b) Hidrólisis enzimática:** El residuo proveniente de la hidrólisis enzimática, es más limpio por la menor concentración de ácido.

#### **2.3.5. Disponibilidad de reactivos**

- 1. Hidrólisis ácida:** La hidrólisis del almidón se efectúa casi siempre con ácido clorhídrico, que posee una constante de velocidad de reacción más alta que la correspondiente al ácido sulfúrico de igual concentración. Los equipos y reactivos para llevar a cabo la hidrólisis ácida requieren que sean más sofisticados y los reactivos difíciles de conseguir en cantidad, debido al uso limitado de cierta cantidad en el país.
- 2. Hidrólisis enzimática:** Para la hidrólisis enzimática se cuenta con los equipos necesarios para llevar a cabo ya sea en un rotavapor o por medio de un baño María con agitación, con lo que respecta a los reactivos no es difícil su adquisición porque se encuentra en venta libre. Los principales microorganismos productores a nivel industrial de enzimas amilolíticas, son la bacteria *Bacillus subtilis* y los hongos de los grupos *Aspergillus ftavus - oryzae* y *Aspergillus subtilis*. La presencia de calcio durante la hidrólisis enzimática es muy importante. El calcio mantiene la conformación óptima de la molécula de la enzima para su próxima actividad y estabilidad.

En la Tabla II-4, se describe la ponderación definida según el porcentaje de influencia de cada factor analizado y evaluado previamente. El rango de calificación comprende de 1 a 10 que permite la selección del método más adecuado, donde 1 es malo y 10 excelente. La ponderación de decisión fue determinada de acuerdo con las condiciones donde se efectuará el proyecto.

**Tabla II- 4 Matriz de decisión para la selección del método experimental**

Factores	Valoración Porcentual (%)	Hidrolisis Ácida		Hidrolisis Enzimática	
		Calificación	Ponderación	Calificación	Ponderación
<b>Aplicabilidad del proceso</b>	20	7	1,4	9	1,8
<b>Influencia de la Temperatura, pH y Tiempo</b>	25	7	1,75	10	2,5
<b>Confiabilidad del proceso</b>	20	6	1,2	9	1,8
<b>Generación de subproductos y residuos</b>	15	5	0,75	8,5	1,275
<b>Disponibilidad de equipos y reactivos</b>	20	4	0,8	8	1,6
<b>Total</b>	100		5,9		<b><u>8,9</u></b>

Fuente: Elaboración propia, 2023

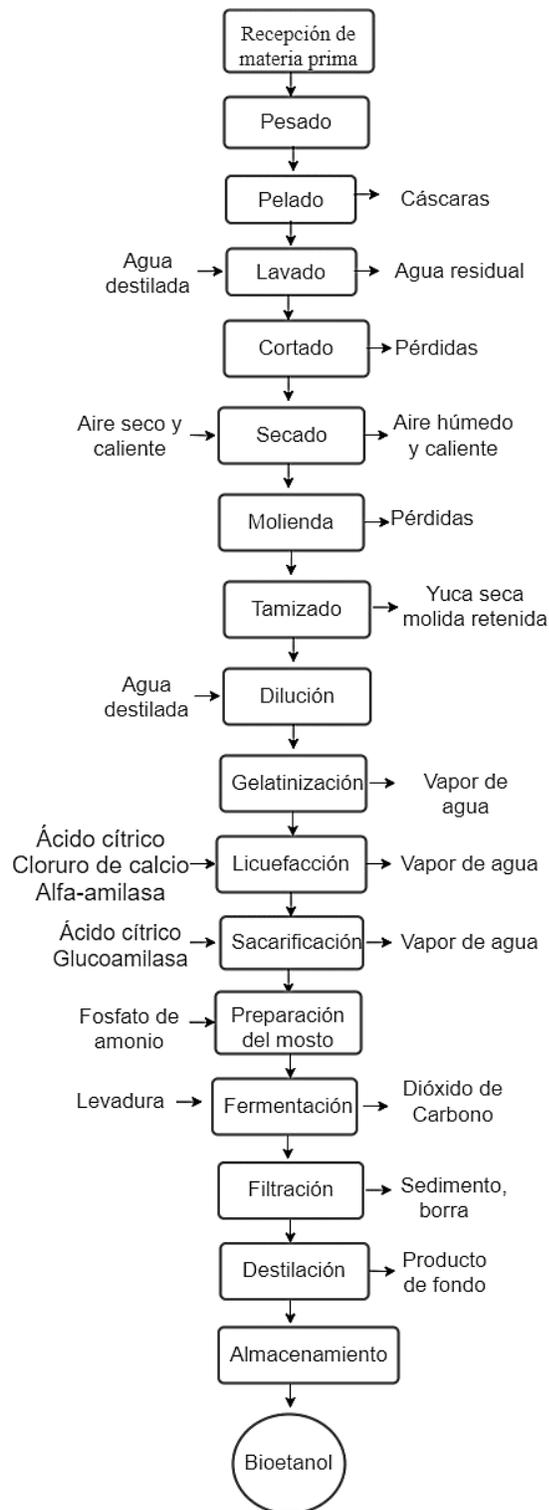
Analizando los resultados que se observan en la matriz de decisión para la selección del método en el proceso de hidrólisis para la obtención de bioetanol a partir de la yuca, la hidrólisis enzimática obtuvo una puntuación de 8,9 frente a 5,9 de la hidrolisis ácida; por lo cual se ejecutó este método para la hidrólisis del almidón.

## **2.4. Diseño experimental para el proceso de obtención de bioetanol**

### **2.4.1. Proceso de obtención de bioetanol a partir de yuca mediante hidrólisis enzimática**

En la figura 2-1 que se muestra a continuación, se observa el diagrama de flujo del proceso de obtención de bioetanol a partir de yuca mediante hidrólisis enzimática

**Figura 2- 1 Diagrama de flujo del proceso de obtención de bioetanol a partir de yuca**



Fuente: Elaboración propia, 2023

### **2.4.2. Diseño factorial**

El objetivo de un diseño factorial es estudiar el efecto de varios factores sobre una o varias respuestas, cuando se tiene el mismo interés sobre todos los factores. (Gutiérrez & De la Vara, 2008)

En el diseño factorial se realizan todas las combinaciones posibles de los niveles de varios factores que intervienen en el experimento. Los diseños factoriales más sencillos son los diseños  $2^k$ ,  $k$  corresponde al número de factores que intervienen en el proceso, con dos niveles cada uno y requieren de  $2^k$  experimentos. Cada factor se estudia a dos niveles: nivel o valor alto (+) y nivel o valor bajo (-).

Los experimentos incluyen todas las combinaciones de cada nivel de un factor con todos los niveles de los otros factores.

(+) = nivel o valor alto

(-) = nivel o valor bajo

En el presente trabajo de investigación se presentan dos diseños factoriales, correspondientes a las etapas de hidrólisis enzimática y fermentación alcohólica, los cuales se describen a continuación.

#### **2.4.2.1. Diseño factorial para el proceso de hidrólisis enzimática**

Para la determinación de las variables significativas que influyen en el proceso de hidrólisis enzimática se realiza el siguiente análisis.

La temperatura es un factor crucial en la hidrólisis enzimática, la enzima generalmente más utilizada en el proceso de licuefacción es la alfa amilasa obtenida de bacterias termorresistentes como *Bacillus licheniformis* o *Bacillus amyloliquefaciens*, que actúa entre  $67,5^{\circ}$  -  $72,5^{\circ}$  C y pH de 5,7. Además, para el proceso de sacarificación la concentración de la enzima es de 0.8 a 1.5 g/kg de sustrato. Los parámetros recomendables son un pH entre 4 y 6 y a una temperatura entre  $50^{\circ}$ C y  $65^{\circ}$ C en un tiempo entre 90 y 120 minutos de reacción.

Tomando en cuenta estas consideraciones previamente descritas, se plantea un diseño factorial de  $2^2$ , es decir con dos variables y dos niveles, así mismo, se consideró necesaria la ejecución de tres repeticiones para una mejor evaluación de la relación entre variables.

$$\text{N}^\circ \text{ de variables} = 2$$

$$\text{Niveles} = 2$$

$$\text{N}^\circ \text{ de experimentos} = 2^2 = 4$$

Tomando en cuenta las tres repeticiones, el número total de experimentos determinado es:

$$\text{N}^\circ \text{ de experimentos} = 4 * 3 = 12 \text{ experimentos}$$

Las variables independientes de estudio que se analizaron son las siguientes:

- Temperatura
- Concentración de enzima

La variable respuesta sobre la que se evaluó los efectos de las combinaciones, fue la Concentración de Sólidos Solubles ( $^\circ$ Brix).

A continuación, en la Tabla II-5 se muestra los niveles de variación de los factores escogidos:

**Tabla II- 5 Niveles de variación de los factores en el proceso de hidrólisis enzimática**

Factores	Niveles	
	Inferior	Superior
<b>A: Temperatura (<math>^\circ</math>C)</b>	70	75
<b>B: Concentración de enzima (g/L)</b>	0,8	1

Fuente: Elaboración propia, 2023

En la Tabla II-6 se presentan todas las combinaciones entre las variables investigadas:

**Tabla II- 6 Matriz de diseño experimental en el proceso de hidrólisis enzimática**

Número de Tratamientos	Temperatura (°C)	Concentración de enzima (g/L)	Concentración de Sólidos Solubles (°Brix)
1	70	0,8	Y <sub>1</sub>
2	75	0,8	Y <sub>2</sub>
3	70	1	Y <sub>3</sub>
4	75	1	Y <sub>4</sub>

Fuente: Elaboración propia, 2023

#### 2.4.2.1.1. Modelo de regresión para el proceso de hidrólisis enzimática

Para el experimento del proceso de hidrólisis enzimática de  $2^2$ , el modelo de regresión es:

$$y = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \epsilon$$

Donde:

$y$  = Modelo de regresión

$x_1$  = Variable codificada que representa la temperatura

$x_2$  = Variable codificada que representa la concentración de enzima al iniciar la licuefacción

$\beta$  = Coeficientes de regresión

$\epsilon$  = Error aleatorio

Los coeficientes de regresión son brindados por el análisis estadístico hecho en el programa de SPSS.

#### 2.4.2.2. Diseño factorial para el proceso de fermentación alcohólica

Considerando que el proceso de fermentación debe estar sujeto a un análisis, las variables que influyen en el proceso se tratan a continuación:

El pH es una variable importante en la fermentación, debido a su importancia en el control de la contaminación bacteriana y en el efecto del crecimiento de las levaduras, en la velocidad de la fermentación y en el rendimiento de etanol, el pH óptimo es de 3,5 a 5,5.

Además, la cantidad de levadura es importante en el proceso de fermentación. En un medio muy rico en azúcares, el microorganismo tolera altas concentraciones de etanol, y durante el proceso produce bajos niveles de subproductos.

El estudio se realizó mediante un diseño factorial con un arreglo de  $2^2$ , es decir la combinación de 2 factores y 2 niveles con 3 repeticiones, por tanto, el número de combinaciones de tratamiento es 12.

$$\text{N}^\circ \text{ de variables} = 2$$

$$\text{Niveles} = 2$$

$$\text{N}^\circ \text{ de experimentos} = 2^2 = 4$$

Considerando las tres repeticiones, el número total de experimentos determinado es:

$$\text{N}^\circ \text{ de experimentos} = 4 * 3 = 12 \text{ experimentos}$$

Las variables independientes de estudio analizadas fueron:

- Cantidad de levadura
- Acidez del medio pH

La variable respuesta por considerarse de mayor importancia en el trabajo de investigación, fue el Grado Alcohólico (°GL) obtenido terminada la destilación.

Los niveles de variación de los factores escogidos en el proceso de fermentación se exponen en la siguiente Tabla II -7:

**Tabla II- 7 Niveles de variación de los factores en el proceso de fermentación alcohólica**

Factores	Nivel	
	Inferior	Superior
<b>A: Cantidad de levadura (g/L)</b>	1	2
<b>B: pH</b>	4,5	5

Fuente: Elaboración propia, 2023

En la Tabla II-8, se presentan todas las posibles combinaciones entre las variables que se estudiaron:

**Tabla II- 8 Matriz de diseño experimental en el proceso de fermentación alcohólica**

Número de Tratamiento	Cantidad de levadura (g/L)	pH	Grado Alcohólico (° GL)
1	1	4,5	Y <sub>1</sub>
2	2	4,5	Y <sub>2</sub>
3	1	5	Y <sub>3</sub>
4	2	5	Y <sub>4</sub>

Fuente: Elaboración propia, 2023

#### 2.4.2.2.1. Modelo de regresión para el proceso de fermentación alcohólica

Para el experimento del proceso fermentativo de 2<sup>2</sup>, el modelo de regresión es:

$$y = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \epsilon$$

Donde:

$y$  = Modelo de regresión

$x_1$  = Variable codificada que representa la cantidad de levadura a añadir

$x_2$  = Variable codificada que representa el pH al iniciar la fermentación

$\beta$  = Coeficientes de regresión

$\epsilon$ = Error

Los coeficientes de regresión son brindados por el análisis estadístico hecho en el programa de SPSS.

### **2.4.3. Diseño para el proceso de destilación**

Para el proceso de destilación se consideraron las siguientes variables que intervienen en el proceso:

- La temperatura de cabeza se controló mediante la medición a través del termómetro ubicado en la cabeza de la columna de destilación, en un rango de 75 °C a 85°C.
- El volumen de destilado se midió con el propósito de conocer el rendimiento respecto al volumen de la alimentación a la columna.
- El grado alcohólico es la variable respuesta de todo el proceso, permitió conocer el volumen de etanol contenido en la mezcla del destilado.
- El control del reflujo durante la etapa de destilación permite el enriquecimiento del vapor que asciende, por lo que al aumentar la relación de reflujo es mayor el contacto y más fácil la separación.

## **2.5. Procedimientos y técnicas empleados para la obtención de los resultados**

### **2.5.1. Equipos y materiales de laboratorio**

Los equipos que se utilizaron durante la ejecución de la fase experimental del proyecto de investigación son:

- Balanza analítica
- Secador de tiro forzado
- Molino de discos
- Molino de martillos
- Tamizador vibratorio
- Baño María
- Agitador mecánico
- pH-metro

- Termostato de inmersión
- Refractómetro
- Columna de destilación

Los materiales de laboratorio que se usaron en la parte experimental se describen en la Tabla II-9:

**Tabla II- 9 Descripción del material de laboratorio utilizado**

<b>Material</b>	<b>Tipo</b>	<b>Capacidad</b>	<b>Cantidad</b>
Vaso de precipitado	Vidrio	1000 ml	1
Vaso de precipitado	Vidrio	500 ml	1
Vaso de precipitado	Vidrio	250 ml	2
Probeta	Vidrio	100 ml	1
Vidrio reloj	Vidrio	100 mm	1
Espátula	Metálico	Pequeña	1
Termómetro	Vidrio	-10 a 100°C	1
Papel filtro	Papel	Pliegue	1
Pizeta	Plástico	600 ml	1
Frascos	Vidrio	200 ml	16

Fuente: Elaboración propia, 2023

### **2.5.2. Utensilios e insumos**

En la Tabla II-10 se encuentran detallados los utensilios que fueron utilizados en la parte experimental del proyecto de investigación:

**Tabla II- 10 Utensilios utilizados**

<b>Utensilios</b>	<b>Tipo</b>	<b>Capacidad</b>	<b>Cantidad</b>
Balde	Plástico	5 L	1
Jarra	Plástico	1 L	1
Repasadores	Algodón	Medianos	2
Tachos para la fermentación	Plástico	3 L	4
Embudo	Plástico	Grande	1
Cuchillo	Metálico	Pequeño	1

Fuente: Elaboración propia, 2023

Los insumos utilizados para la obtención de bioetanol a partir de yuca se muestran en la Tabla II-11:

**Tabla II- 11 Insumos utilizados**

<b>Insumos</b>	<b>Estado</b>	<b>Marca</b>
Enzima $\alpha$ amilasa	Sólido	Laffort
Enzima glucoamilasa	Sólido	Laffort
Levadura <i>Saccharomyces cerevisiae</i>	Sólido	AEB ARGENTINA S.A.
Ácido cítrico	Sólido	CARGILL AGRICOLA S.A.
Cloruro de calcio	Sólido	NEDMAG
Lugol	Líquido	BIOPACK
Fosfato de amonio	Sólido	ENOVIT

Fuente: Elaboración propia, 2023

## **2.6. Desarrollo del proceso experimental**

### **2.6.1. Descripción del proceso para obtener bioetanol a partir de yuca mediante hidrólisis enzimática**

El desarrollo del presente proyecto de investigación se llevó a cabo en instalaciones del Laboratorio de Operaciones Unitarias (LOU) y en el Laboratorio de Química de la Carrera de Ingeniería Química de la Universidad Autónoma Juan Misael Saracho.

#### **2.6.1.1. Pretratamiento de la materia prima**

##### **2.6.1.1.1. Recepción de la materia prima**

La materia prima fue adquirida en el Mercado Campesino de la ciudad de Tarija, tomando en cuenta el estado de la yuca, que no tenga imperfecciones y daños como se aprecia en la Figura 2-2; posteriormente se conserva a temperatura ambiente hasta el inicio del proceso.

**Figura 2- 2 Recepción de la materia prima**



Fuente: Elaboración propia, 2023

##### **2.6.1.1.2. Pesado**

En el inicio del proceso se procede a pesar la yuca en una balanza, para realizar las pruebas con la materia prima cuantificada.

**Figura 2- 3 Pesado de yuca**



Fuente: Elaboración propia, 2023

### **2.6.1.1.3. Pelado**

Se procedió al pelado de la yuca, retirando la piel externa de la materia prima con un cuchillo de acero inoxidable, en primer lugar, con ayuda la punta del cuchillo se desprende la cáscara de la pulpa como se observa en la Figura 2-4, y posteriormente se quita la misma manualmente.

**Figura 2- 4 Cáscaras de yuca**



Fuente: Elaboración propia, 2023

### **2.6.1.1.4. Lavado**

Posteriormente se procedió a lavar la pulpa de la yuca con agua destilada para eliminar cualquier impureza que podría contener la yuca tal como se ilustra en la Figura 2-5.

**Figura 2- 5 Lavado de yuca**



Fuente: Elaboración propia, 2023

#### **2.6.1.1.5. Cortado**

Se realizó el cortado de la yuca, obteniendo rodajas de la materia prima con un rebanador de manera manual, como se observa en la Figura 2-6.

**Figura 2- 6 Cortado de yuca**



Fuente: Elaboración propia, 2023

#### **2.6.1.1.6. Secado**

La yuca en rodajas proveniente del cortado posee un alto contenido de humedad debido a su capacidad de hidratación, razón por la que se realizó un proceso de secado para reducir el contenido de humedad hasta que la yuca se encuentre apta para su molturación.

El proceso de secado se efectuó en un secador de tiro forzado a una temperatura de 55°C en un tiempo de siete horas.

Las rodajas de yuca se expandieron sobre las bandejas del secador para efectuar el proceso, sin embargo, para evitar alteraciones de las condiciones de temperatura del secador y del total de la masa, se separó 75 g del total de materia prima como muestra representativa para las mediciones registradas cada hora de la variación del peso hasta que permanece constante.

**Figura 2- 7 Secado de yuca**



Fuente: Elaboración propia, 2023

#### **2.6.1.1.7. Molienda**

Una vez obtenidas las rodajas de yuca provenientes de la etapa de secado, se llevó a cabo el proceso de molienda. Para ello, fue preciso utilizar un molino de rodillo para reducir el tamaño de partícula de la materia prima, la Figura 2-8 muestra el desarrollo de esta etapa.

**Figura 2- 8 Molienda de la yuca seca usando el molino de rodillo**



Fuente: Elaboración propia, 2023

Posteriormente para obtener partículas más finas de materia prima, la yuca fue triturada en un molino de martillos puesto que, este equipo permite reducir y degradar hasta

formar una textura de harina, evitándose así la adherencia de la harina al molino. En una bolsa hermética y una bolsa de yute ajustando la boca de la salida de la cámara de molienda para recibir la yuca molida resultante como se puede apreciar en la Figura 2-9. Terminado el proceso de molienda se procede a pesar la yuca molida con la finalidad de conocer el rendimiento del proceso.

**Figura 2- 9 Molienda de la yuca seca usando el molino de martillos**



Fuente: Elaboración propia, 2023

#### **2.6.1.1.8. Tamizado**

Después la molienda de la materia prima, se realiza el proceso de tamizado para lograr que las partículas sean de un tamaño uniforme y puedan tener mayor superficie de contacto, se emplearon dos series de tamices con mallas de diferentes aberturas ordenadas de forma descendentes como se describe a continuación en la Tabla II-1:

**Tabla II- 12 Número de tamices utilizados en el tamizado de la yuca**

<b>N° de malla en mm UNE</b>	<b>Designación de tamiz ASTM</b>
0,5	35
0,25	60
0,063	230

Fuente: Elaboración propia, 2023

El desarrollo de esta etapa se realizó a 125 rpm durante 25 minutos en el equipo ilustrado en la Figura 2-10:

**Figura 2- 10 Tamizado de la yuca seca molida**



Fuente: Elaboración propia, 2023

#### **2.6.1.2. Hidrólisis del almidón**

##### **2.6.1.2.1. Dilución**

Para esta etapa del proceso se llevaron a cabo tres pruebas preliminares con el fin de determinar la concentración de yuca seca molida adecuada, se trabajó con relaciones peso/volumen de 13%, 14% y 15%. Se logró establecer una relación óptima de 14 % (p/v) de yuca seca molida y agua destilada para efectuar el proceso de dilución ilustrado en la Figura 2-11.

**Figura 2- 11 Dilución de yuca seca**



Fuente: Elaboración propia, 2023

### 2.6.1.2.2. Gelatinización

Para llevar a cabo la gelatinización se evaluaron dos tipos de calentamiento para alcanzar la temperatura de trabajo adecuada:

- a) Mediante contacto directo: el inconveniente presentado es la dificultad de controlar la temperatura de trabajo, la misma oscilaba entre 70 a 85°C, por lo que el tiempo de la gelatinización era mayor.
- b) Mediante baño María: se pudo controlar de mejor manera la temperatura y se logró realizar el calentamiento de la dilución hasta 70°C, durante un tiempo de 15 minutos.

Luego de haber determinado el método de calentamiento más adecuado, la gelatinización, se realizó en un baño María para el calentamiento de la dilución (Figura 2-12); la gelatinización del almidón de yuca se puede apreciar desde los 63°C, transcurrido un tiempo de 15 minutos se retiró del baño María.

**Figura 2- 12 Gelatinización.**



Fuente: Elaboración propia, 2023

### 2.6.1.2.3. Licuefacción

Antes de iniciar esta etapa fue necesario que la muestra de gelatinización se enfrié hasta 60°C y se reguló el pH a un valor de 5 con la adición de ácido cítrico 0,1 M. Para alcanzar la temperatura de trabajo se utilizó un baño María con agitador mecánico

(Figura 2-13), durante un lapso de tiempo de 60 minutos; mediante la aplicación de la prueba de yodo se logró observar la transformación de almidón en dextrinas.

**Figura 2- 13 Licuefacción**

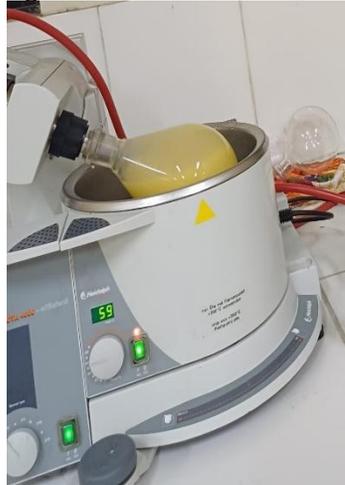


Fuente: Elaboración propia, 2023

#### **2.6.1.2.4. Sacarificación**

Para esta etapa fue preciso que la solución proveniente de la licuefacción disminuya su temperatura hasta 60°C, posteriormente se ajusta el pH a un valor de 4,5 con la adición de ácido cítrico 0,1 M y se procedió a adicionar la enzima glucoamilasa y finalmente se llevó a un rota vapor con una velocidad de 90 rev/min.

**Figura 2- 14 Sacarificación**



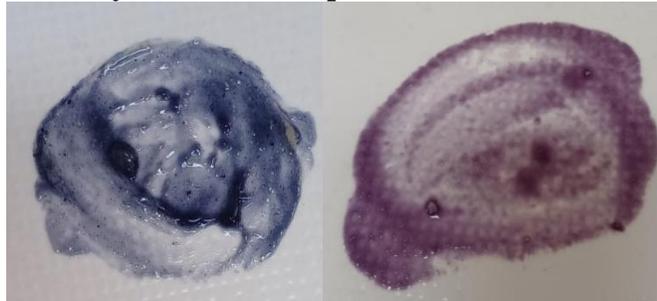
Fuente: Elaboración propia, 2023

#### 2.6.1.2.5. Prueba del yodo

La prueba del yodo es una reacción química usada para determinar la presencia o alteración del almidón. Esta reacción es el resultado de la formación de cadenas de poli yoduro a partir de la reacción del almidón con el yodo presente en la solución de un reactivo llamado Lugol.

Se realizó la prueba de yodo durante el transcurso de la hidrólisis enzimática, y se logró observar un cambio de color de la solución de azul a morado como se aprecia en la Figura 2-15, dicho cambio es un indicador de la conversión del almidón en sus respectivas dextrinas.

**Figura 2- 15 Prueba del yodo a medida que avanza la hidrólisis enzimática**

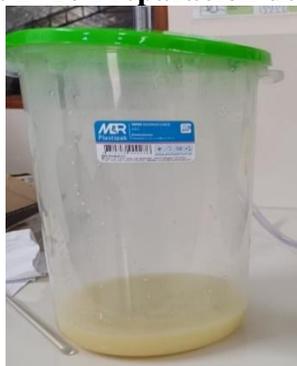


Fuente: Elaboración propia, 2023

#### 2.6.1.3. Preparación del mosto

La preparación del mosto hidrolizado se llevó a cabo en un reactor de polipropileno de 3 litros previamente esterilizado, se reguló al pH de estudio (4,5 y 5,0) con la adición de ácido cítrico 0,1 M y se utilizó como nutriente fosfato de amonio, como se observa en la Figura 2-16

**Figura 2- 16 Preparación del mosto**



Fuente: Elaboración propia, 2023

El fosfato de amonio se utilizó como nutriente en la fermentación debido a que es una fuente de nitrógeno y fosforo que son esenciales para el crecimiento de la levadura y actúa como tampón para mantener el pH dentro del rango óptimo.

#### **2.6.1.4. Fermentación alcohólica**

Para la activación del microorganismo a utilizar, se procedió a calentar 50 ml de agua destilada a una temperatura de 32°C, se añadió 2,5 gramos de sacarosa y la cantidad de levadura *Saccharomyces cerevisiae* r.f. bayanus marca AEB Argentina evaluada en el diseño factorial, siendo esta 1,0 g/L y 2 g/L (Figura 2-17); posteriormente ingresó a una fase de inoculación a una temperatura de 32 °C y durante un periodo de tiempo hasta la activación el inóculo, observando un aumento en el volumen y burbujeo.

**Figura 2- 17 Activación de la levadura**



Fuente: Elaboración propia, 2023

Una vez activada la levadura se procedió a adicionarla al mosto, agitar y posteriormente tapar el reactor, el mismo cuenta con una salida de gases para disminuir la presión en el interior, permitiendo que los gases generados durante la fermentación emerjan del recipiente sin permitir que el aire ingrese, lo que podría contaminar el proceso (Figura 2-18), la fermentación se realizó a una temperatura entre 29°C y 30°C por un periodo de 5 días.

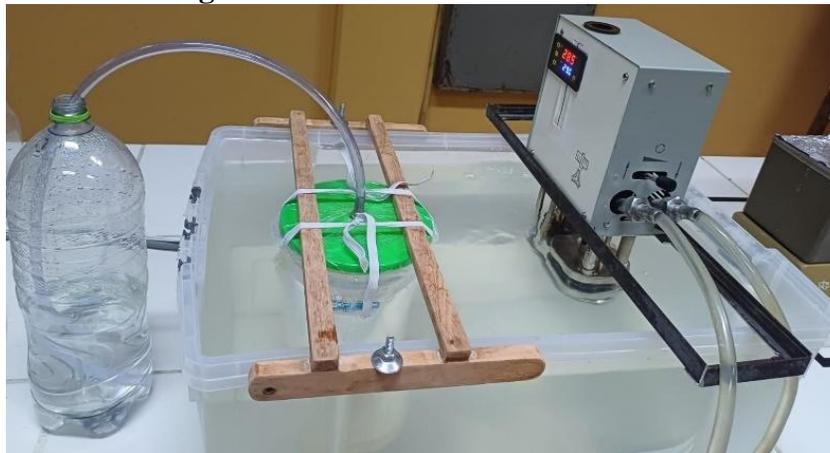
**Figura 2- 18 Levaduras en el mosto**



Fuente: Elaboración propia, 2023

La medición de los °Brix y del pH se registró en intervalos de tiempo definidos, dichos valores medidos fueron los indicadores para determinar la finalización de la etapa de fermentación, puesto la misma concluye cuando los °Brix y el pH se mantienen constantes.

**Figura 2- 19 Fermentación alcohólica**



Fuente: Elaboración propia, 2023

#### **2.6.1.5. Filtración**

Terminada la etapa de fermentación alcohólica, se procedió a filtrar al vacío el mosto fermentado (Figura 2-20) para eliminar la presencia de sólidos suspendidos, por un periodo de tiempo de 2 horas.

**Figura 2- 20 Filtración**

Fuente: Elaboración propia, 2023

#### **2.6.1.6. Destilación**

Una vez concluida la etapa de filtrado se procedió a determinar el volumen del fermento obtenido para posteriormente realizar la destilación que permitió separar el etanol producido del fermento. Para este propósito se llevó a cabo una destilación fraccionada y una destilación con reflujo.

Durante la destilación fraccionada la temperatura incrementó hasta alcanzar un valor de 75 °C, la presión de trabajo fue la presión atmosférica (Figura 2-21). Fue posible observar la formación de condensado en el sistema de refrigeración; y la corriente de destilado se fue acumulando. La operación finalizó cuando el flujo de vapor ascendente disminuyó casi en su totalidad, puesto que los componentes restantes en el fermento son menos volátiles y poseen un punto de ebullición más elevado.

La medición del grado alcohólico del destilado obtenido se realizó a una temperatura de 20 °C, mediante alcoholímetro para determinar los grados Gay Lussac por observación directa, registrando una concentración de 40 - 55 °GL.

**Figura 2- 21 Destilación fraccionada**

Fuente: Elaboración propia, 2023

En la etapa de destilación con reflujo, se agregó el fermento al sistema de alimentación de la columna, para que alcance su punto de ebullición y se obtenga la primera gota de destilado. La separación del destilado se efectuó en tres fracciones conocidas como primera fracción, fracción principal y última fracción de acuerdo a la temperatura de la fase vapor.

Se separó la primera fracción obtenida entre los 70°C a 80°C por su contenido principalmente de metanol, se obtuvo un volumen de 50 ml y se realizó la lectura del grado alcohólico usando un alcoholímetro, y el valor registrado fue de 60°GL.

Luego se recogió la fracción principal que comprende entre 80,5°C a 90°C igualmente se realizó la medición del grado alcohólico utilizando un alcoholímetro el cual fue de 53°GL, el volumen obtenido de esta fracción fue de 500 ml.

Finalmente se recogió la última fracción del destilado comprendida entre 90°C a 94°C obteniendo un volumen de 815 ml, de igual manera se realizó la medición del grado alcohólico el cual fue de 20°GL, se recogió esta última fracción durante la destilación con el fin de lograr una separación completa de ambos componentes, esta fracción

contiene principalmente agua ya que el etanol al tener un punto de ebullición más bajo se vaporiza primero.

Una vez terminada la etapa de destilación se midió, se envasó los 500 ml de la muestra y se almacenó en un lugar seguro para evitar pérdidas por factores externos y se envió al Centro de Análisis, Investigación y Desarrollo (CEANID), para su respectivo análisis.

**Figura 2- 22 Destilación con reflujo**



Fuente: Elaboración propia, 2024

**CAPÍTULO III**  
**RESULTADOS Y DISCUSIÓN**

### 3. Resultados y discusión

#### 3.1. Resultados obtenidos en la parte experimental

En este capítulo se presentan los resultados obtenidos a lo largo de esta investigación. Los valores conseguidos son analizados y procesados para determinar el mejor experimento tanto en el proceso de hidrólisis enzimática como en la fermentación. A continuación, se detallan los resultados alcanzados.

##### 3.1.1. Resultados obtenidos en el pretratamiento de la materia prima

###### 3.1.1.1. Secado

El secado de la materia prima se efectuó en un secador de tiro forzado, a una temperatura de operación de 55 °C por un periodo de tiempo de 7 horas, hasta alcanzar un peso de la muestra de yuca constante. En la Tabla III-1 se puede apreciar la variación del peso respecto al tiempo en esta etapa de secado:

**Tabla III- 1 Resultados de la variación de peso en la etapa de secado**

Nº	Tiempo (h)	Peso de la yuca (g)
1	00:00	75,124
2	01:00	59,150
3	02:00	45,588
4	03:00	36,007
4	04:00	30,779
5	05:00	28,684
6	06:00	27,802
7	07:00	27,600

Fuente: Elaboración propia, 2023

A partir de los datos de secado previamente descritos, se determinó la humedad de la muestra de materia prima mediante la ecuación (3-1):

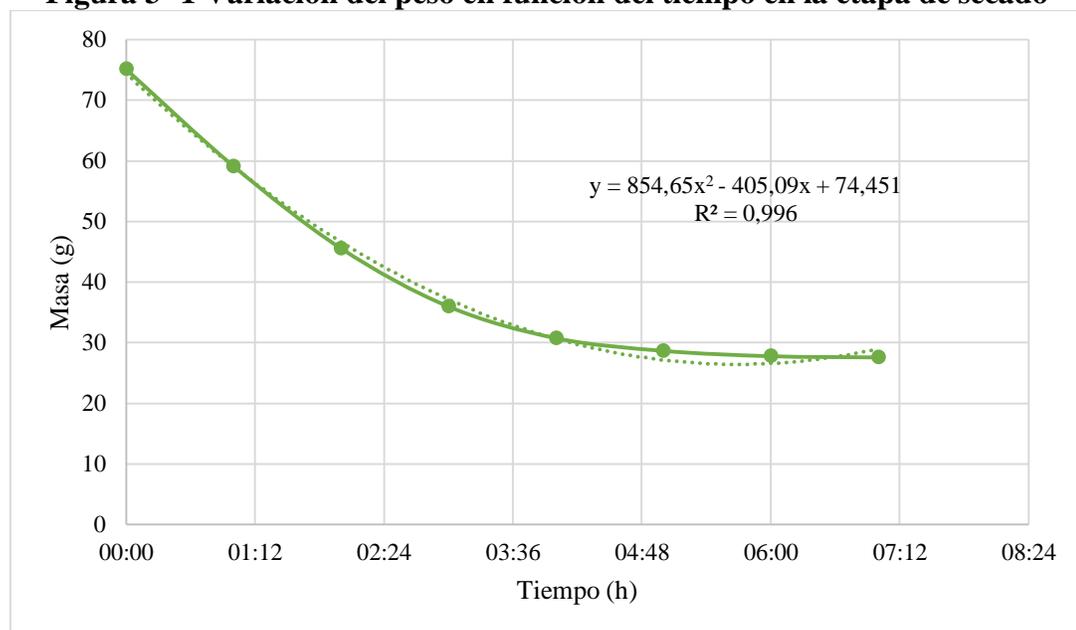
$$\text{Humedad relativa (\%)} = \frac{\text{Peso húmedo} - \text{Peso seco}}{\text{Peso húmedo}} * 100 \quad \text{Ecuación (3-1)}$$

$$\text{Humedad relativa (\%)} = \frac{75,124 - 27,600}{75,124} * 100 = 63,26 \%$$

Por lo tanto, en el secador de tiro forzado se logró procesar la materia prima que posee un contenido de humedad relativa del 63,26 %.

En la siguiente Figura 3-1 se puede observar gráficamente el comportamiento de peso de la yuca en función del tiempo; así también se presenta la curva de tendencia que se ajusta a los datos obtenidos, determinando la ecuación que relaciona las dos variables:

**Figura 3- 1 Variación del peso en función del tiempo en la etapa de secado**



Fuente: Elaboración propia, 2023

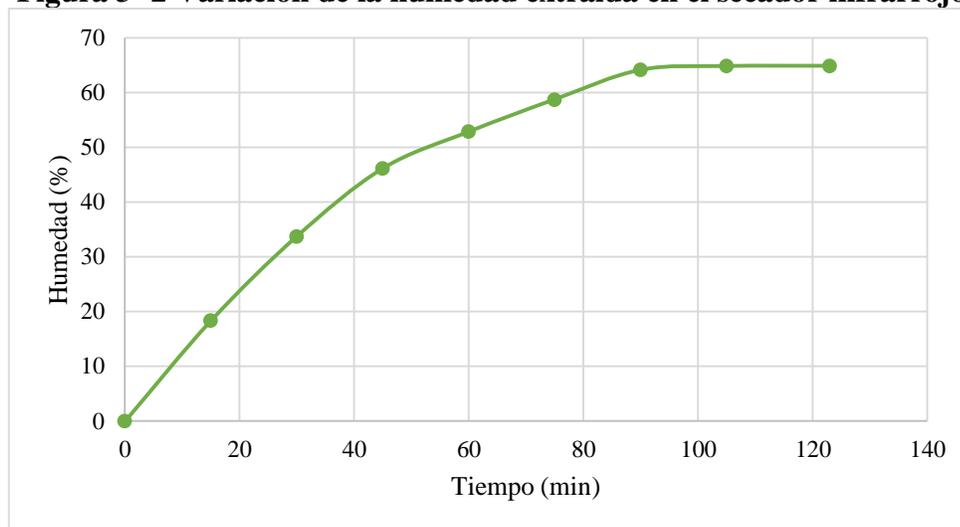
Con la finalidad de obtener valores más precisos de la humedad contenida en la materia prima que permitan una comparación y evaluación del resultado obtenido, se llevó a cabo el secado de una muestra de yuca en un secador infrarrojo que determina su humedad. En la Tabla III-2 se muestran los valores del porcentaje de humedad de la yuca obtenidos en este procedimiento:

**Tabla III- 2 Resultados del secado en el secador infrarrojo**

N°	Tiempo (min)	Humedad extraída (%)
1	0	0
2	15	18,34
3	30	33,74
4	45	46,12
5	60	52,82
6	75	58,71
7	90	64,1
8	105	64,79
9	123	64,84

Fuente: Elaboración propia, 2023

En la Figura 3-2 se puede apreciar la curva que representa la variación del porcentaje de humedad extraída de la yuca respecto al tiempo del proceso en el equipo de secado infrarrojo:

**Figura 3- 2 Variación de la humedad extraída en el secador infrarrojo**

Fuente: Elaboración propia, 2023

El contenido de humedad de la materia prima permitió cuantificar la cantidad de yuca seca molida utilizada en la etapa de hidrólisis enzimática. El resultado de humedad de 63,26 % obtenido mediante la ecuación (3-1), se encuentra cercano al valor de humedad

de 64,84 % obtenido en el secador infrarrojo; por lo tanto, se concluye que ambos valores son semejantes.

### 3.1.1.2. Tamizado

En la etapa de tamizado se determinaron los valores tanto de la cantidad de materia prima retenida en el tamiz, así como la cantidad inicial total de la yuca seca molida. Con los datos recolectados y mediante la aplicación de las siguientes ecuaciones fue posible establecer el porcentaje de retención y de paso en cada uno de los tamices; los resultados se exponen en la Tabla III-3:

$$\% \text{ Retención} = \frac{\text{Masa retenida}}{\text{Masa Total}} * 100 \% \quad \text{Ecuación (3-2)}$$

$$\% \text{ Pasa} = 100 - \% \text{ Retención} \quad \text{Ecuación (3-3)}$$

**Tabla III- 3 Resultados de la etapa de tamizado**

Número de malla (mm)	Designación de tamiz ASTM	Masa retenida (g)	% Retención	% Pasa
0,5	35	3,857	1,047	98,953
0,25	60	56,837	15,428	84,572
0,063	230	16,296	4,424	95,576
Colector	-	291,403	79,101	20,899
<b>Total</b>			100,000	0,000

Fuente: Elaboración propia, 2023

### 3.1.2. Resultados obtenidos en la hidrólisis enzimática

La hidrólisis enzimática de la yuca permitió obtener resultados que evidencian la descomposición del almidón de yuca mediante enzimas. A través de una serie de experimentos controlados, se pudo observar cómo las enzimas, amilasa y la glucoamilasa, descomponen el almidón de yuca en azúcares simples. A continuación, en la Tabla III-4, se muestran los resultados de los sólidos solubles (°Brix) obtenidos en la parte experimental de las pruebas.

**Tabla III- 4 Resultados de las réplicas de la hidrólisis enzimática**

N°	Temperatura (°C)	Concentración de enzima (g/L)	Sólidos Solubles (°Brix)			Promedio (°Brix)
			Réplica N° 1	Réplica N° 2	Réplica N° 3	
1	70	0,8	14	14	14,5	14,16
2	75	0,8	13,6	13,7	13,5	13,6
3	70	1	14,5	14,8	14,5	14,6
4	75	1	13	13	13	13

Fuente: Centro de Análisis, Investigación y Desarrollo, 2023

La hidrólisis enzimática realizada a una temperatura de 70°C y a una concentración de enzima de 1g/L fue la que presentó mayor concentración de sólidos solubles al finalizar el periodo de licuefacción.

### 3.1.2.1. Análisis estadístico del diseño factorial de la hidrólisis enzimática

El diseño factorial se desarrolla con el propósito de establecer si las variables de temperatura y concentración de enzima tienen influencia en la concentración de sólidos solubles producidos en la etapa de hidrólisis enzimática. En el cual se selecciona un diseño 2<sup>2</sup> es decir dos variables en dos niveles.

En el análisis estadístico de los datos del diseño factorial, se utilizó el programa estadístico IBM SPSS versión 23.0; mismo que permite un tratamiento integrado de todas las fases del análisis de datos obteniendo de esta manera los resultados más significativos. En la Tabla III-5 se presentan los datos obtenidos de la parte experimental.

**Tabla III- 5 Matriz de diseño experimental para la etapa de hidrólisis enzimática**

N°	Temperatura (°C)	Concentración de enzima (g/L)	Concentración de Sólidos Solubles (°Brix)
1	-1	-1	14
2	+1	-1	13,6
3	-1	+1	14,5
4	+1	+1	13

5	-1	-1	14
6	+1	-1	13,7
7	-1	+1	14,8
8	+1	+1	13
9	-1	-1	14,5
10	+1	-1	13,5
11	-1	+1	14,5
12	+1	+1	13

Fuente: Centro de Análisis, Investigación y Desarrollo, 2024

El análisis estadístico inicia con el desarrollo del ANOVA basado en los 12 datos de temperatura y concentración de enzima, introducidos al sistema, tomando como variable dependiente la concentración de sólidos solubles (°Brix) obtenidos en la parte experimental:

**Tabla III- 6 Pruebas de los Efectos Inter-sujetos**

<b>Pruebas de los efectos inter-sujetos</b>					
<b>Variable dependiente: °Brix</b>					
<b>Origen</b>	<b>Suma de cuadrados tipo III</b>	<b>gl</b>	<b>Media cuadrática</b>	<b>F</b>	<b>Sig.</b>
Modelo corregido	4,343 <sup>a</sup>	3	1,448	46,946	,000
Intersección	2299,101	1	2299,101	74565,4	,000
				32	
Temperatura	3,521	1	3,521	114,189	,000
Concenzima	,021	1	,021	,676	,435
Temperatura * Concenzima	,801	1	,801	25,973	,001
Error	,247	8	,031		
Total	2303,690	12			
Total corregida	4,589	11			

a. R cuadrado = ,946 (R cuadrado-correcta = ,926)

Fuente: Elaboración propia, IBM SPSS, 2024

De acuerdo con el análisis estadístico los valores de significación  $\leq 0,05$  indican que

son variables significativas, por lo tanto, tomando en cuenta el criterio anterior se puede observar que las variables de Temperatura y la interacción Temperatura\*Concenzima la significancia es  $< 0,05$  y para la variable Concentración de Enzima la significancia es  $> 0,05$  razón por la cual no es una variable significativa y se considera despreciable en los siguientes análisis.

Se procedió a realizar la regresión lineal a fin de establecer el modelo matemático, los resultados se muestran a continuación:

**Tabla III- 7 Análisis de Varianza de regresión lineal**

ANOVA <sup>a</sup>						
Modelo		Suma de cuadrados	gl	Media cuadrática	F	Sig.
1	Regresión	4,343	3	1,448	46,946	,000 <sup>b</sup>
	Residual	,247	8	,031		
	Total	4,589	11			

a. Variable dependiente: °Brix

b. Variables predictoras: (Constante), TemperaturaConcenzima, Concenzima, Temperatura

Fuente: Elaboración propia, IBM SPSS, 2024

El Análisis de Varianza en la anterior tabla muestra un nivel de significación que tiende a cero, demostrando que el modelo matemático escogido es el correcto. No obstante, para precisar el modelo respectivo se hace uso de los coeficientes de la tabla siguiente:

**Tabla III- 8 Coeficientes del Modelo Matemático**

Coeficientes <sup>a</sup>						
Modelo	Coeficientes no estandarizados		Coeficientes tipificados	t	Sig.	Intervalo de confianza de 95,0% para B
	B	Error típ.	Beta			Límite inferior Límite superior

1	Constant	13,842	,051		273,067	,000	13,725	13,959	
	Temperat	-,542	,051	-,876	-	10,686	,000	-,659	-,425
	Concenzi	-,042	,051	-,067	-,822	,435	-,159	,075	
	Temperat	-,258	,051	-,418	-	5,096	,001	-,375	-,141

a. Variable dependiente: °Brix

Fuente: Elaboración propia, IBM SPSS, 2024

De acuerdo con los coeficientes indicados en la anterior tabla, el modelo matemático del diseño experimental corresponde a la siguiente ecuación:

$$Y = 13,842 - 0,542 * X_1 - 0,258 * X_2 \quad \text{Ecuación (3- 4)}$$

Donde:

Y = °Brix

X<sub>1</sub> = Temperatura

X<sub>2</sub> = Temperatura\*Concentración de Enzima

Por último, se analizó los factores de correlación y determinación obtenidos:

**Tabla III- 9 Resumen del Modelo de Regresión Lineal**

Resumen del modelo <sup>b</sup>				
Modelo	R	R cuadrado	R cuadrado-correcta	Error típ. de la estimación
1	,973 <sup>a</sup>	,946	,926	,17559

a. Variables predictoras: (Constante), TemperaturaConcenzima, Concenzima, Temperatura

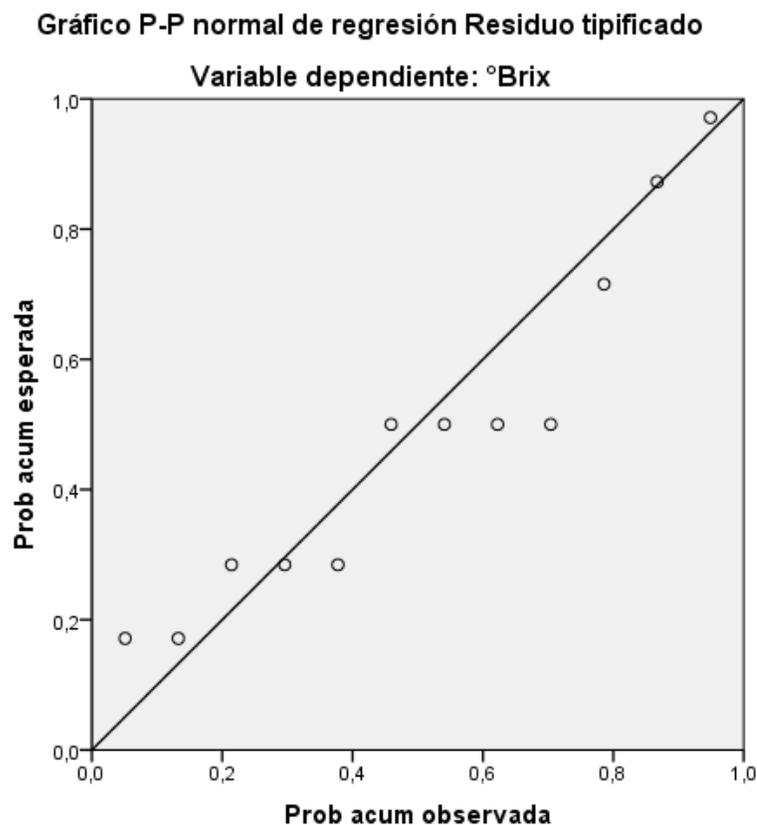
b. Variable dependiente: °Brix

Fuente: Elaboración propia, IBM SPSS, 2024

Como se puede examinar el Coeficiente de Pearson señala un alto grado de correlación lineal entre las variables independientes y dependientes. Mientras que el Coeficiente de Determinación indica que la variabilidad de la concentración de sólidos solubles (°Brix) queda explicado en un 94,6% por el modelo lineal obtenido en la ecuación (3-4).

En la figura 3-3 se observa el modelo escogido y la posición de los puntos respecto al modelo.

**Figura 3- 3 Modelo Lineal**



Fuente: IBM SPSS, 2024

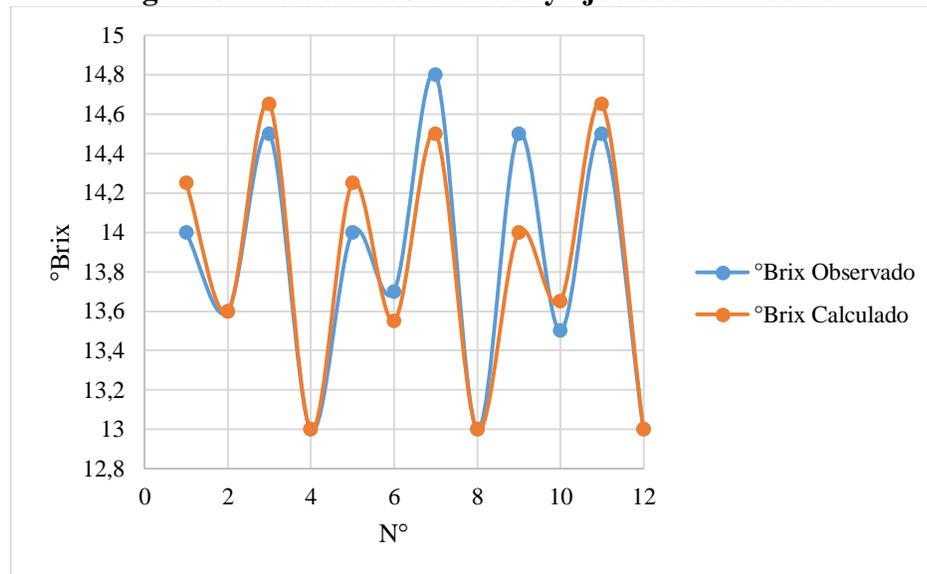
Conforme al modelo lineal, se obtuvo los datos de concentración de sólidos solubles (°Brix) generada por el modelo, por lo cual se presenta el error entre los valores de la cantidad de azúcares reductores observado y generado por el modelo.

**Tabla III- 10 Errores entre valores observados y ajustados del modelo**

N°	°Brix Observado	°Brix Calculado	Error
1	14	14,25	0,25
2	13,6	13,6	0
3	14,5	14,65	0,15
4	13	13	0
5	14	14,25	0,25
6	13,7	13,55	-0,15
7	14,8	14,5	-0,3
8	13	13	0
9	14,5	14	-0,5
10	13,5	13,65	0,15
11	14,5	14,65	0,15
12	13	13	0

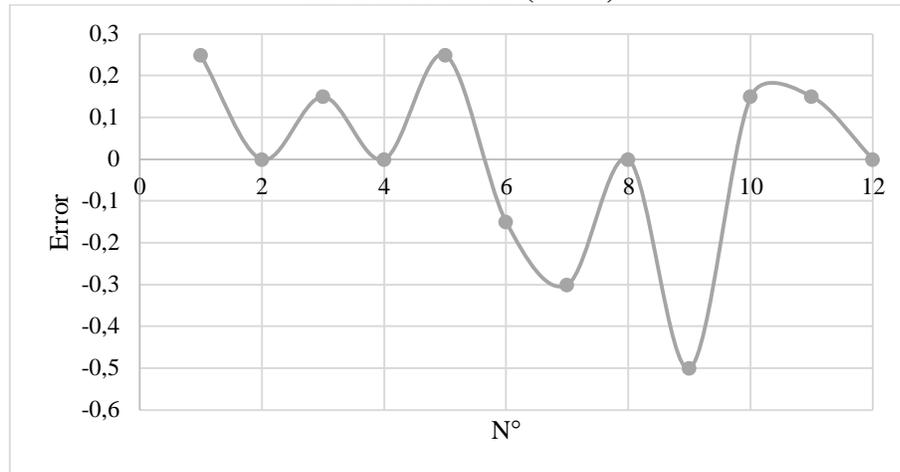
Fuente: Elaboración propia, 2024

**Figura 3- 4 Valores observados y ajustados al modelo**



Fuente: Fuente: Elaboración propia, 2024

**Figura 3- 5 Error de los valores observados y generados de la concentración de sólidos solubles (°Brix)**



Fuente: Fuente: Elaboración propia, 2024

### 3.1.3. Resultados obtenidos en la etapa de fermentación alcohólica

Durante la fermentación alcohólica del mosto hidrolizado de yuca, se registró la medición de los °Brix y del pH en intervalos de tiempo, dichos valores fueron determinados para la prueba planteada. Los parámetros que permiten apreciar el proceso de fermentación en función del tiempo se detallan en la Tabla III-11 de la réplica N°1:

**Tabla III- 11 Resultados de pH y °Brix en la fermentación alcohólica**

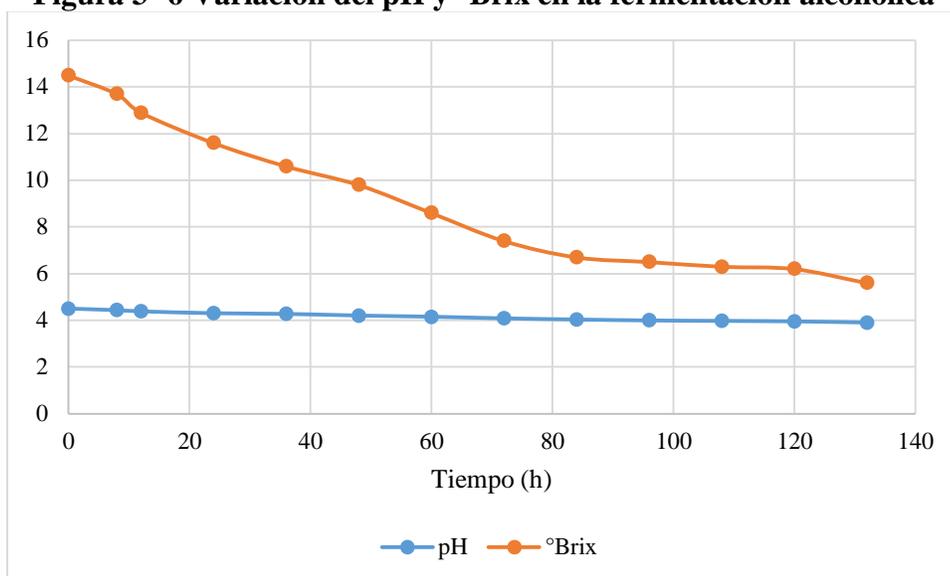
Tiempo (h)	pH	°Brix
0	4,5	14,5
8	4,43	13,7
12	4,38	12,9
24	4,3	11,6
36	4,27	10,6
48	4,2	9,8
60	4,15	8,6
72	4,08	7,4
84	4,03	6,7
96	3,99	6,5

108	3,97	6,3
120	3,95	6,2
132	3,9	5,6
144	3,9	5,5

Fuente: Elaboración propia, 2024

En la siguiente Figura 3-6 se puede observar gráficamente el comportamiento del pH durante los días de fermentación.

**Figura 3- 6 Variación del pH y °Brix en la fermentación alcohólica**



Fuente: Elaboración propia, 2024

En la Tabla III-12 se exponen los resultados alcanzados del diseño factorial estructurado para la fermentación, cuya variable respuesta fue el grado alcohólico, considerando de igual manera las réplicas efectuadas de cada combinación:

**Tabla III- 12 Resultados de las réplicas de la fermentación**

N°	Cantidad de levadura (g/L)	pH	Grado Alcohólico (°GL)			Promedio (°GL)
			Réplica N°1	Réplica N°2	Réplica N°3	
1	1	4,5	55	50	60	55
2	2	4,5	41	42	40	41
3	1	5	50	45	50	48,33
4	2	5	42	45	45	44

Fuente: Elaboración propia, 2024

La fermentación alcohólica realizada con la cantidad de levadura de 1 g/L y a un pH de 4,5 fue la que presentó mayor cantidad de alcohol al finalizar el periodo de fermentación.

### 3.1.3.1. Análisis estadístico del diseño factorial de la fermentación

El diseño factorial se desarrolló con el propósito de determinar si las variables de cantidad de levadura y pH tienen influencia en el grado alcohólico producidos en la etapa de fermentación alcohólica. Para lo cual se seleccionó un diseño  $2^2$ , es decir dos variables en dos niveles.

En el análisis estadístico de los datos del diseño factorial, se utilizó el programa estadístico IBM SPSS versión 23.0; mismo que permite un tratamiento integrado de todas las fases del análisis de datos obteniendo de esta manera los resultados más significativos. En la Tabla III-13 se presentan los datos obtenidos de la parte experimental.

**Tabla III- 13 Matriz de diseño experimental para la fermentación**

N°	Cantidad de levadura (g/L)	pH	Grado Alcohólico (°GL)
1	-1	-1	55
2	+1	-1	41
3	-1	+1	50
4	+1	+1	42
5	-1	-1	50
6	+1	-1	42
7	-1	+1	45
8	+1	+1	45
9	-1	-1	60
10	+1	-1	40
11	-1	+1	50
12	+1	+1	45

Fuente: Elaboración propia, 2024

El análisis estadístico inicia con el desarrollo del ANOVA basado en los 12 datos de cantidad de levadura y pH, introducidos al sistema, tomando como variable dependiente el grado alcohólico obtenido en la parte experimental.

**Tabla III- 14 Prueba de Efectos Inter-Sujetos**

<b>Pruebas de los efectos inter-sujetos</b>					
<b>Variable dependiente: GradoAlcohólico</b>					
<b>Origen</b>	<b>Suma de cuadrados tipo III</b>	<b>gl</b>	<b>Media cuadrática</b>	<b>F</b>	<b>Sig.</b>
Modelo corregido	332,250 <sup>a</sup>	3	110,750	11,866	,003
Intersección	26602,083	1	26602,083	2850,223	,000
CantidadLevadura	252,083	1	252,083	27,009	,001
pH	10,083	1	10,083	1,080	,329
CantidadLevadura * pH	70,083	1	70,083	7,509	,025
Error	74,667	8	9,333		
Total	27009,000	12			
Total corregida	406,917	11			

a. R cuadrado = ,817 (R cuadrado corregida = ,748)

Fuente: Elaboración propia, IBM SPSS, 2024

De acuerdo con el análisis estadístico los valores de significación  $\leq 0,05$  indican que son variables significativas, por lo tanto, tomando en cuenta el criterio anterior se puede observar que las variables de Cantidad de Levadura y la interacción Cantidad Levadura\* pH, la significancia es  $< 0,05$  y para la variable pH la significancia es  $> 0,05$  razón por la cual no es una variable significativa y se considera despreciable en los siguientes análisis.

Se procedió a realizar la regresión lineal a fin de establecer el modelo matemático, los resultados de la regresión se muestran a continuación:

**Tabla III- 15 Análisis de Varianza de Regresión Lineal**

ANOVA <sup>a</sup>						
Modelo		Suma de cuadrad os	Gl	Media cuadrática	F	Sig.
1	Regresión	332,250	3	110,750	11,866	,003 <sup>b</sup>
	Residual	74,667	8	9,333		
	Total	406,917	11			

a. Variable dependiente: GradoAlcohólico

b. Variables predictoras: (Constante), CantidadLevadurapH, pH, CantidadLevadura

Fuente: Elaboración propia, IBM SPSS, 2024

El Análisis de Varianza en la anterior tabla muestra un nivel de significación que tiende a cero, demostrando que el modelo matemático escogido es el correcto. No obstante, para precisar el modelo respectivo se hace uso de los coeficientes de la tabla siguiente:

**Tabla III- 16 Coeficientes del Modelo Matemático**

Coeficientes <sup>a</sup>							
Modelo		Coeficient es no estandariz ados		t	Si g.	Intervalo de confianza de 95,0% para B	
		B	Err or típ.			Límite inferior	Límite superior
1	(Constante)	47,083	,882	53,3 87	,0 00	45,050	49,117
	CantidadLevadura	- 4,58 3	,882	- 5,19 7	,0 01	-6,617	-2,550
	pH	-,917	,882	- 1,03 9	,3 29	-2,950	1,117
	CantidadLevadura pH	2,41 7	,882	2,74 0	,0 25	,383	4,450

a. Variable dependiente: GradoAlcohólico

Fuente: Elaboración propia, IBM SPSS, 2024

De acuerdo con los coeficientes indicados en la anterior tabla, el modelo matemático del diseño experimental corresponde a la siguiente ecuación:

$$Y = 47,083 - 4,583 * X_1 + 2,417 * X_2 \quad \text{Ecuación (3-5)}$$

Donde:

Y = Grado Alcohólico

X<sub>1</sub> = Cantidad de Levadura

X<sub>2</sub> = CantidadLevadura\*pH

Por último, se analiza los factores de correlación y determinación obtenidos:

**Tabla III- 17 Resumen del Modelo de Regresión Lineal**

<b>Resumen del modelo<sup>b</sup></b>				
<b>Modelo</b>	<b>R</b>	<b>R cuadrado</b>	<b>R cuadrado corregida</b>	<b>Error típ. de la estimación</b>
1	,904 <sup>a</sup>	,817	,748	3,05505

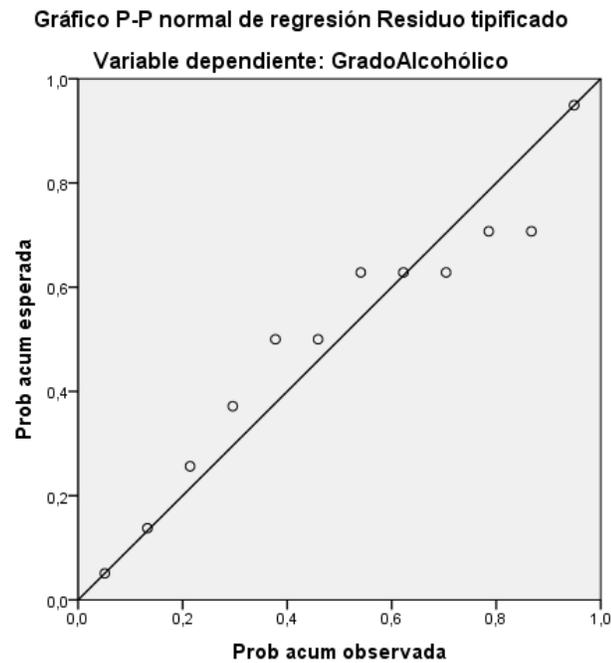
a. Variables predictoras: (Constante), CantidadLevadurapH, pH, CantidadLevadura

b. Variable dependiente: GradoAlcohólico

Fuente: Elaboración propia, IBM SPSS, 2024

Como se puede examinar el Coeficiente de Pearson señala un alto grado de correlación lineal entre las variables independientes y dependientes. Mientras que el Coeficiente de Determinación indica que la variabilidad del grado alcohólico queda explicada en un 81,7% por el modelo lineal obtenido en la ecuación (3-5).

En la figura 3- 7 se observa el modelo escogido y la posición de los puntos respecto al modelo.

**Figura 3- 7 Modelo Lineal**

Fuente: IBM SPSS, 2024

Conforme al modelo lineal, se obtiene los datos de grado alcohólico generado por el modelo, por lo cual se presenta el error entre los valores de grado alcohólico observado y generado por el modelo.

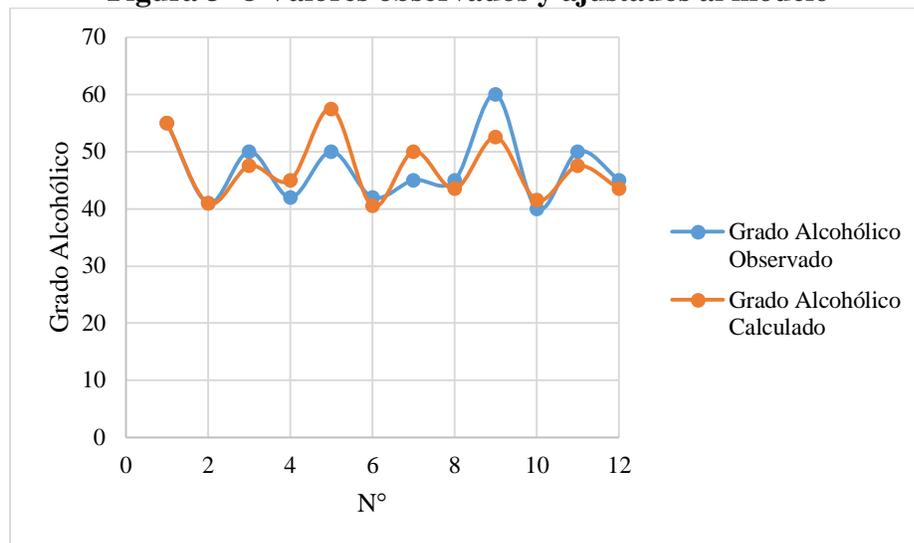
**Tabla III- 18 Errores entre valores observados y ajustado del modelo**

N°	Grado Alcohólico Observado	Grado Alcohólico Calculado	Error
1	55	55	0
2	41	41	0
3	50	47,5	-2,5
4	42	45	3
5	50	57,5	7,5
6	42	40,5	-1,5
7	45	50	5
8	45	43,5	-1,5
9	60	52,5	-7,5
10	40	41,5	1,5

11	50	47,5	-2,5
12	45	43,5	-1,5

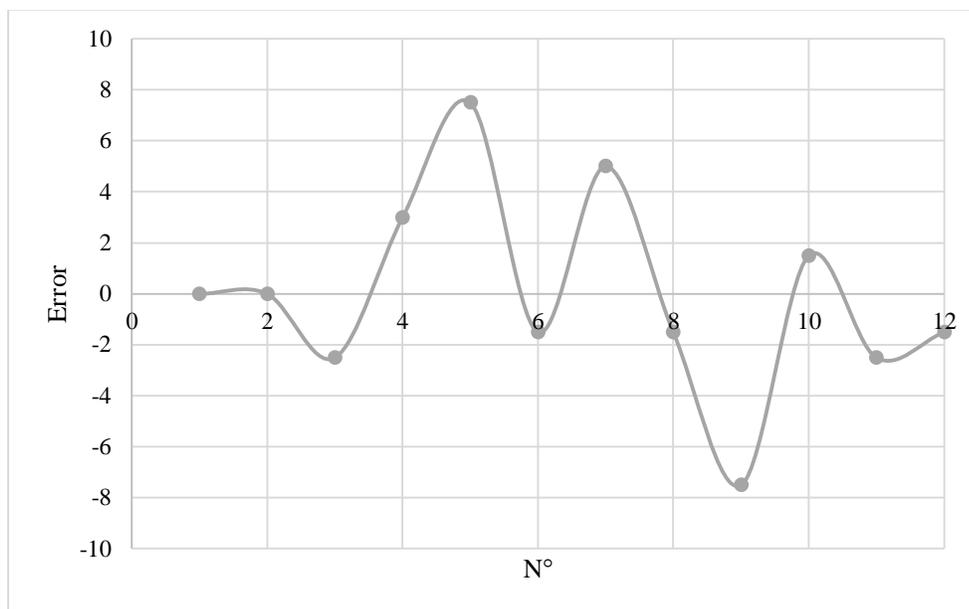
Fuente: Elaboración propia, 2024

**Figura 3- 8 Valores observados y ajustados al modelo**



Fuente: Fuente: Elaboración propia, 2024

**Figura 3- 9 Error entre el grado alcohólico observado y generado**



Fuente: Fuente: Elaboración propia, 2024

### 3.1.4. Resultados obtenidos en la etapa de filtrado

En la etapa de filtrado del mosto fermentado se logró obtener un líquido claro, libre de partículas sólidas y se cuantificó su volumen final; así también se determinó el peso del sedimento resultante estos resultados se describen en la Tabla III-19:

**Tabla III- 19 Resultados del filtrado**

<b>N° de Tratamiento</b>	<b>Volumen inicial (ml)</b>	<b>Volumen final (ml)</b>	<b>Masa del sedimento (g)</b>
1	510	460	40,67
2	550	510	53,03
3	565	515	42,32
4	585	540	44,76
5	570	515	53,60
6	590	520	53,92
7	600	540	58,97
8	600	550	43,53
9	570	530	54,90
10	560	520	53,13
11	590	550	42,78
12	610	560	45,26

Fuente: Fuente: Elaboración propia, 2024

### 3.1.5. Resultados obtenidos en la etapa de destilación

La última etapa del proceso corresponde a la destilación del mosto fermentado y previamente filtrado. En esta parte del proceso se separó el bioetanol producido con un determinado grado alcohólico y se cuantificó el volumen de producción, estos resultados se describen en la Tabla III-20:

**Tabla III- 20 Resultados de la destilación**

<b>Número de Muestra</b>	<b>Volumen de alimentación (L)</b>	<b>Volumen de la fracción principal (ml)</b>	<b>Grado alcohólico (°GL)</b>
1	8,4	500	53

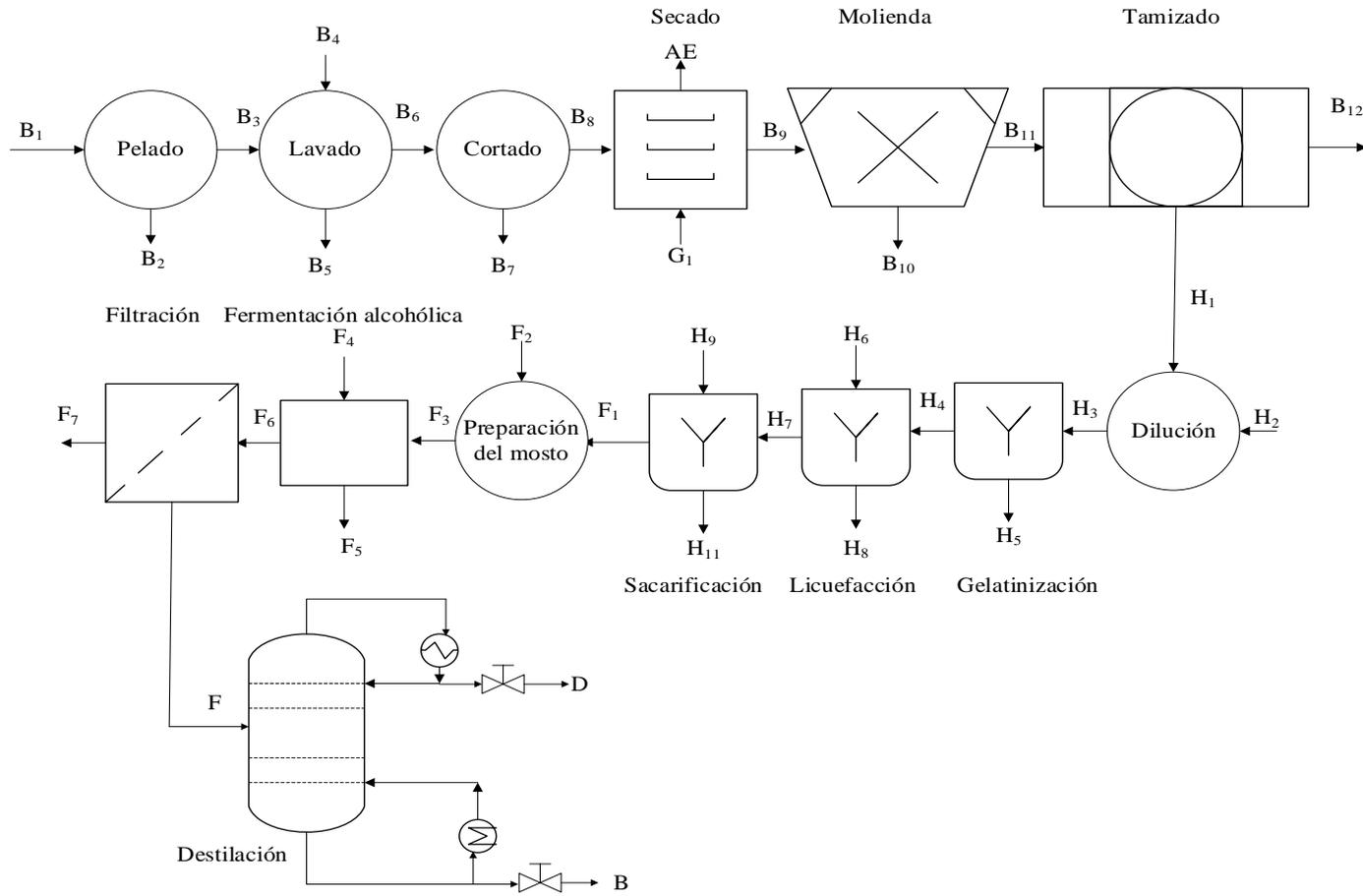
Fuente: Elaboración propia, 2024

Estos resultados obtenidos del proceso de destilación de bioetanol muestran que, a pesar de los esfuerzos por optimizar las condiciones de operación, los datos indican que no se logró alcanzar un grado de pureza requerido para su uso como biocombustible. Las pruebas de destilación, realizadas bajo parámetros controlados, resultaron en un bioetanol con una concentración que aún requiere someterse a un proceso de separación más intensivo y lograr así el grado de pureza esperado.

### **3.2. Balance de materia del proceso de obtención de bioetanol de yuca**

La figura 3-10 muestra el diagrama de flujo global para el proceso de obtención de bioetanol a escala laboratorio a partir de yuca el cual consta de las etapas de pretratamiento de la materia prima, hidrólisis enzimática, fermentación alcohólica y destilación:

**Figura 3- 10 Diagrama de flujo para la obtención de bioetanol de yuca**



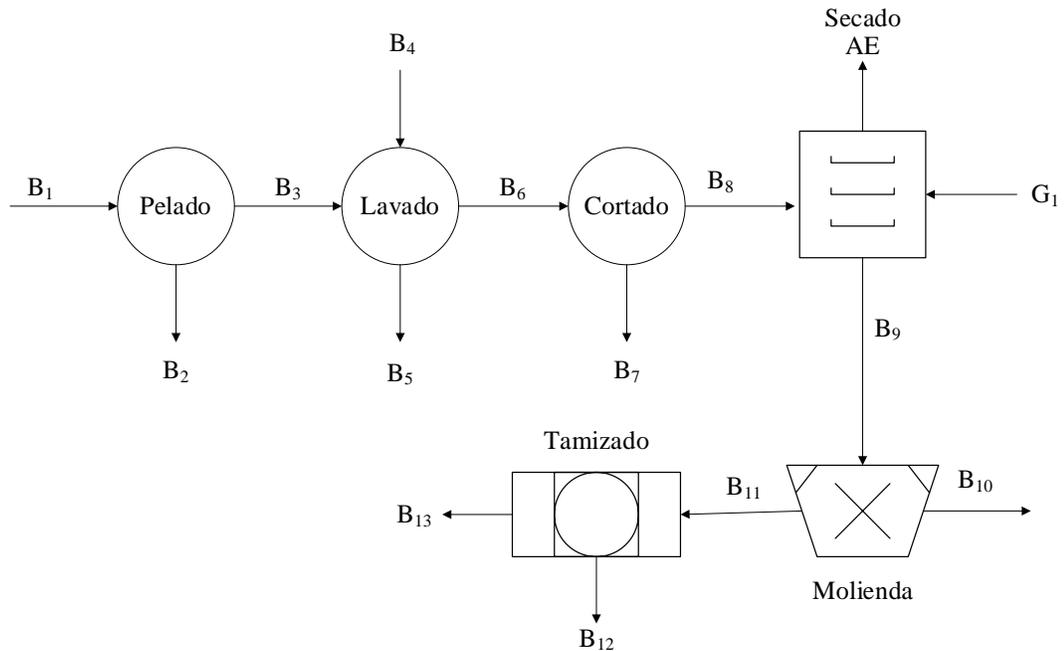
Fuente: Elaboración propia, 2024

Los balances de materia por etapa se desarrollan a continuación:

### 3.2.1. Balance de materia del pretratamiento de la materia prima

Los valores de las corrientes propias de los balances de materia fueron determinados para una base de cálculo de 1 kg de yuca inicial. Su ejecución se llevó según el siguiente diagrama de flujo de la Figura 3-11:

**Figura 3- 11 Balance de materia del pretratamiento**

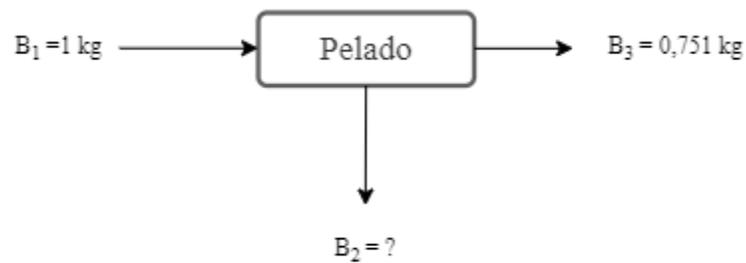


Fuente: Elaboración propia, 2024

#### 3.2.1.1. Balance de materia del pelado

En esta subetapa del pretratamiento de la materia prima, se obtuvo datos en la parte experimental de la investigación que permitieron establecer que la pulpa de yuca pelada fue de 0,751 kg, por lo que el balance de materia resultante se aprecia en la Figura 3-12:

**Figura 3- 12 Balance de materia del pelado de yuca**



Fuente: Elaboración propia, 2024

Donde:

$B_1$  = Cantidad de yuca inicial (kg)

$B_2$  = Cantidad de cáscara de yuca (kg)

$B_3$  = Cantidad de yuca pelada (kg)

La siguiente expresión representa el balance de materia global en la etapa del pelado de la yuca:

$$B_1 = B_2 + B_3 \quad \text{Ecuación (3-6)}$$

Despejando y reemplazando valores en la ecuación (3-4), se tiene la cantidad de cáscara de yuca:

$$B_2 = B_1 - B_3$$

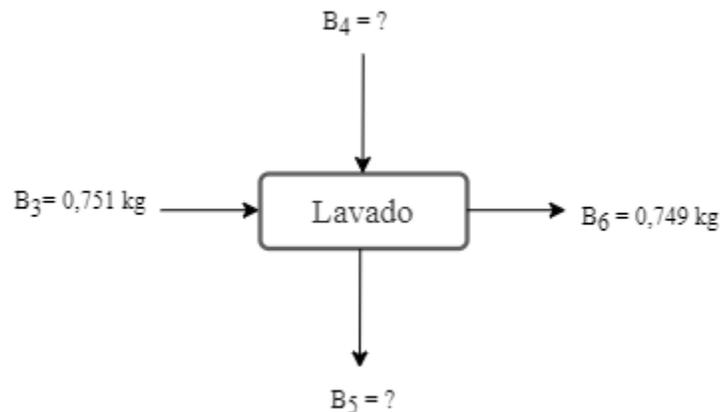
$$B_2 = 1 - 0,751$$

$$B_2 = 0,249 \text{ kg de cascara de yuca}$$

### 3.2.1.2. Balance de materia del lavado

Se procedió a lavar la yuca en una relación másica de 1:1 (agua destilada/ yuca). Por lo cual, la Figura 3-13 muestra el balance de materia en la etapa de lavado:

**Figura 3- 13 Balance de materia del lavado**



Fuente: Elaboración propia, 2024

Donde:

$B_3$  = Cantidad de yuca pelada (kg)

$B_4$  = Cantidad de agua destilada (kg)

$B_5$  = Cantidad de agua residual (kg)

$B_6$  = Cantidad de yuca lavada (kg)

La siguiente expresión representa el balance de materia global en la etapa del lavado de la yuca:

$$B_3 + B_4 = B_5 + B_6 \quad \text{Ecuación (3-7)}$$

Como se trabajó con una relación 1:1 de cantidad de agua destilada y yuca se tiene la siguiente expresión:

$$\frac{B_3}{B_4} = \frac{1 \text{ kg}}{1 \text{ kg}}$$

Entonces:

$$B_3 = B_4 = 0,751 \text{ kg de agua destilada}$$

Despejando y reemplazando valores en la ecuación (3- 7), se tiene la cantidad de agua residual:

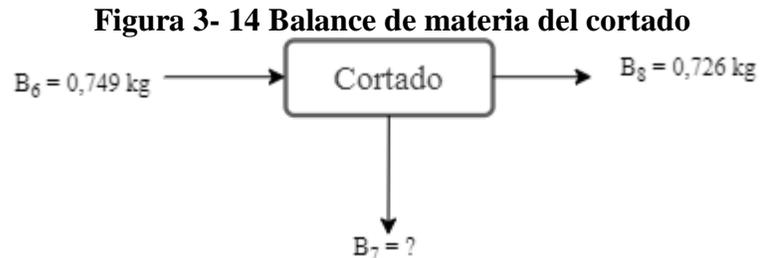
$$B_5 = B_3 + B_4 - B_6$$

$$B_5 = 0,751 + 0,751 - 0,749$$

$$B_5 = 0,753 \text{ kg de agua residual}$$

### 3.2.1.3. Balance de materia del cortado

La cantidad de yuca proveniente del lavado fue 0.749 kg, en la figura 3-14 se muestra el balance de esta subetapa:



Fuente: Elaboración propia, 2024

Donde:

$B_6$  = Cantidad de yuca lavada (kg)

$B_7$  = Cantidad de pérdidas de yuca (kg)

$B_8$  = Cantidad de yuca cortada (kg)

El balance global de materia de la etapa de cortado está expresado de la siguiente manera:

$$B_6 + B_7 = B_8 \quad \text{Ecuación (3-8)}$$

Despejando y reemplazando valores en la ecuación (3-8) se tiene la cantidad de pérdidas de yuca:

$$B_7 = B_6 - B_8$$

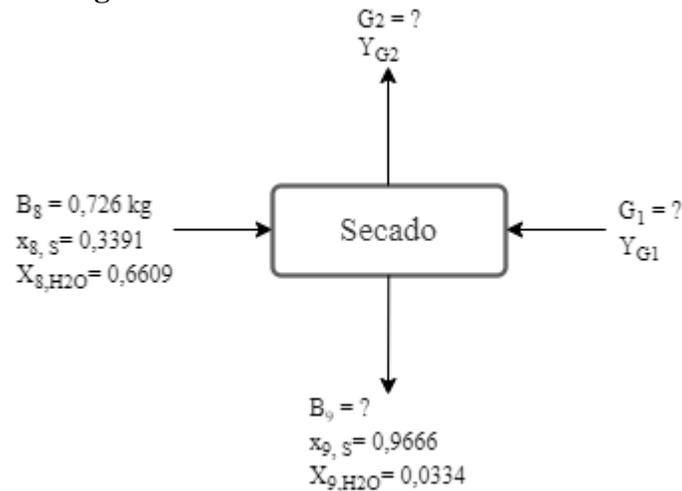
$$B_7 = 0,749 - 0,726$$

$$B_7 = 0,023 \text{ kg de pérdidas}$$

### 3.2.1.4. Balance de materia del secado

En la figura 3-15 se observa el balance de materia en la etapa de secado de la yuca, cuyo peso inicial fue de 0,726 kg y un contenido de humedad inicial en base húmeda de 66,09%, determinado en el Centro de Análisis, Investigación y Desarrollo (ver Tabla II-1) y al finalizar el secado, la humedad contenida en la materia prima fue de 3,34%.

**Figura 3- 15 Balance de materia del secado**



Fuente: Elaboración propia, 2024

Donde:

$B_8$  = Cantidad de yuca cortada (kg)

$B_9$  = Cantidad de yuca seca (kg)

$x_{8,s}$  = Fracción sólida de yuca

$x_{9,s}$  = Fracción sólida de yuca seca

El balance de materia global de la etapa de secado es el siguiente:

$$B_8 + G_1 = B_9 + G_2 \quad \text{Ecuación (3-9)}$$

La siguiente ecuación establece el balance parcial para componentes sólidos en la etapa de secado de la materia prima:

$$B_8 * x_{8,s} = B_9 * x_{9,s}$$

$$0,726 * 0,3391 = B_9 * 0,9666$$

$$B_9 = 0,255 \text{ kg de yuca seca}$$

Mientras que, el balance parcial en base seca en la etapa de secado se representa en la siguiente expresión:

$$B_8 * X_8 + G_1 * Y_{G1} = B_9 * X_9 + G_2 * Y_{G2}$$

$B_8$  = Caudal másico de sólido seco (kg sólido seco/h)

$B_9$  = Caudal másico de sólido seco (kg sólido seco/h)

$G_1$  = Caudal másico de aire seco a la entrada del secador (kg/ aire seco/h)

$G_2$  = Caudal másico de aire seco a la salida del secador (kg aire seco/h)

$X$  = Humedad del producto (kg agua/ kg sólido seco)

$Y$  = Humedad del aire (kg agua / kg aire seco)

Para realizar el cálculo de la cantidad de aire seco que circula en el secador se realizó la consideración de un sistema abierto, es decir:

$$G_1 = G_2 = G$$

$$B_8 = B_9 = B$$

De esta manera, reemplazando las variables en la ecuación (3-11) se logra establecer la siguiente expresión:

$$B * X_8 + G * Y_{G1} = B * X_9 + G * Y_{G2} \quad \text{Ecuación (3-10)}$$

Dividiendo la ecuación entre el caudal másico de sólido  $B$  y ordenando, se tiene la ecuación:

$$\frac{G * Y_{G2}}{B} - \frac{G * Y_{G1}}{B} = X_8 - X_9 \quad \text{Ecuación (3-11)}$$

Posteriormente realizando las reducciones pertinentes de la anterior ecuación, se tiene como resultado una expresión que permite determinar la cantidad de aire seco en la etapa de secado:

$$G = \frac{B(X_8 - X_9)}{Y_{G2} - Y_{G1}} \quad \text{Ecuación (3-12)}$$

El contenido de humedad en base seca de yuca en la etapa inicial de secado se calculó de la siguiente ecuación:

$$X = \frac{x_{agua}}{x_{sólido}} \quad \text{Ecuación (3-13)}$$

$$X_8 = \frac{0,6609}{0,3391}$$

$$X_8 = 1,949 \text{ kg agua / kg sólido seco}$$

Por otro lado, el contenido de humedad en base seca al final de la etapa de secado es:

$$X_9 = \frac{0,0334}{0,9666}$$

$$X_9 = 0,0345 \text{ kg agua / kg sólido seco}$$

Para llevar a cabo la determinación de las propiedades psicométricas del aire en el secador de tiro forzado, fueron necesarias dos consideraciones, la primera es referente a la altura de trabajo cuyo valor es de 1866 msnm en la ciudad de Tarija, y la segunda respecto a la medición de los datos de temperatura de bulbo seco y bulbo húmedo que fueron medidos a la entrada y salida del equipo de secado. Estos valores fueron introducidos al software y los resultados se muestran en la Tabla III-21.

**Tabla III- 21 Propiedades psicométricas del aire**

<b>Propiedades</b>	<b>Unidades</b>	<b>Aire frio</b>	<b>Aire saturado</b>
Temperatura de bulbo seco	°C	20	40
Temperatura de bulbo húmedo	°C	15	26
Humedad Relativa	%	61	35
Humedad absoluta	kg agua /kg aire seco	0,011	0,021
Presión parcial de vapor de agua	kPa	1,446	2,644

Fuente: Elaboración propia, 2024

Considerando los resultados expuestos en la tabla precedente, se procedió a calcular la cantidad de aire seco en la etapa de secado de yuca, tal como se detalla a continuación:

$$G = \frac{0,255 * (1,949 - 0,0345)}{0,021 - 0,011}$$

$$G = 48,819 \text{ kg de aire seco}$$

Finalmente, para cuantificar la cantidad de agua evaporada durante el secado de la materia prima, se utilizó la siguiente expresión:

$$AE = B * (X_8 - X_9) \text{ Ecuación (3-14)}$$

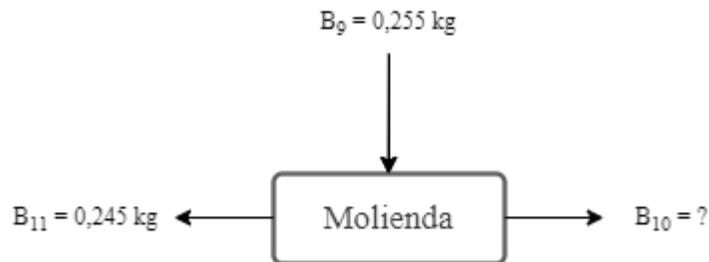
$$AE = 0,255 * (1,949 - 0,0345)$$

$$AE = 0,488 \text{ kg de agua evaporada}$$

### 3.2.1.5. Balance de materia de la molienda

En este proceso se llevó a cabo la disminución del tamaño de partícula de la materia prima, las corrientes que componen el proceso y el balance de materia de este se observan en la Figura 3-16:

**Figura 3- 16 Balance de materia de la molienda**



Fuente: Elaboración propia, 2024

Donde:

$B_9$  = Cantidad de yuca seca (kg)

$B_{10}$  = Cantidad retenida de yuca seca molida (kg)

$B_{11}$  = Cantidad de yuca seca molida (kg)

La siguiente expresión representa el balance de materia global en la etapa de molienda de la yuca:

$$B_9 = B_{10} + B_{11} \quad \text{Ecuación (3-15)}$$

Despejando y reemplazando los valores en la ecuación (3-15), se tiene la cantidad retenida de yuca:

$$B_{10} = B_9 - B_{11}$$

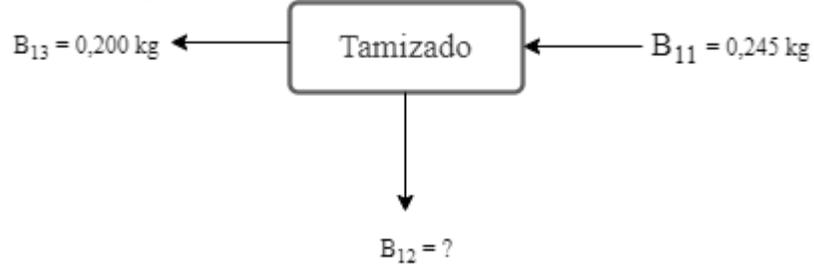
$$B_{10} = 0,255 - 0,245$$

$$B_{10} = 0,01 \text{ kg de pérdida de yuca seca}$$

### 3.2.1.6. Balance de materia del tamizado

Esta subetapa tiene el propósito de uniformar el tamaño de partícula de yuca seca molida, el tamizado se llevó a cabo sin reutilizar la masa retenida de materia prima por el contenido de fibra, el balance de materia se aprecia en la Figura 3-17:

**Figura 3- 17 Balance de materia del tamizado**



Fuente: Elaboración propia, 2024

Donde:

$B_{11}$  = Cantidad de yuca seca molida (kg)

$B_{12}$  = Cantidad retenida de yuca molida (kg)

$B_{13}$  = Cantidad de yuca seca tamizada (kg)

La siguiente ecuación representa el balance de materia global en la etapa de tamizado de yuca seca molida:

$$B_{11} = B_{12} + B_{13} \quad \text{Ecuación (3-16)}$$

Despejando y reemplazando valores en la ecuación (3-16), se tiene la cantidad de yuca tamizada:

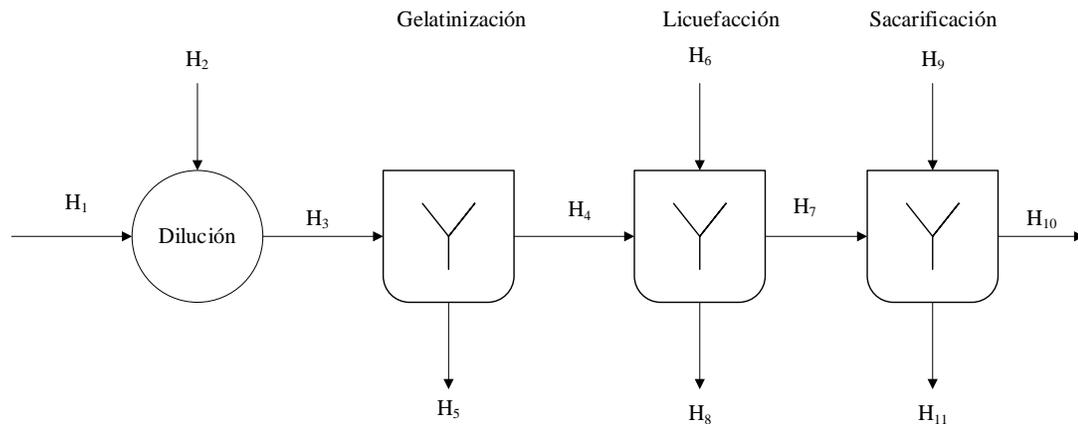
$$B_{12} = B_{11} - B_{13}$$

$$B_{12} = 0,253 - 0,200 \text{ kg}$$

$$B_{12} = 0,052 \text{ kg de yuca seca molida retenida}$$

### 3.2.2. Balance de materia de la hidrólisis enzimática

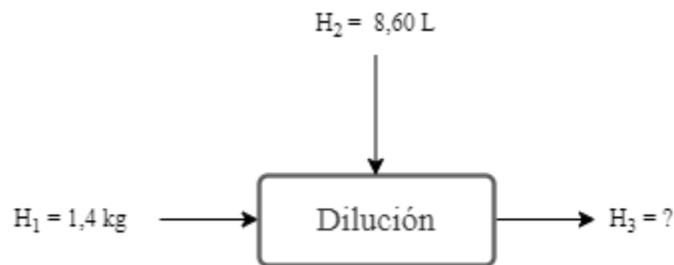
Para la hidrólisis enzimática se trabajó con 1400 g de yuca molida y 8600 ml de agua destilada. Su ejecución se llevó según el siguiente diagrama de flujo de la Figura 3-18:

**Figura 3- 18 Balance de materia de la hidrólisis enzimática**

Fuente: Elaboración propia, 2024

**3.2.2.1. Balance de materia de la dilución**

Para la hidrólisis enzimática se trabajó con 1400 g de yuca molida y 8600 ml de agua destilada. La figura 3-19 muestra el proceso del balance de materia en la etapa de dilución.

**Figura 3- 19 Balance de materia de la dilución**

Fuente: Elaboración propia, 2024

Donde:

 $H_1$  = Cantidad de sustrato (kg) $H_2$  = Cantidad de agua destilada (kg) $H_3$  = Cantidad de solución preparada (kg)

La siguiente ecuación representa el balance de materia global en la etapa de dilución:

$$H_1 + H_2 = H_3 \quad \text{Ecuación (3- 17)}$$

La siguiente expresión representa la cantidad de agua destilada es:

$$H_2 = V * \rho \quad \text{Ecuación (3-18)}$$

$$H_2 = 8,60 \text{ L} * 1 \text{ kg/L}$$

$$H_2 = 8,60 \text{ kg agua destilada}$$

Reemplazando valores en la ecuación (3-17), se tiene la cantidad de dilución preparada:

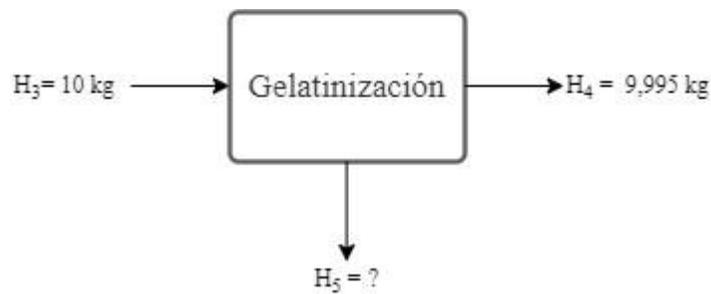
$$H_3 = 1,4 + 8,6$$

$$H_3 = 10 \text{ kg de solución}$$

### 3.2.2.2. Balance de materia de la gelatinización

En la figura 3-20 se muestra el balance de materia en la etapa de gelatinización partiendo de 10 kg de dilución.

**Figura 3- 20 Balance de materia de gelatinización**



Fuente: Elaboración propia, 2024

Donde:

$H_3$  = Cantidad de dilución preparada (kg)

$H_4$  = Cantidad de solución gelatinizada (kg)

$H_5$  = Cantidad de vapor generado en la etapa de gelatinización (kg)

La siguiente ecuación representa el balance de materia global en la etapa de gelatinización:

$$H_3 = H_4 + H_5 \quad \text{Ecuación (3-19)}$$

Despejando y reemplazando los valores en la ecuación (3-19), se tiene la cantidad de vapor generado:

$$H_5 = H_3 - H_4$$

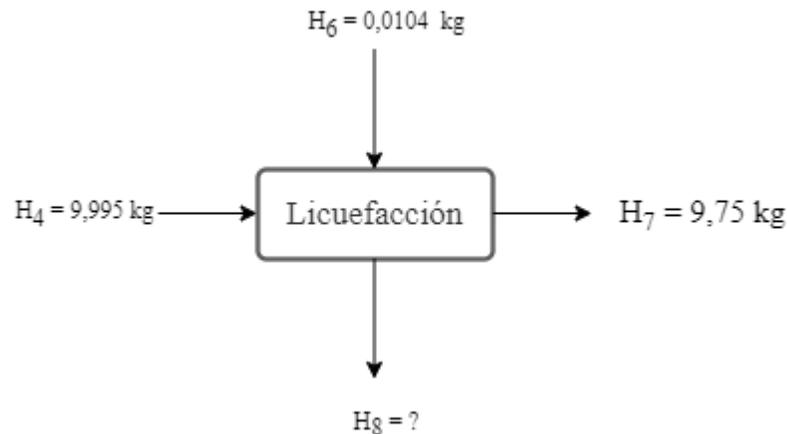
$$H_5 = 10 - 9,995$$

$H_5 = 0,005$  kg de vapor generado en la etapa de gelatinización

### 3.2.2.3. Balance de materia de la licuefacción

En la figura 3-21 se muestra el balance de materia en la etapa de licuefacción.

**Figura 3- 21 Balance de materia en la licuefacción**



Fuente: Elaboración propia, 2024

Donde:

$H_4$  = Cantidad de dilución gelatinizada (kg)

$H_6$  = Corriente de dosificación en la etapa de licuefacción (kg)

$H_7$  = Cantidad de producto de licuefacción (kg)

$H_8$  = Cantidad de agua desprendida en la etapa de licuefacción (kg)

En la corriente  $H_5$  ingresa 0,4 g de  $\text{CaCl}_2$  y 10 g de enzima  $\alpha$ -amilasa haciendo un total de 10,4 g = 0,0104 kg

La siguiente ecuación representa el balance de materia global en la etapa de licuefacción:

$$H_4 + H_6 = H_7 + H_8 \quad \text{Ecuación (3-20)}$$

Despejando y reemplazando valores en la ecuación (3-20), se tiene la cantidad de agua desprendida:

$$H_8 = H_4 + H_6 - H_7$$

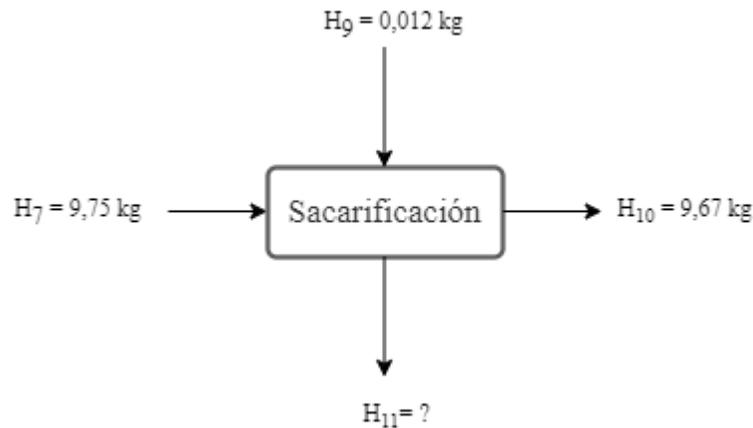
$$H_8 = 9,995 + 0,0104 - 9,75$$

$$H_8 = 0,2554 \text{ kg agua desprendida}$$

### 3.2.2.4. Balance de materia de la sacarificación

En la Figura 3-22 se observa el balance de materia en la etapa de sacarificación.

**Figura 3- 22 Balance de materia de la sacarificación**



Fuente: Elaboración propia, 2024

Donde:

$H_7$  = Cantidad de producto de licuefacción (kg)

$H_9$  = Corriente de dosificación en la etapa de licuefacción (kg)

$H_{10}$  = Cantidad de producto de sacarificación (kg)

$H_{11}$  = Cantidad de agua desprendida en la etapa de sacarificación (kg)

En la corriente de dosificación ingresa  $12 \text{ g} = 0,012 \text{ kg}$  de enzima glucoamilasa.

El balance global de materia de la etapa de sacarificación está expresado de la siguiente manera:

$$H_7 + H_9 = H_{10} + H_{11} \quad \text{Ecuación (3-21)}$$

Despejando y reemplazando valores en la ecuación (3-21), se tiene la cantidad de agua desprendida:

$$H_{11} = H_7 + H_9 - H_{10}$$

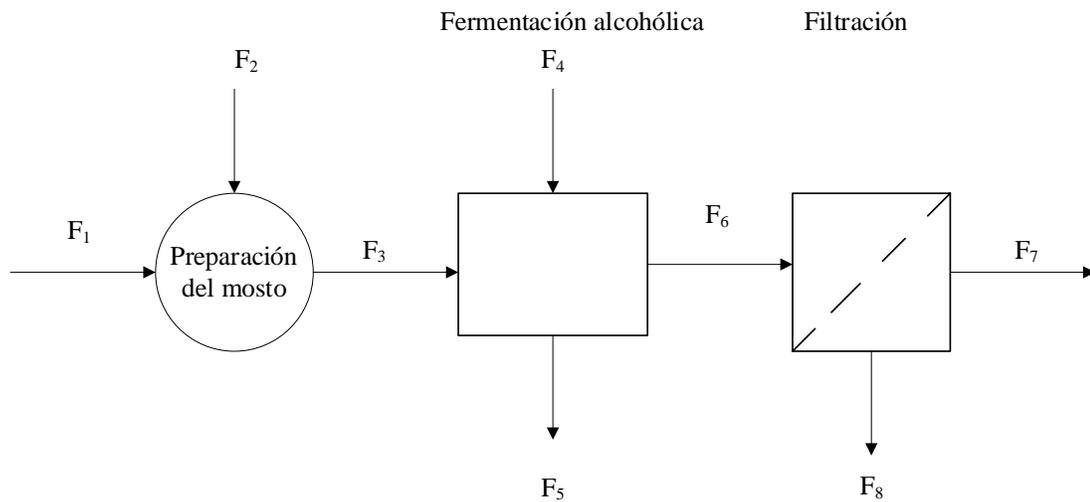
$$H_{11} = 9,75 + 0,012 - 9,67$$

$$H_{11} = 0,092 \text{ kg agua desprendida}$$

### 3.2.3. Balance de materia para la fermentación alcohólica

El balance de materia para la etapa de fermentación alcohólica se ejecutó de acuerdo con la figura 3-23 que muestra el diagrama de flujo para obtener el fermento.

**Figura 3- 23 Balance de materia para la fermentación alcohólica**



Fuente: Elaboración propia, 2024

### 3.2.4. Balance de materia de preparación del mosto

En la figura 3-24 se muestra el balance de materia en la etapa de preparación del mosto para llevar a cabo la fermentación alcohólica, se inició con 9,67 kg de producto hidrolizado y 3 g de fosfato de amonio.

**Figura 3- 24 Balance de materia en la preparación del mosto**



Fuente: Elaboración propia, 2024

Donde:

$F_1$  = Cantidad de producto hidrolizado (kg)

$F_2$  = Cantidad de fosfato de amonio (kg)

$F_3$  = Cantidad de mosto preparado (kg)

El balance global de materia de la etapa de preparación del mosto está expresado de la siguiente manera:

$$F_1 + F_2 = F_3 \quad (\text{Ecuación 3-22})$$

Reemplazando valores en la ecuación (3-22):

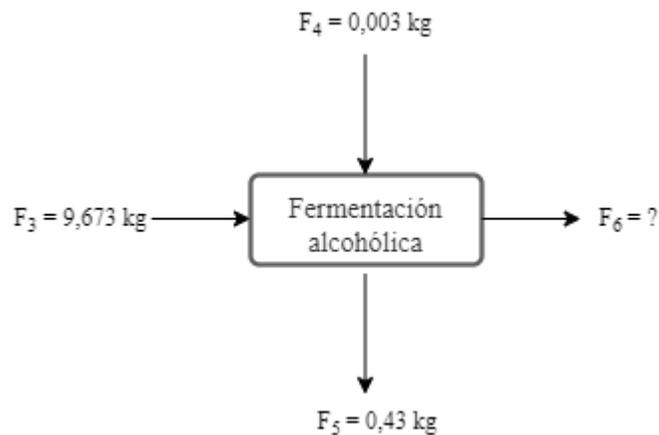
$$F_3 = 9,67 + 0,003$$

$$F_3 = 9,673 \text{ kg de mosto}$$

### 3.2.5. Balance de materia de la fermentación alcohólica

En la figura 3-25 se aprecia el balance de materia de la fermentación alcohólica del mosto preparado, para lo cual es necesario activar la levadura *Saccharomyces cerevisiae* r.f. bayanus de acuerdo con la dosis de empleo se necesita 30 g por cada hectolitro de mosto.

**Figura 3- 25 Balance de materia de la fermentación alcohólica**



Fuente: Elaboración propia, 2024

Donde:

$F_3$  = Cantidad de mosto preparado (kg)

$F_4$  = Cantidad de levadura activada (kg)

$F_5$  = Cantidad de muestra retirada para las mediciones (kg)

$F_6$  = Cantidad de producto de la fermentación alcohólica (kg)

La corriente  $F_5$  es la cantidad de muestra que se tomó para realizar las mediciones de control de °Brix y pH, mientras que la ecuación para la densidad es:

$$\rho = \frac{m}{V} \quad (\text{Ecuación 3-23})$$

Donde:

$\rho$  = Densidad = 1,024 kg/L (ver Anexo 9).

$m$  = Masa

$V$  = Volumen = 0,42 L

$$F_5 = \rho * V \quad (\text{Ecuación 3-24})$$

$$F_5 = 0,42 \text{ L} * 1,024 \text{ kg/L}$$

$$F_5 = 0,43 \text{ kg muestra}$$

El balance global de materia de la etapa de preparación del mosto está expresado de la siguiente manera:

$$F_3 + F_4 = F_5 + F_6 \quad (\text{Ecuación 3-25})$$

Despejando y reemplazando valores en la ecuación (3-25), se tiene la cantidad de producto de fermentación alcohólica:

$$F_6 = F_3 + F_4 - F_5$$

$$F_6 = 9,673 + 0,01 - 0,43$$

$$F_6 = 9,253 \text{ kg producto fermentado}$$

Con el fin de determinar la cantidad de dióxido de carbono desprendido del proceso de fermentación alcohólica, se debe realizar cálculos estequiométricos mediante la ecuación (3-30).



$$180 \text{ g} \quad 92 \text{ g} \quad 88 \text{ g}$$

Según bibliografía se sabe que 1°Brix es igual a 1 gramo de glucosa en 100 g de solución.

La corriente  $F_6$  es igual a 9,17 kg de mosto el cual tiene una concentración de sólidos solubles igual a 14,5 (ver Tabla III-9). Seguidamente, se determina la cantidad de glucosa presente en el fermentado:

$$m_{\text{glucosa en el mosto}} = 9253 \text{ g} * \frac{14,5 \text{ g}}{100 \text{ g}}$$

$$m_{\text{glucosa en el mosto}} = 1341,685 \text{ g } C_6H_{12}O_6$$

La cantidad de  $CO_2$  desprendido en la etapa de fermentación alcohólica es el siguiente:

$$m_{CO_2} = 1341,685 \text{ g } C_6H_{12}O_6 * \frac{88 \text{ g } CO_2}{180 \text{ g } C_6H_{12}O_6}$$

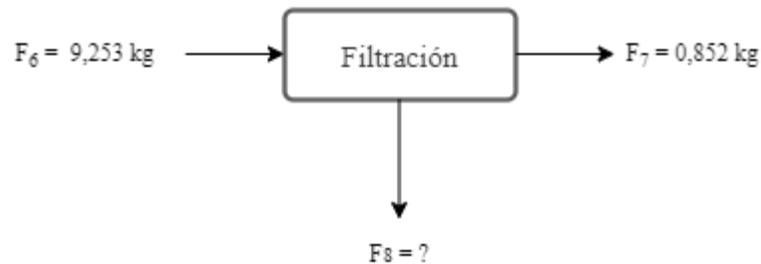
$$m_{CO_2} = 655,934 \text{ g de } CO_2$$

$$m_{CO_2} = 0,6559 \text{ kg } CO_2$$

### 3.2.6. Balance de materia de la filtración

En la figura 3-26, se muestra el balance de materia de filtración del producto fermentado en función al rendimiento obtenido.

**Figura 3- 26 Balance de materia de la filtración**



Fuente: Elaboración propia, 2024

Donde:

$F_6$  = Cantidad de producto la fermentación alcohólica (kg)

$F_7$  = Cantidad de sedimento (kg)

$F_8$  = Cantidad de fermentado filtrado (kg)

El balance global de materia de la etapa de filtración está expresado de la siguiente manera:

$$F_6 = F_7 + F_8 \quad \text{Ecuación (3-27)}$$

Despejando y reemplazando valores en la ecuación (3-27), se tiene la cantidad de fermento filtrado:

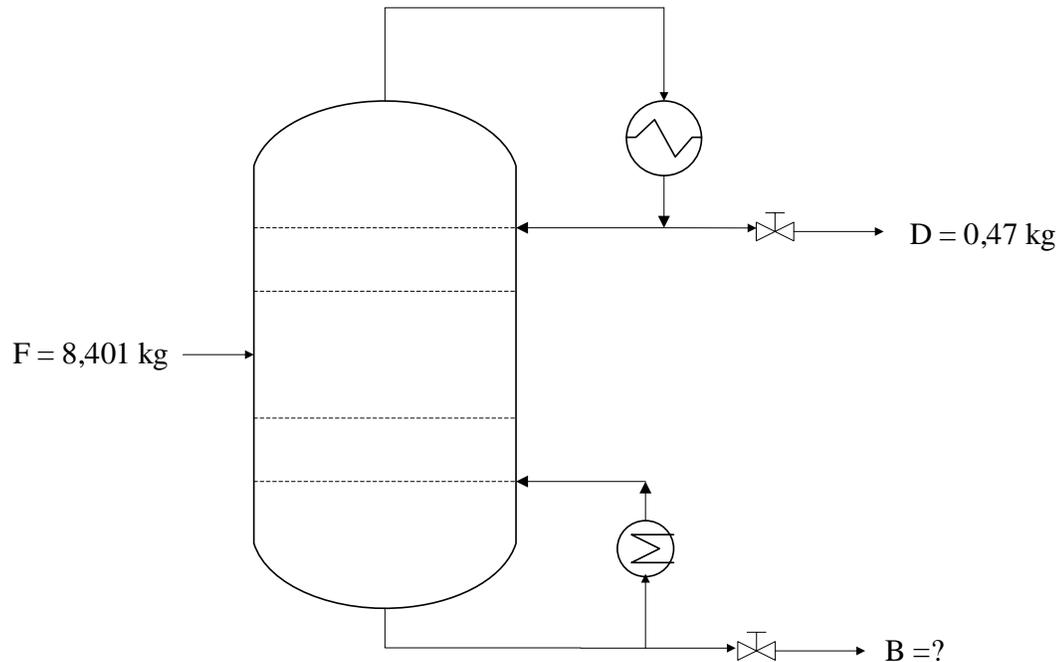
$$F_8 = 9,253 - 0,852$$

$$F_8 = 8,401 \text{ kg de producto filtrado}$$

### 3.2.7. Balance de materia de la destilación

En la figura 3-27 se muestra el balance de materia de la destilación obteniendo un destilado igual a 0,50 L y con un grado alcohólico igual a 53 °GL.

**Figura 3- 27 Balance de materia de la destilación**



Destilación

Fuente: Elaboración propia, 2024

Donde:

F = Cantidad de fermento filtrado (kg)

D= Producto obtenido (kg)

B = Producto de Fondo (kg)

La corriente D es la cantidad de producto total que se obtuvo en el proceso de destilación el cual tiene una densidad de 0,94 kg/L (Ver Anexo 4).

Entonces D expresada en kg:

$$D = 0,500 \text{ L} * 0,94 \text{ kg/L}$$

$$D = 0,47 \text{ kg}$$

El balance global de materia de la etapa de destilación está expresado de la siguiente manera:

$$F = D + B \quad \text{Ecuación (3-28)}$$

Despejando y reemplazando valores en la ecuación (3-28), el producto de fondo es el siguiente:

$$B = F - D$$

$$B = 8,401 - 0,47$$

$$B = 7,931 \text{ kg producto de fondo}$$

El alcohol obtenido tiene un grado alcohólico de 53°GL, por bibliografía se conoce que 1°GL es igual a 1 ml de etanol en 100 ml de solución, por lo tanto:

$$m_{\text{etanol en el fermentado}} = \frac{53 \text{ g}}{100 \text{ ml}} * 500 \text{ ml}$$

$$m_{\text{etanol en el fermentado}} = 265 \text{ g} = 0,265 \text{ kg}$$

$$m_{\text{agua en el fermentado}} = 8,401 - 0,265$$

$$m_{\text{agua en el fermentado}} = 8,136 \text{ kg}$$

Mientras que el porcentaje de etanol en la mezcla:

$$8,401 \text{ kg mezcla} \rightarrow 100\%$$

$$0,265 \text{ kg} \rightarrow X_{\text{etanol}}$$

$$X_{\text{etanol}} = \frac{0,265 \text{ kg} * 100\%}{8,401 \text{ kg}}$$

$$X_{\text{etanol}} = 3,154\% = 0,03154$$

$$X_{\text{agua}} = 96,846\% = 0,968$$

Para calcular la masa de agua, se debe calcular el volumen de agua durante la destilación:

$$V_A = Q * t \text{ Ecuación (3-29)}$$

$$V_A = 4400 \frac{\text{cm}^3}{\text{min}} * 120 \text{ min}$$

$$V_A = 528000 \text{ cm}^3 = 0,528 \text{ m}^3$$

$$\rho_A = 997 \text{ kg/m}^3$$

Entonces la masa de agua de refrigeración:

$$m_{AR} = \rho_A * V_A \text{ Ecuación (3-30)}$$

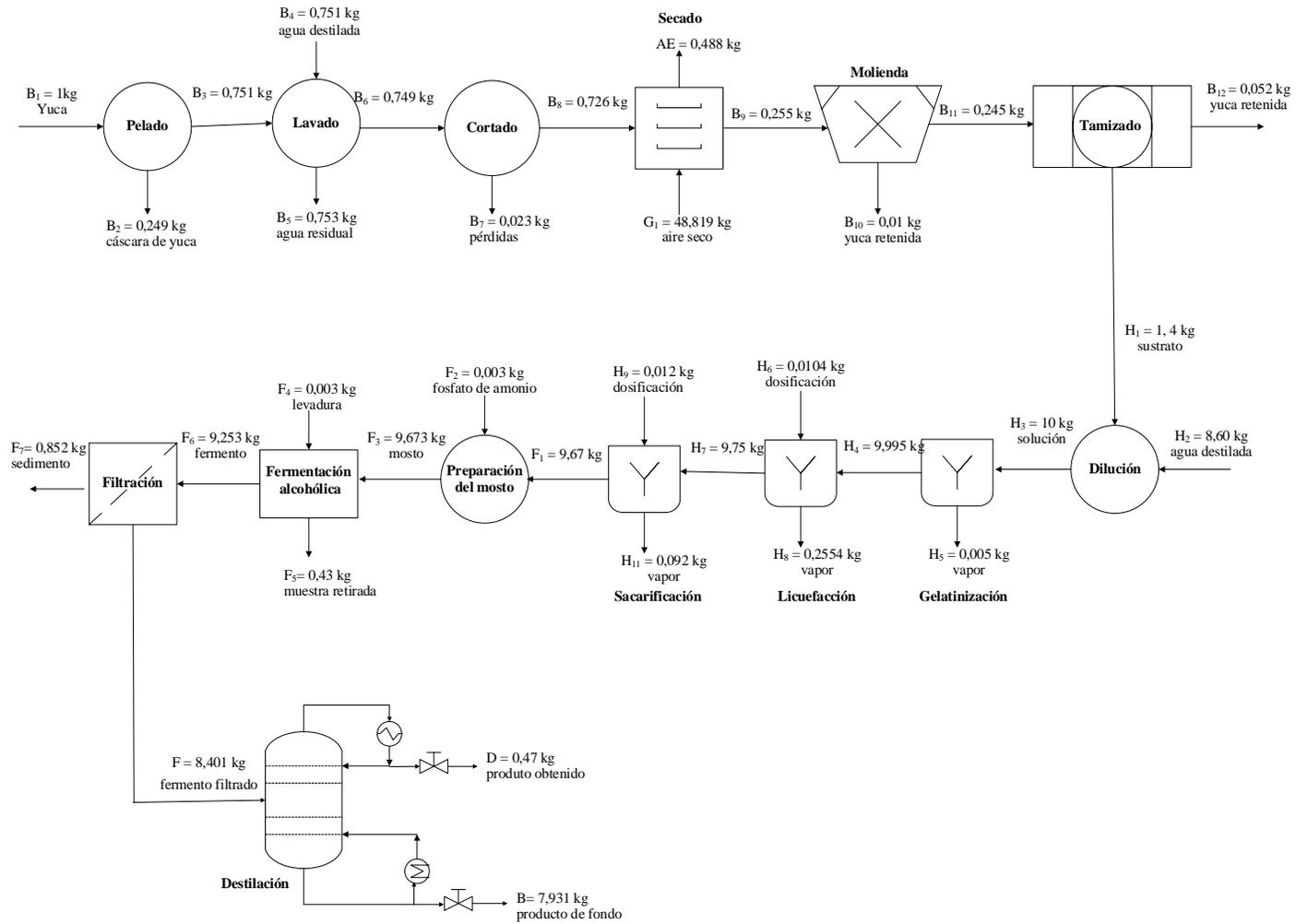
$$m_{AR} = 997 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} * 0,528 \text{ m}^3$$

$$m_{AR} = 526,416 \text{ kg}$$

### 3.3. Balance de materia total del proceso de obtención de bioetanol de yuca

La figura 3-28 muestra el balance de materia total en un diagrama de flujo global para el proceso de obtención de bioetanol a escala laboratorio a partir de yuca, el cual consta de las etapas de pretratamiento de la materia prima, hidrólisis enzimática, fermentación alcohólica y destilación:

**Figura 3- 28** Balance de materia total del proceso



Fuente: Elaboración propia, 2024

### 3.4. Balance de Energía

El balance de energía se calculó para los procesos en los cuales estaban implicados un intercambio de energía dentro del sistema, aplicando la primera ley de la termodinámica, “Ley de la conservación de la energía”. Además, para efectos de cálculo se realizaron algunas consideraciones:

Si la frontera de un sistema no permite el transporte de materia entre el sistema y sus alrededores, entonces se dice que el sistema es cerrado, descrito mediante la siguiente ecuación. (Smith & Abbott, 1996)

$$\Delta E_{\text{Cinética}} + \Delta E_{\text{Potencial}} + \Delta U = Q + W \quad \text{Ecuación (3-31)}$$

Los sistemas cerrados a menudo experimentan procesos donde la de energía cinética y potencial son tan pequeños que pueden considerarse a estos como despreciables, sino solamente en su energía interna. (Smith & Abbott, 1996)

$$\Delta E_{\text{Cinética}} + \Delta E_{\text{Potencial}} = 0 \quad \text{Ecuación (3-32)}$$

Como el sistema se encuentra en un estado estacionario, el volumen del mismo se mantiene constante, por lo cual no se efectúa el trabajo en el sistema. (Smith & Abbott, 1996)

Por lo tanto, la ecuación queda expresada de la siguiente manera:

$$\Delta U = 0 \quad \text{Ecuación (3-33)}$$

$$Q_{\text{cedido}} = Q_{\text{ganado}}$$

Según (Smith & Abbott, 1996), para un sistema estacionario a volumen constante el calor sensible y latente es igual a:

$$Q_{\text{sensible}} = mC_p\Delta T \quad \text{Ecuación (3-34)}$$

$$Q_{\text{latente}} = m*\lambda \quad \text{Ecuación (3-35)}$$

Donde:

$m$  = Masa del componente (kg)

$C_p$  = Capacidad calorífica (kcal/ Kg °C)

$\Delta T$  = Diferencial de temperatura (°C)

$T_f$  = Temperatura final (°C)

$T_i$  = Temperatura inicial (°C)

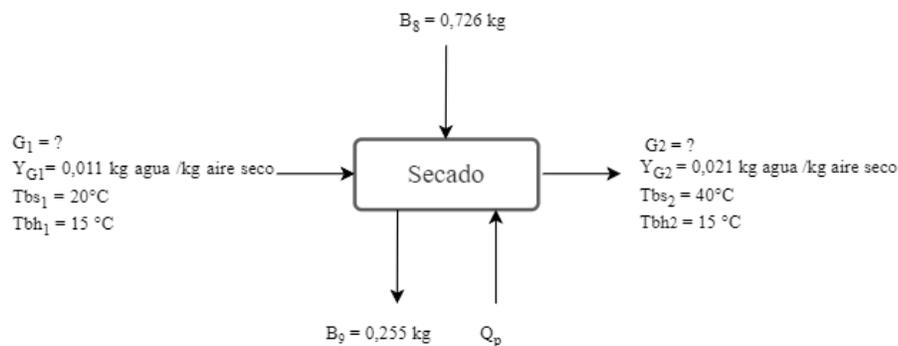
$\lambda$  = Calor latente de vaporización (kcal/kg)

A continuación, se presenta el cálculo de los balances de energía para cada una de las etapas:

### 3.4.1. Balance de energía del secado

En la figura 3- 29 se muestra el balance de energía para determinar caudal másico de aire y cantidad de calor aportado al sistema.

**Figura 3- 29 Balance de energía del secado**



Fuente: Elaboración propia, 2023

Donde:

$B_8$  = Cantidad de yuca cortada (kg)

$B_9$  = Cantidad de yuca seca (kg)

$G_1$  = Caudal másico de aire seco a la entrada del secador (kg/ aire seco/h)

$Y_{G1}$  = Humedad absoluta (kg agua / kg aire seco)

$T_{bs1}$  = Temperatura de bulbo seco a la entrada del secador (°C)

$T_{bh1}$  = Temperatura de bulbo húmedo a la entrada del secador (°C)

$G_2$  = Caudal másico de aire seco a la salida del secador (kg aire seco/h)

$Y_{G2}$  = Humedad absoluta (kg agua / kg aire seco)

$T_{bs2}$  = Temperatura de bulbo seco a la salida del secador (°C)

$T_{bh2}$  = Temperatura de bulbo húmedo a la salida del secador (°C)

El balance combinado de materia y energía en la etapa de secado es el siguiente:

$$B_8H_8 + G_1H_{G1} + Q_P = B_9H_9 + G_2H_{G2} \quad \text{Ecuación (3-36)}$$

Considerando un sistema abierto se tiene:

$$G_1 = G_2 = G$$

$$B_8 = B_9 = B$$

Reemplazando variables en la ecuación (3-36), se tiene:

$$BH_8 + GH_{G1} + Q_P = BH_9 + GH_{G2} \quad \text{Ecuación (3-37)}$$

Donde:

G = Cantidad de aire (kg aire seco)

C = Cantidad de producto (kg)

H<sub>8</sub> = Entalpía del producto al ingreso del secador (kJ/kg sólido seco)

H<sub>9</sub> = Entalpía del producto a la salida del secador (kJ/kg sólido seco)

H<sub>G1</sub> = Entalpía del aire al ingreso del secador (kJ/kg sólido seco)

Q<sub>P</sub> = Calor aportado al sistema (kJ)

Despejando Q<sub>P</sub> y ordenando las variables de la ecuación (3-37), se tiene:

$$Q_P = G (H_{G2} - H_{G1}) + C (H_9 - H_8) \quad \text{Ecuación (3-38)}$$

Para el cálculo de la entalpía del aire, se tomó en cuenta la ecuación (3-45), mencionada por (Singh & Heldman, 2009).

$$H_a = C_s (T_a - T_0) + YH_L \quad \text{Ecuación (3-39)}$$

Donde:

C<sub>s</sub> = Calor húmedo (KJ/kg de aire seco °C)

T<sub>a</sub> = Temperatura del aire °C

T<sub>0</sub> = Temperatura de referencia, igual a 0°C

Y = Humedad absoluta (kg agua /kg de aire seco)

H<sub>L</sub> = Calor latente de vaporización del agua (kJ/kg de agua)

Para calcular el calor húmedo del aire, se tomó en cuenta la ecuación (3-46) mencionada por (Singh & Heldman, 2009), donde el calor específico del aire seco es de 1,005 kJ/kg aire seco °C y el calor específico para el agua 1,88 kJ/kg agua °C.

$$C_s = 1,005 + 1,88Y \quad \text{Ecuación (3-40)}$$

Reemplazo la ecuación (3-39) en (3-40), se tiene:

$$H_a = (1,005 + 1,88Y) (T_a - T_0) + YH_L \quad \text{Ecuación (3-41)}$$

Ajustando los datos de la ecuación (3-41) a presión de la ciudad de Tarija 610 mmHg, se obtiene el calor específico del aire seco 0,81 kJ/kg aire seco °C y el calor específico para el agua 1,51 kJ/kg agua °C, mencionado por (López, 2021) por consiguiente la ecuación esta expresada de la siguiente manera:

$$H_a = (0,81 + 1,51Y) (T_a - T_0) + YH_L \quad \text{Ecuación (3-42)}$$

Los datos para determinar la entalpia del aire a la entrada del secador son:

$$H_L = 2453,5 \text{ kJ/kg entalpia del agua a } 20 \text{ °C (ver Anexo 7)}$$

$$Y_{G1} = 0,011 \text{ kg agua /kg aire seco}$$

$$T_{G1} = 20 \text{ °C}$$

$$T_0 = 0 \text{ °C}$$

Reemplazando los datos en la ecuación (3-42), para determinar la entalpia del aire a la entrada del secador.

$$H_{G1} = \left(0,81 \frac{\text{kJ}}{\text{kg } ^\circ\text{C}} + 1,51 \frac{\text{kJ}}{\text{kg } ^\circ\text{C}} * 0,011 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}\right) (20 - 0) \text{ °C} + 0,011 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} * 2453,5 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$

$$H_{G1} = 43,520 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$

Los datos para determinar la entalpia del aire a la salida del secador son:

$$H_L = 2406,0 \text{ kJ/kg entalpia del agua a } 40 \text{ °C (ver Anexo 9)}$$

$$Y_{G2} = 0,021 \text{ kg agua /kg aire seco}$$

$$T_{G2} = 40 \text{ °C}$$

$$T_0 = 0 \text{ °C}$$

Reemplazando datos en la ecuación (3-42), para determinar la entalpia del aire a la salida del secador.

$$H_{G2} = \left(0,81 \frac{kJ}{kg \cdot ^\circ C} + 1,51 \frac{kJ}{kg \cdot ^\circ C} * 0,021 \frac{kJ}{kg}\right) (40 - 0)^\circ C + 0,021 \frac{kJ}{kg} * 2406,0 \frac{kJ}{kg}$$

$$H_{G2} = 84,194 \frac{kJ}{kg}$$

La entalpía del producto se calculó con la siguiente ecuación:

$$H_P = C_{P_P}(T_P - T_0) + X_P * C_{P_X}(T_P - T_0) \quad \text{Ecuación (3-43)}$$

Donde:

$C_{P_P}$  = Calor específico del producto (KJ/kg °K)

$T_P$  = Temperatura del producto (°K)

$X_P$  = Humedad del producto (kg agua/kg sólido seco)

$C_{P_X}$  = Calor específico del agua (KJ/kg agua °K)

Por otro lado, para calcular el calor específico de cualquier tipo de alimento, se procede a partir de la ecuación (3-50) citada por (Singh & Heldman, 2009).

$$C_{P_P} = x_c * C_{p_c} + x_r * C_{p_r} + x_g * C_{p_g} + x_f * C_{p_f} + x_a * C_{p_a} + x_w * C_{p_w} \quad \text{Ecuación (3-44)}$$

Donde los datos fueron extraídos de (Lewis, 1993):

$C_{p_c}$  = Calor específico de los carbohidratos = 1,4 kJ/kg °K

$C_{p_r}$  = Calor específico de las proteínas = 1,6 kJ/kg °K

$C_{p_g}$  = Calor específico de las grasas = 1,7 kJ/kg °K

$C_{p_f}$  = Calor específico de la fibra = 1,5 kJ/kg °K

$C_{p_a}$  = Calor específico de las cenizas = 0,8 kJ/kg °K

$C_{p_w}$  = Calor específico del agua = 4,18 kJ/kg °K

$x_c$  = Fracción másica de los carbohidratos

$x_r$  = Fracción másica de la proteína

$x_g$  = Fracción másica de la grasa

$x_f$  = Fracción másica de la fibra

$x_a$  = Fracción másica de las cenizas

$x_w$  = Fracción másica del agua

Reemplazando los valores en la ecuación (3-43), se tiene la siguiente expresión:

$$C_{P_P} = x_c * 1,4 + x_r * 1,6 + x_g * 1,7 + x_f * 1,5 + x_a * 0,8 + x_w * 4,18 \quad \text{Ecuación (3-45)}$$

La tabla III-22 muestra los datos de la composición fisicoquímica de la yuca, estos valores son utilizados para calcular el calor específico de la yuca.

**Tabla III- 22 Composición fisicoquímica de la yuca**

Parámetro	Símbolo	Fracción másica
Hidratos de carbono	$x_c$	0,3061
Proteína	$x_r$	0,0212
Grasa	$x_g$	0,002
Fibra	$x_f$	0,0118
Ceniza	$x_a$	0,0104
Humedad	$x_w$	0,6603

Fuente: Elaboración propia, 2024

Reemplazando valores de tabla III-9, en la ecuación (3-45) se tiene la siguiente expresión:

$$C_p = 0,3061 * 1,4 + 0,0212 * 1,6 + 0,0212 * 1,7 + 0,0118 * 1,5 + 0,0104 * 0,8 + 0,6603 * 4,18$$

$$C_p = 3,284 \frac{kJ}{kg \text{ } ^\circ K}$$

Con la ecuación (3,43), se tiene la entalpia de la muestra de la yuca en la entrada del secador:

$$H_8 = 3,284 \frac{kJ}{kg \text{ } ^\circ K} * (293,15 - 0)^\circ K + 1,949 \frac{kg}{kg} * 4,18 \frac{kJ}{kg \text{ } ^\circ K} * (293,15 - 0)^\circ K$$

$$H_8 = 3350,944 \frac{kJ}{kg}$$

Para calcular el calor específico de la yuca seca, reemplazando datos en la ecuación (3-43).

$$C_{pp} = 0,54 \text{ cal/g } ^\circ C = 4,1868 \text{ kJ/kg } ^\circ K \text{ (Beltran \& Hoyos, 2005)}$$

$$T_p = 313,15 \text{ } ^\circ K$$

$$H_7 = 4,1868 \frac{kJ}{kg \text{ } ^\circ K} (313,15 - 0)^\circ K + 0,0345 \frac{kg}{kg} * 4,18 \frac{kJ}{kg \text{ } ^\circ K} * (313,15 - 0)^\circ K$$

$$H_7 = 1364,629 \frac{kJ}{kg}$$

Reemplazando datos en la ecuación (3-38), se tiene:

$$Q_P = 48,819 \text{ kg} * \left(84,194 \frac{kJ}{kg} - 43,520 \frac{kJ}{kg}\right) - 0,255 \text{ kg} * \left(1364,629 \frac{kJ}{kg} - 3350,944 \frac{kJ}{kg}\right)$$

$$Q_P = 2492,174 \text{ kJ}$$

El calor necesario para la etapa de secado de la yuca es de 2492,174 kJ.

### 3.4.2. Balance de energía de la gelatinización

Para calcular la energía requerida en la etapa de gelatinización, se debe determinar el calor sensible debido al calentamiento del agua desde 20°C hasta 65°C con la presencia de la yuca seca molida, esta etapa se realizó en un baño María. En la figura 3-29 se muestra el sistema utilizado para la etapa de gelatinización.

**Figura 3- 30 Balance de energía de la gelatinización**



Fuente: Elaboración propia, 2024

La siguiente expresión representa el balance de energía global en la etapa de gelatinización:

$$Q_G = Q_{SG} + Q_{LG} \quad \text{Ecuación (3-46)}$$

Donde:

$Q_G$  = Calor total que se requiere en el proceso de gelatinización (kJ)

$Q_{SG}$  = Calor sensible de gelatinización (kJ)

$Q_{LG}$  = Calor latente para evaporar el agua en la etapa de gelatinización (kJ)

Partiendo de la ecuación (3-34), el calor sensible requerido para la etapa de gelatinización es:

$$Q_{SG} = m_1 * C_{p1} * (T_f - T_i) + m_2 * C_{p2} * (T_f - T_i) \quad \text{Ecuación (3-47)}$$

Donde los datos son:

$m_1$  = masa de la yuca seca molida = 1,4 kg

$C_{p1}$  = Capacidad calorífica de la yuca = 0,54 cal/g °C = 0,54 kcal/kg °C (Beltran & Hoyos, 2005)

$m_2$  = masa del agua presente en la gelatinización = 8,60 kg

$C_{p2}$  = Capacidad calorífica del agua = 1 kcal/kg °C (Smith, Van Ness, & Abbott, 1996)

Reemplazando valores en la ecuación (3-47):

$$Q_{SG} = 1,4 \text{ kg} * 0,54 \frac{\text{kcal}}{\text{kg}^\circ\text{C}} * (65-20)^\circ\text{C} + 8,60 \text{ kg} * 1 \frac{\text{kcal}}{\text{kg}^\circ\text{C}} * (65-20)^\circ\text{C}$$

$$Q_{SG} = 421,02 \text{ kcal} = 1761,55 \text{ kJ}$$

Partiendo de la ecuación (3-35), el calor latente para vaporar el agua en la etapa de gelatinización es:

$$Q_{LG} = m_3 * \lambda \quad \text{Ecuación (3-48)}$$

Donde los datos son:

$m_3$  = masa de vapor de agua = 0,005 kg

$\lambda$  = Calor latente de vaporización del agua = 542,740 kcal/kg (Smith, Van Ness, & Abbott, 1996)

Reemplazando los valores en la ecuación (3-58):

$$Q_{LG} = 0,005 * 542,740$$

$$Q_{LG} = 2,7137 \text{ kcal} = 11,354 \text{ kJ}$$

Reemplazando valores en la ecuación (3-53), la energía total que requiere el sistema para llevar a cabo la etapa de gelatinización es:

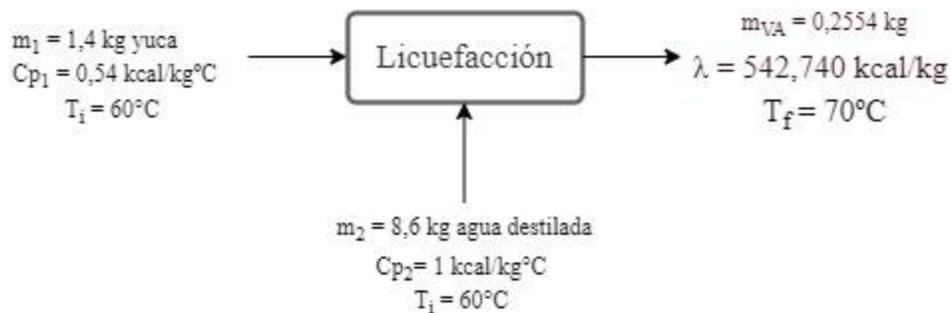
$$Q_G = 1761,55 \text{ kJ} + 11,354 \text{ kJ}$$

$$Q_G = 1772,904 \text{ kJ}$$

### 3.4.3. Balance de energía de la licuefacción

En la etapa de licuefacción existe una transferencia de energía simultánea en forma de calor hacia el sistema, a través de una resistencia eléctrica por baño María. En la figura 3-30 se muestra el sistema utilizado para la etapa de licuefacción.

**Figura 3- 31 Balance de energía de la licuefacción**



Fuente: Elaboración propia, 2024

La siguiente expresión representa el balance de energía global en la etapa de licuefacción:

$$Q_L = Q_{SL} + Q_{LL} \quad \text{Ecuación (3-49)}$$

Donde:

$Q_L$  = Calor requerido para llevar a cabo la licuefacción (kJ)

$Q_{SL}$  = Calor sensible en la etapa de licuefacción (kJ)

$Q_{LL}$  = Calor latente en la etapa de licuefacción (kJ)

Partiendo de la ecuación (3-34), el calor sensible requerido para la etapa de licuefacción es:

$$Q_{SL} = m_{H_2O} * C_{p_{H_2O}} * (T_f - T_i) + m_Y * C_{p_Y} * (T_f - T_i) \quad \text{Ecuación (3-50)}$$

Donde los datos son:

$m_{H_2O}$  = masa de agua presente en la licuefacción = 8,6 kg

$Cp_{H_2O}$  = Capacidad calorífica del agua = 1 kcal/kg °C (Smith, Van Ness, & Abbott, 1996)

$m_Y$  = masa de yuca seca molida = 1,4 kg

$Cp_Y$  = Capacidad calorífica de la yuca seca molida = 0,54 cal/g °C = 0,54 kcal/kg °C (Beltran & Hoyos, 2005)

Reemplazando valores en la ecuación (3-50):

$$Q_{SL} = 8,6 \text{ kg} * 1 \frac{\text{kcal}}{\text{kg}^\circ\text{C}} * (70 - 60) ^\circ\text{C} + 1,4 \text{ kg} * 0,54 \frac{\text{kcal}}{\text{kg}^\circ\text{C}} * (70 - 60) ^\circ\text{C}$$

$$Q_{SL} = 93,56 \text{ kcal} = 391,45 \text{ kJ}$$

Partiendo de la ecuación (3-35), el calor latente para evaporar el agua en la etapa de licuefacción es:

$$Q_{LL} = m_{VA} * \lambda_{H_2O} \quad \text{Ecuación (3-51)}$$

Donde los datos son:

$m_{VA}$  = masa de vapor de agua = 0,2554 kg

$\lambda_{H_2O}$  = Calor latente de vaporización del agua = 542,740 kcal/kg, a la presión de la ciudad de Tarija. (Smith, Van Ness, & Abbott, 1996)

Reemplazando valores en la ecuación (3-51):

$$Q_{LL} = 0,2554 \text{ kg} * 542,740 \frac{\text{kcal}}{\text{kg}}$$

$$Q_{LL} = 138,615 \text{ kcal} = 579,968 \text{ kJ}$$

Partiendo de la ecuación (3-51), la energía requerida en la etapa de licuefacción es:

$$Q_L = 391,45 \text{ kJ} + 579,968 \text{ kJ}$$

$$Q_L = 971,418 \text{ kJ}$$

### 3.4.4. Balance de energía de la sacarificación

En la etapa de sacarificación existe una transferencia de energía simultánea en forma de calor hacia el sistema, a través de una resistencia eléctrica por baño María. En la figura 3-32 se muestra el sistema utilizado para la etapa de sacarificación.

**Figura 3- 32 Balance de energía de la sacarificación**



Fuente: Elaboración propia, 2024

La siguiente expresión representa el balance de energía global en la etapa de sacarificación:

$$Q_s = Q_{ss} + Q_{ls} \quad \text{Ecuación (3-52)}$$

Donde:

$Q_s$  = Calor total que requiere la etapa de sacarificación (kJ)

$Q_{ss}$  = Calor sensible en la etapa de sacarificación (kJ)

$Q_{ls}$  = Calor latente en la etapa de sacarificación (kJ)

Partiendo de la ecuación (3-34), el calor sensible requerido para la etapa de sacarificación es:

$$Q_{ss} = m_{H_2O} * C_{p_{H_2O}} * (T_f - T_i) + m_Y * C_{p_Y} * (T_f - T_i) \quad \text{Ecuación (3-53)}$$

Donde los datos son:

$m_{H_2O}$  = masa de agua presente en la sacarificación = 8,6 kg

$C_{p_{H_2O}}$  = Capacidad calorífica del agua = 1 kcal/kg °C (Smith, Van Ness, & Abbott, 1996)

$m_Y =$  masa de yuca seca molida = 1,4 kg

$C_{p_Y} =$  Capacidad calorífica de la yuca seca molida = 0,54 cal/g °C = 0,54 kcal/kg°C (Beltran & Hoyos, 2005)

Reemplazando valores en la ecuación (3-64):

$$Q_{SS} = 8,6 \text{ kg} * 1 \frac{\text{kcal}}{\text{kg}^\circ\text{C}} * (60 - 55) ^\circ\text{C} + 1,4 \text{ kg} * 0,54 \frac{\text{kcal}}{\text{kg}^\circ\text{C}} * (60 - 55) ^\circ\text{C}$$

$$Q_{SS} = 46,78 \text{ kcal} = 195,727 \text{ kJ}$$

Partiendo de la ecuación (3-35), el calor latente para evaporar el agua en la etapa de sacarificación es:

$$Q_{LS} = m_{VA} * \lambda_{H_2O} \quad \text{Ecuación (3-54)}$$

Donde los datos son:

$m_{VA} =$  masa de vapor de agua = 0,092 kg

$\lambda_{H_2O} =$  Calor latente de vaporización del agua = 542,740 kcal/kg, a la presión de la ciudad de Tarija. (Smith, Van Ness, & Abbott, 1996)

Reemplazando valores en la ecuación (3-65):

$$Q_{LS} = 0,092 \text{ kg} * 542,740 \frac{\text{kcal}}{\text{kg}}$$

$$Q_{LS} = 49,932 \text{ kcal} = 208,915 \text{ kJ}$$

Partiendo de la ecuación (3-52), la energía requerida en la etapa de sacarificación es:

$$Q_S = 195,727 \text{ kJ} + 208,915 \text{ kJ}$$

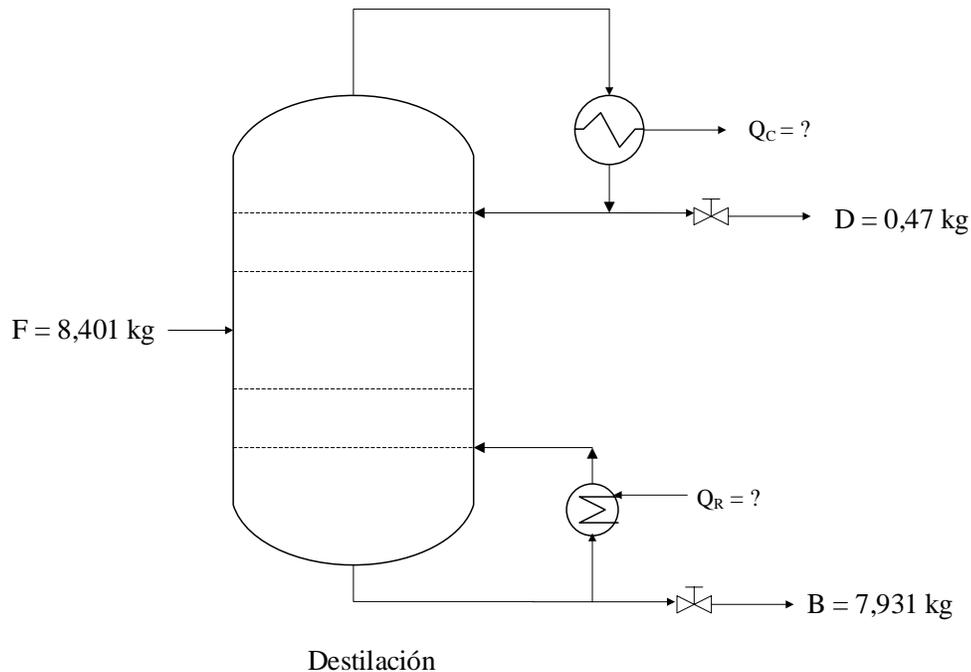
$$Q_S = 404,642 \text{ kJ}$$

### 3.4.5. Balance de energía de la destilación

La energía utilizada en el proceso de destilación es igual a la suma de la energía necesaria para generar el vapor dentro del re-hervidor más el calor retirado por el agua de enfriamiento del condensador.

En la figura 3-32 se muestra el balance de energía de la destilación, en donde se llevó a cabo la separación de los componentes presentes en la muestra.

**Figura 3- 33 Balance de energía de la destilación**



Fuente: Elaboración propia, 2024

La siguiente expresión representa el balance de energía global en la etapa de destilación:

$$Q_T = Q_{SR} + Q_{LR} - Q_{AC} \quad \text{Ecuación (3-55)}$$

Donde:

$Q_T$  = Calor total (kJ)

$Q_{SR}$  = Calor sensible de la mezcla en el reboiler (kJ)

$Q_{LR}$  = Calor latente de la mezcla en el reboiler (kJ)

$Q_{AC}$  = Calor absorbido por el condensador (kJ)

Partiendo de la ecuación (3-34), el calor sensible para subir la temperatura de la mezcla a ebullición:

$$Q_{SR} = (m_{mezcla} * X_{Agua} * C_{pAgua} + m_{mezcla} * X_{Etanol} * C_{pEtanol}) * \Delta T \quad \text{Ecuación (3-56)}$$

Donde los datos son:

$m_{mezcla}$  = Masa de la mezcla en el reboiler = 8,401 kg

$X_{Agua}$  = Composición del agua en la mezcla = 0,968

$C_{pAgua}$  = Capacidad calorífica del agua = 1 kcal/kg°C (Smith, Van Ness, & Abbott, 1996)

$X_{Etanol}$  = Composición del etanol en la mezcla = 0,03154

$C_{pEtanol}$  = Capacidad calorífica del etanol = 0,579 kcal/kg°C (Smith, Van Ness, & Abbott, 1996)

Reemplazando valores en la ecuación (3-56):

$$Q_{SR} = (8,401 \text{ kg} * 0,968 * 1 \frac{\text{kcal}}{\text{kg} \text{ } ^\circ\text{C}} + 8,401 \text{ kg} * 0,03154 * 0,579 \frac{\text{kcal}}{\text{kg} \text{ } ^\circ\text{C}}) * (80 - 20) \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$Q_{SR} = 497,135 \text{ kcal} = 2080,01 \text{ kJ}$$

Partiendo de la ecuación (3-35), el calor latente para evaporar la mezcla:

$$Q_{LR} = m_{AV} * X_{Agua} * \lambda_{Agua} + m_{EV} * X_{Etanol} * \lambda_{Etanol} \quad \text{Ecuación (3-57)}$$

$m_{AV}$  = 8,136 kg

$X_{Agua}$  = Composición del agua = 0,968

$\lambda_{Agua}$  = Calor latente de vaporización del agua = 542,740 kcal/kg, a la presión de la ciudad de Tarija. (Smith, Van Ness, & Abbott, 1996)

$m_{EV}$  = Masa de etanol evaporado = 0,265 kg

$X_{Etanol}$  = Composición del etanol en la mezcla = 0,03154

$\lambda_{Etanol}$  = Calor latente de vaporización del etanol = 200,56 kcal/kg, (Smith, Van Ness, & Abbott, 1996)

Reemplazando valores en la ecuación (3-57):

$$Q_{LR} = 8,136 \text{ kg} * 0,968 * 542,740 \frac{\text{kcal}}{\text{kg}} + 0,265 \text{ kg} * 0,03154 * 200,56 \frac{\text{kcal}}{\text{kg}}$$

$$Q_{LR} = 4276,105 \text{ kcal} = 17891,225 \text{ kJ}$$

Para el calor absorbido por el condensador, considerando el flujo volumétrico del agua 4400 cm<sup>3</sup>/min y un tiempo de 60 minutos, es:

$$Q_{AC} = m_{AR} * C_{pA} * \Delta T \quad \text{Ecuación (3-58)}$$

Donde:

$m_{AR}$  = Masa del agua de refrigeración = 263, 208 kg

$C_{pA}$  = Capacidad calorífica del agua = 1 kcal/kg°C (Smith, Van Ness, & Abbott, 1996)

Reemplazando valores en la ecuación

$$Q_{AC} = 526,416 \text{ kg} * 1 \frac{\text{kcal}}{\text{kg}^\circ\text{C}} * (25 - 18) ^\circ\text{C}$$

$$Q_{AC} = 3684,912 \text{ kcal} = 15417,671 \text{ kJ}$$

Partiendo de la ecuación (3-55), la energía requerida en la etapa de destilación es:

$$Q_T = 2080,01 \text{ kJ} + 17891,225 \text{ kJ} - 15417,671 \text{ kJ}$$

$$Q_T = 4553,564 \text{ kJ}$$

### 3.4.6. Consumo de energía

Por otro lado, fue importante determinar el cálculo de energía consumida en función de la potencia de cada equipo empleado durante la ejecución de la fase experimental; para de esta forma calcular el costo de operación.

Sabiendo que la potencia eléctrica es la cantidad de energía desarrollada o consumida por un equipo en una unidad de tiempo se define su expresión matemática de la siguiente forma:

$$P = I * V \quad \text{Ecuación (3-59)}$$

Donde:

P: Potencia eléctrica (W)

I: Intensidad de la corriente (A)

V: Diferencia de potencial (V)

De todas maneras, basándose en la ecuación anterior se puede tener la fórmula para calcular la energía eléctrica:

$$E = P \cdot t \quad \text{Ecuación (3-60)}$$

Donde:

E: energía eléctrica (W)

I: intensidad de la corriente (A)

V: diferencia de potencial (V)

Las características de cada equipo fueron adquiridas de las placas de información de cada uno. En la tabla III-23, se presentan las condiciones de operación en las que se utilizó cada equipo.

**Tabla III- 23 Condiciones de operación de los equipos utilizados**

<b>Equipo</b>	<b>Potencia (kW)</b>	<b>Tiempo de operación (h)</b>
Secador de tiro forzado	1,1	49
Molino de martillos	1	1
Tamizador Vibratorio	0,92	0,5
Evaporador Rotativo	1,32	2
Calentador Eléctrico	0,25	1
Termostato de inmersión	1,17	132
Bomba	0,23	2
Columna de destilación	0,62	4

Fuente: Elaboración propia, 2024

En la Tabla III-24 se observa el valor de la energía para cada equipo utilizado:

**Tabla III- 24 Energía consumida de los equipos utilizados**

<b>Equipo</b>	<b>Energía Consumida (kWh)</b>
---------------	--------------------------------

Secador de tiro forzado	53,9
Molino de martillos	1
Tamizador Vibratorio	0,46
Evaporador Rotativo	2,64
Calentador Eléctrico	0,25
Termostato de inmersión	154,44
Bomba	0,46
Columna de destilación	2,48

Fuente: Elaboración propia, 2024

### 3.5. Caracterización del producto obtenido

La determinación de las propiedades fisicoquímicas del producto fue realizada en el Centro de Análisis, Investigación y Desarrollo (CEANID), los valores resultantes se describen en la Tabla III-25:

**Tabla III- 25 Propiedades fisicoquímicas del producto**

Parámetro	Unidad	Resultado
Aspecto	-	Líquido incoloro de olor característico
Densidad relativa		0,94
Grado Alcohólico	°GL	53
pH	-	3,48
Acidez total	g/L	0,59
Metanol	mg/L	415

Fuente: Centro de Análisis, Investigación y Desarrollo, 2024

Cabe mencionar que el grado obtenido del bioetanol de yuca en la presente investigación está directamente relacionado al tipo de equipos con los que se cuenta en Laboratorio de Operaciones Unitarias, mediante el uso de una columna de rectificación se logró alcanzar una pureza de 53%. Para elevar este grado alcohólico es necesario

contar con equipos como columnas rellenas de agentes desecantes o columnas de destilación al vacío, de manera que sea posible superar el punto azeótropo de la mezcla etanol-agua.

Con el presente proyecto se estableció el tipo de proceso de hidrólisis más adecuado para esta materia prima, así como las condiciones óptimas de fermentación y destilación.

### 3.6. Rendimiento

#### 3.6.1. Rendimiento en la fermentación alcohólica

Se determinó del rendimiento en la fermentación alcohólica en base a las cantidades de etanol obtenido y sólidos solubles de los sustratos obtenidos. El rendimiento de esta etapa está expresado de la siguiente manera:

$$\eta = \frac{\eta_{Real}}{\eta_{Teórico}} * 100\% \quad \text{Ecuación (3-61)}$$

Donde:

$\eta$  =Rendimiento

$\eta_{Real}$  = Rendimiento Real

$\eta_{Teórico}$  = Rendimiento Teórico

Para determinar la cantidad de etanol producido en la fermentación alcohólica se realizó cálculos estequiométricos.



$$180 \text{ g} \quad 92 \text{ g} \quad 88 \text{ g}$$

Conociendo que la concentración de sólidos expresados en glucosa, se es posible determinar la cantidad de glucosa presente en el mosto de la siguiente manera:

$$m_{C_6H_{12}O_6} = 9253 \text{ g} * \frac{14,5 \text{ g}}{100 \text{ g}}$$

$$m_{C_6H_{12}O_6} = 1341,685 \text{ g } C_6H_{12}O_6$$

Se puede calcular la cantidad de alcohol que se obtendría teóricamente, mediante la siguiente relación estequiométrica:

$$m_{\text{alcohol teórico}} = 1341,685 \text{ g } C_6H_{12}O_6 * \left( \frac{92 \text{ g } C_2H_5OH}{180 \text{ g } C_6H_{12}O_6} \right)$$

$$m_{\text{alcohol teórico}} = 685,750 \text{ g } C_2H_5OH$$

Para determinar el rendimiento real se empleó resultados en la medición del grado alcohólico, por lo tanto, la cantidad de alcohol obtenido en la etapa de destilación es la siguiente:

$$V_{\text{Alcohol}} = 500 \text{ ml} * \left( \frac{53 \text{ ml}}{100 \text{ ml}} \right)$$

$$V_{\text{Alcohol}} = 265 \text{ ml}$$

Con la densidad del etanol se logra establecer la masa de alcohol real presente en el destilado:

$$m_{\text{Alcohol real}} = 265 \text{ ml} * 0,94$$

$$m_{\text{Alcohol real}} = 249,1 \text{ g } C_2H_5OH$$

Reemplazando dichos valores en la ecuación (3-61) se obtiene el siguiente valor:

$$\eta = \frac{249,1 \text{ g}}{685,750 \text{ g}} * 100\%$$

$$\eta = 36, 325 \%$$

Existen diferentes trabajos de investigación realizados en la obtención de bioetanol a partir de yuca, algunos de los cuales se mencionan a continuación:

Según (Sánchez M. , 2012) menciona en su trabajo de investigación “Obtención De Bioetanol a Partir de Almidón de Yuca Mediante Hidrólisis Enzimática y Fermentación por Medio de Levaduras en el Laboratorio de la UTE Santo Domingo 2010” se obtuvo dos rangos de significación en el primer rango de 4 días de fermentación con un rendimiento de alcohol de 27.76%. El segundo rango corresponde a 6 días de fermentación con un rendimiento en etanol recuperado del 36.67 %.

Asimismo, (Tipantasig, 2018) en su trabajo de investigación “Diseño de un Proceso Industrial para la Obtención de Bioetanol a partir de Yuca (Manihot Esculenta Crantz)” por medio de hidrólisis ácida indica que en la destilación se obtuvo un destilado de

40°GL, posteriormente se realizó una deshidratación para romper el punto azeótropo entre el agua y el etanol logrando un grado de pureza de 96,29°GL y con un rendimiento del 27%.

Por otra parte, (Larrea, 2019) en su proyecto de investigación “Obtención de bioetanol mediante digestión enzimática de almidones de yuca, papa y camote” menciona que, para la producción de bioetanol, se realizaron dos procesos diferentes: sacarificación y fermentación secuencial (SeqSF) y sacarificación y fermentación simultánea (SSF). En general, SSF generó una mayor eficiencia de etanol (40%) comparado con la de SeqSF (30%) sin embargo, no se observó ninguna diferencia entre el tipo de almidón usado. De manera que, el rendimiento obtenido en este proyecto de investigación está alineado con lo que se ha encontrado en otras investigaciones previas, por lo que se debe mejorar las condiciones de control del desdoblamiento del almidón y, en consecuencia, lograr un mayor rendimiento en el proceso de obtención de bioetanol a partir de yuca.

**CAPÍTULO IV**  
**CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES**

## 4. Conclusiones y recomendaciones

### 4.1. Conclusiones

De acuerdo con los resultados obtenidos en el presente proyecto de investigación “Obtención de Bioetanol a Escala Laboratorio a partir de yuca (*Manihot esculenta* Crantz) se concluye lo siguiente:

- La caracterización fisicoquímica y microbiológica de la yuca reveló que esta materia prima es adecuada para la producción de bioetanol debido a su elevado contenido de almidón, con 30,61 % de hidratos de carbono, que se convierte eficientemente en azúcares fermentables; además cuenta con un 3,49 % de azúcares reductores y 66,03% de humedad. Con los análisis microbiológicos se obtuvieron cantidades correspondientes a  $7,0 \times 10^1$  UFC/g de coliformes totales,  $1,0 \times 10^1$  UFC/g de *Escherichia Coli* y  $2,0 \times 10^1$  UFC/g de mohos y levaduras, resultados que confirmaron la ausencia de patógenos, asegurando un proceso de fermentación controlado y seguro.
- El método más adecuado para la etapa de hidrólisis del almidón es la hidrólisis enzimática. Esta selección se logró a través de una matriz de decisión comparando los métodos de hidrólisis ácida e hidrólisis enzimática, analizando factores como aplicabilidad, influencia de variables como temperatura, pH y tiempo, confiabilidad, generación de subproductos y residuos, equipos y reactivos. La selección de este método permite una optimización en la eficiencia del proceso a escala laboratorio.
- Se desarrolló el diseño de investigación permitiendo establecer las condiciones óptimas de operación para cada etapa del proceso de producción de bioetanol. En la hidrólisis, se determinó una temperatura óptima de 70 °C y concentración de enzima 1 g/L; demostrando además que la temperatura y la interacción temperatura\*concentración de enzima tiene influencia en la concentración de sólidos solubles (°Brix). Durante la fermentación, se identificó una cantidad ideal de levadura de 1 g/L y un pH 4,5; y se demostró que la cantidad de levadura y la interacción pH\* cantidad de levadura tiene influencia en el grado alcohólico.

- El bioetanol obtenido a partir de yuca presentó un grado alcohólico de 53°GL, presenta apariencia de líquido incoloro con olor característico, posee una densidad relativa de 0,94 y un pH de 3,48.
- El rendimiento de producción del proceso empleado para la obtención de bioetanol alcanzado es 36,325 %, este rendimiento está relacionado al grado alcohólico final obtenido mediante la destilación con reflujo; demostrando la necesidad de continuar la línea de investigación con los equipos adecuados para superar el punto azeotrópico de la mezcla etanol-agua.
- El diseño de investigación permitió establecer condiciones óptimas para las etapas de pretratamiento del almidón de yuca, así como de la fermentación del mosto resultante.

#### **4.2. Recomendaciones**

- Realizar un diseño de investigación para determinar condiciones óptimas para la etapa de hidrólisis enzimática del almidón en cuanto se refiere a tiempo de hidrólisis, velocidad de agitación y pH de trabajo.
- Mejorar las condiciones de control en el proceso de hidrólisis enzimática para que el desdoblamiento del almidón en azúcar sea el más adecuado para así obtener un mayor rendimiento.
- Desarrollar un diseño factorial de investigación que permita evaluar los factores como ser tiempo de fermentación, tipo de levadura y temperatura en la etapa de fermentación alcohólica.
- Realizar un estudio del sedimento proveniente de la etapa de filtración para evaluar si es viable su posible aprovechamiento.
- Llevar a cabo una investigación que permita analizar la deshidratación del etanol obtenido a partir de yuca mediante columnas de deshidratación con Zeolita A3.
- Evaluar el uso de bioetanol de yuca deshidratado como carburante en mezclas con la gasolina automotor.

- Es importante seguir investigando y optimizando el proceso para lograr una mayor purificación del etanol y, por lo tanto, aumentar la viabilidad económica de la producción a escala de laboratorio.