

UCLV
Universidad Central
"Marta Abreu" de Las Villas



FQF
Facultad de
Química y Farmacia

TRABAJO DE DIPLOMA

**“Obtención de jarabes glucosados y su purificación,
para su posterior conversión a jarabes fructosados”**

Autora: Yisel Pérez Milian

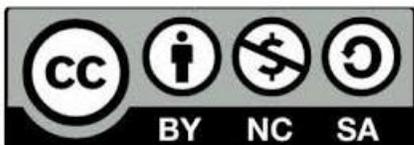
Tutores: DrC. Irenia Gallardo Aguilar
MCs. Fernando Sarría Quesada

2017-2018

Este documento es Propiedad Patrimonial de la Universidad Central “Marta Abreu” de Las Villas, y se encuentra depositado en los fondos de la Biblioteca Universitaria “Chiqui Gómez Lubian” subordinada a la Dirección de Información Científico Técnica de la mencionada casa de altos estudios.

Se autoriza su utilización bajo la licencia siguiente:

Atribución- No Comercial- Compartir Igual



Para cualquier información contacte con:

Dirección de Información Científico Técnica. Universidad Central “Marta Abreu” de Las Villas. Carretera a Camajuaní. Km 5½. Santa Clara. Villa Clara. Cuba. CP. 54 830
Teléfonos: +53 01 42281503-1419

“Para realizar una investigación son necesarias dos cosas: una de ellas es persistencia infatigable; y la otra, habilidad para desechar algo en lo que se ha invertido mucho sudor y muchas ideas”

Albert Einstein

Dedicatoria

- ✓ *A mis padres porque sin su amor y apoyo no hubiera sido posible cumplir este sueño.*
- ✓ *A mi hermana por estar siempre a mi lado, por ser mi guía y la mejor amiga que se pudiera desear.*
- ✓ *A mi Santita por darme la fuerza para superar los obstáculos.*

Agradecimientos

- ✓ *A mis abuelos por el cariño que siempre me han entregado.*
- ✓ *A mis tías Maricela y Marilys por brindarme su apoyo en todo momento y confiar siempre en mí.*
- ✓ *A mis tíos Idail y Mirayda y mis primos, por su constante preocupación y sus muestras de cariño a pesar de la distancia que nos separa.*
- ✓ *A mi tutora Irenia Gallardo por la entrega, el tiempo y la dedicación que puso en este trabajo, por el aliento brindado cuando las cosas estaban tensas.*
- ✓ *A los técnicos de laboratorio que tanto contribuyeron para que este trabajo pudiera realizarse, en especial a Margarita y Dayán.*
- ✓ *A Danay Legarreta porque sé que siempre vas a estar ahí para mí, por darme aliento cuando mis días se tornan grises, por tantas risas y ocurrencias, por la lealtad y por enseñarme a ser mejor cada día. Te quiero mucho mi loquita.*
- ✓ *A Mario Octavio, Yadiel, Luis Arturo e Isleidy por hacer que las largas jornadas de estudio fueran tan amenas y por el cariño me han regalado.*
- ✓ *A mis amigas del cuarto por hacer cada día especial y por las tantas horas de alegría.*
- ✓ *A mis compañeros de aula por compartir conmigo tantos momentos y por hacer de estos cinco años los mejores de mi vida.*
- ✓ *A todos los profesores del departamento por contribuir en mi formación profesional y ofrecerme sus conocimientos.*
- ✓ *A todas las personas que he conocido en la universidad y que de una u otra forma me han ayudado a llegar hasta este momento.*

Muchas gracias

Resumen

La conversión enzimática de glucosa a fructosa es un importante proceso industrial, en especial para la producción de jarabes de maíz de alto contenido de fructosa (HFCS). Su principal uso es en la industria alimentaria por su alto poder edulcorante para productos dietéticos y bebidas "light". Por el alto costo del maíz, además de ser una materia prima de importación y por los trabajos realizados en la facultad con la Empresa GydeMa en la obtención de almidón y jarabes glucosados a partir de sorgo, se valora este cereal en la producción de jarabes de diferentes calidades. Una etapa muy importante en este proceso es la purificación del jarabe de glucosa, para evitar el envenenamiento de la enzima glucosa isomerasa, empleada en la conversión.

Se continuó el estudio de elaboración de jarabes de glucosa a partir de harina de sorgo, su purificación mediante tratamientos con carbón activado y resinas de intercambio iónico. Como resultados se obtuvieron jarabes de glucosa con calidad similar a los de jarabe de maíz, empleando las menores cantidades de enzima y tiempos de sacarificación, la utilización de la resina Amberlite MB150 resultó ser eficaz brindando un 94,14 % de remoción de sales disueltas, a partir del criterio de la capacidad de adsorción de la misma de 13780,88 mg absorbido/L de resina, se escaló la columna de intercambio iónico y se diseñó un reactor para la producción de jarabes fructosados ambos a nivel de planta piloto con una capacidad de 100L/día con un costo adecuado para esta capacidad.

Palabras claves: sorgo, jarabes glucosados, purificación, intercambio iónico, jarabes fructosados.

Abstract

The enzymatic conversion of glucose to fructose is an important industrial process, especially for the production of high fructose corn syrups (HFCS). It's main use is in the food industry due to its high sweetening power for dietetic products and "light" beverages. Due to the high cost of corn, as well as being an import raw material and for the work done in the faculty with the GydeMa Company in the obtaining of starch and glucosed syrups from sorghum, this cereal is valued in the production of syrups of different qualities. A very important step in this process is the purification of glucose syrup, to avoid the poisoning of the glucose isomerase enzyme, used in the conversion. The study of the elaboration of glucose syrups from sorghum flour, it's purification by treatments with activated charcoal and ion exchange resins was continued. As results were obtained glucose syrups with quality similar to those of corn syrup, using the lowest amounts of enzyme and saccharification times, the use of Amberlite MB150 resin proved to be effective providing 94,14% removal of dissolved salts, based on the criterion of it's adsorption capacity of 13780,88 mg absorbed/L of resin, the ion exchange column was scaled and a reactor was designed for the production of fructose syrups both at the pilot plant level with a capacity of 100L/day with an adequate cost for this capacity.

Key words: sorghum, glucose syrup, purification, ion exchange, fructose syrups.

Índice

INTRODUCCIÓN	1
CAPÍTULO 1. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA	4
1.1 CEREALES. GENERALIDADES	4
1.2 MAÍZ. GENERALIDADES	5
1.2.1 Almidón presente en el maíz.....	5
1.3 SORGO. GENERALIDADES.....	6
1.3.1 Almidón presente en el sorgo.....	7
1.4 GENERALIDADES SOBRE EL ALMIDÓN	8
1.4.1 Estructura del almidón	8
1.4.1.1 Amilosa.....	9
1.4.1.2 Amilopectina	9
1.4.2 Gelatinización de las partículas de almidón	10
1.4.3 Hidrólisis del almidón	11
1.4.3.1 Hidrólisis ácida	11
1.4.3.2 Hidrólisis enzimática.....	12
1.5 ENZIMAS DEGRADADORAS DE ALMIDÓN	12
1.5.1 Amilasas.....	13
1.5.1.1 Bialfa T	14
1.5.2 Glucoamilasa	14
1.5.2.1 Glucozyme 2X.....	14
1.5.3 Enzima Glucosa Isomerasa.....	14
1.6 JARABES GLUCOSADOS	15
1.6.1 Grados Brix.....	15
1.6.2 Dextrosa Equivalente (DE).....	15
1.6.3 Propiedades funcionales del jarabe de glucosa	17
1.6.4 Aplicaciones de los jarabes glucosados	17
1.6.5 Descripción del proceso de producción de jarabes glucosados por vía enzimática ..	18
1.7 PURIFICACIÓN DEL JARABE DE GLUCOSA EMPLEANDO COLUMNAS DE INTERCAMBIO IÓNICO	20
1.7.1 Escalado de equipos. Criterios de escalado.	23
1.8 JARABES FRUCTOSADOS	24
1.8.1 Propiedades funcionales de los jarabes de fructosa	24
1.8.2 Aplicaciones de los jarabes de fructosa.....	25
1.8.3 Descripción del proceso de conversión de glucosa a fructosa	25
1.9 CONCLUSIONES PARCIALES.....	26

CAPÍTULO 2. DESARROLLO EXPERIMENTAL.....	28
2.1 MATERIALES Y MÉTODOS PARA LA OBTENCIÓN DE JARABES GLUCOSADOS A PARTIR DE HARINA DE SORGO MEDIANTE HIDRÓLISIS ENZIMÁTICA	28
2.1.1 <i>Diseño experimental para el proceso de obtención de jarabes glucosados</i>	29
2.1.2 <i>Descripción del proceso de obtención de jarabes desarrollado en el laboratorio</i>	30
2.1.3 <i>Determinación de las variables respuesta</i>	31
2.1.3.1 Grados Brix.....	31
2.1.3.2 Azúcares Reductores Totales (ART)	31
2.1.3.3 Equivalente de Dextrosa (ED).....	31
2.1.4 <i>Determinación de otros parámetros de calidad del jarabe de glucosa</i>	32
2.1.4.1 Acidez.....	32
2.1.4.2 Conductividad	32
2.1.4.3 pH.....	32
2.1.5 <i>Resultados del proceso de obtención de jarabes glucosados</i>	32
2.1.6 <i>Análisis estadístico del diseño experimental</i>	35
2.1.6.1 Análisis del Brix.....	35
2.1.6.2 Análisis de los ART	36
2.1.7 <i>Características físico-químicas de los jarabes obtenidos a partir de la harina de sorgo</i>	37
2.2 ESTUDIO DE LA INFLUENCIA DE LAS VARIABLES EMPLEANDO COMO SUSTRATOS ALMIDÓN DE MAÍZ Y HARINA DE SORGO	37
2.2.1 <i>Determinación de variables respuesta y otros parámetros de calidad</i>	39
2.2.2 <i>Resultados del proceso de obtención de jarabes glucosados.</i>	39
2.2.3 <i>Análisis estadístico del diseño experimental</i>	40
2.2.3.1 Análisis del Brix.....	41
2.2.3.2 Análisis del ED.	41
2.2.4 <i>Características de los jarabes obtenidos a partir de almidón de maíz y de harina de sorgo.</i>	42
2.3 ETAPA DE EVAPORACIÓN DE LOS JARABES DE GLUCOSA.....	43
2.4 PURIFICACIÓN DE LOS JARABES DE GLUCOSA.....	44
2.4.1 <i>Etapa de purificación empleado carbón activado</i>	44
2.4.2 <i>Etapa de purificación usando resinas de intercambio iónico</i>	46
2.4.2.1 Características de la resina de intercambio iónico Amberlite MB150	48
2.4.2.2 Cálculo de los parámetros que definen el comportamiento de procesos de adsorción e intercambio iónico en semicontinuo.	49
2.5 CONCLUSIONES PARCIALES	51

CAPÍTULO 3: PROPUESTA TECNOLÓGICA. ANÁLISIS ECONÓMICO	53
3.1 ESCALADO DE LA COLUMNA DE INTERCAMBIO IÓNICO A NIVEL DE PLANTA PILOTO	53
3.2 SELECCIÓN PRELIMINAR DEL EQUIPAMIENTO PARA LLEVAR A CABO EL PROCESO DE OBTENCIÓN DE JARABES FRUCTOSADOS.....	54
3.2.1 Selección del tipo de reactor	54
3.2.2 Selección del medio de suministro de calor	55
3.2.3 Selección del tipo de agitador	55
3.3 BALANCES DE ENERGÍA EN LA CHAQUETA PARA DESARROLLAR LA REACCIÓN ISOMERIZACIÓN....	56
3.4 DIMENSIONAMIENTO DE LOS EQUIPOS FUNDAMENTALES DEL PROCESO	57
3.5 ANÁLISIS ECONÓMICO DE LA PLANTA PILOTO PARA LA OBTENCIÓN DE JARABES FRUCTOSADOS. .	60
3.5.1 Costo de adquisición del equipamiento	60
3.5.2 Cálculo del Costo Total de Inversión	61
3.6 CONCLUSIONES PARCIALES	62
CONCLUSIONES	63
RECOMENDACIONES	64
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	65
ANEXOS.....	72

Introducción

En las últimas décadas se ha mostrado gran interés en la obtención de productos de alto valor agregado a partir de materias primas no convencionales, tanto para la producción de bebidas como para otros productos alimenticios.

En la producción de glucosa y fructosa se ha empleado tradicionalmente maíz como materia prima, pero por su empleo en la alimentación directa de una gran parte de la población mundial, investigadores de diversos países, se han dado a la tarea de estudiar la obtención de almidón y jarabes con alto o bajo contenido de azúcares, para sustituir la sacarosa, empleando otras materias primas entre ellas tubérculos y otros cereales como el sorgo.

El consumo de fructosa se ha incrementado en los últimos años, llegando a reemplazar a la sacarosa en diversas aplicaciones industriales. Usualmente, la fructosa se obtiene por isomerización continua de la glucosa obtenida a partir del almidón de maíz. Sin embargo, debido al aumento del precio de este grano, es necesario identificar nuevas fuentes de almidones que puedan ser utilizadas en la producción de fructosa.

Debido a que el maíz es un producto de importación en Cuba, en la planta productora de almidón y jarabes de maíz del país, se valora su sustitución parcial por uno de producción nacional como el sorgo, tanto para sus producciones actuales, así como para ampliar sus surtidos; por su gran parecido en sus propiedades al maíz, no contiene gluten que afecta a los enfermos celíacos, además de todas las ventajas que presenta como cultivo, que contribuiría al desarrollo de la agricultura del país.

La purificación del jarabe de glucosa se lleva a cabo con el fin de que cumpla con los parámetros de pureza y sea apto como sustrato para la conversión a fructosa por la enzima glucosa isomerasa inmovilizada. Se realizan varios tratamientos de purificación entre los que se destacan la decoloración con carbón activado y las resinas de intercambio iónico para eliminar una serie de minerales que afectarían este proceso, como por ejemplo el calcio que es un inhibidor de la enzima que se emplea.

La industria de los jarabes fructosados tomó gran fuerza debido a que la fructosa tiene capacidad edulcorante 30 % mayor que la sacarosa, 2,5 veces mayor que la glucosa y es 2 veces más soluble que la glucosa; a su vez posee menos niveles calóricos, lo que le permite tener muchas aplicaciones en tratamientos de enfermedades.

Problema científico

La Empresa Productora y Comercializadora de Almidón, Glucosas y Derivados del Maíz (GydeMa), tiene como objetivo la producción de almidones y jarabes glucosados, teniendo en sus planes la elaboración de jarabes fructosados como un renglón más de esta empresa, no se purifican sus productos utilizando resinas de intercambio iónico, ni se emplean otras materias primas en sustitución del maíz.

Hipótesis

Es posible la obtención de jarabes glucosados a partir de harina de sorgo y su purificación mediante carbón activado y resinas de intercambio iónico, para su posterior conversión a fructosados, si se dispone de las enzimas necesarias para este proceso y se ajustan los niveles de las variables principales en cada etapa.

Objetivo general

Obtener jarabes de glucosa a nivel de laboratorio a partir de harina de sorgo por medio de hidrólisis enzimática y su purificación mediante carbón activado y resinas de intercambio iónico.

Objetivos específicos

1. Elaborar el marco teórico de la investigación.
2. Obtener jarabes glucosados a partir de almidón de maíz y harina de sorgo UDG-110 mediante hidrólisis enzimática, ajustando los niveles de las variables.
3. Comparar la calidad de los jarabes obtenidos con los elaborados tradicionalmente.
4. Estudiar la decoloración de jarabes glucosados empleando carbón activado, como parte de su purificación.
5. Estudiar mediante resinas de intercambio iónico la purificación de los jarabes glucosados para su posterior isomerización a fructosados.
6. Escalar la columna de intercambio iónico y diseñar el reactor para la isomerización ambos a escala de planta piloto.
7. Determinar el costo total de inversión de una planta piloto para la producción de 100 L/día de jarabes fructosados incluyendo la etapa de purificación de jarabes glucosados.

Capítulo 1. Revisión Bibliográfica

1.1 Cereales. Generalidades

Los cereales se encuentran entre los alimentos básicos más importantes para la humanidad. Son una fuente de minerales y oligoelementos que almacenan energía en el grano en forma de almidón. Además de su valor nutritivo, el almidón es importante a causa de su efecto sobre las propiedades físicas de muchos alimentos **(Girbés y Jiménez 2009)**.

Por lo general, los cereales son sometidos a almacenamiento durante períodos de tiempo relativamente largos. Se suelen cosechar con contenidos de humedad relativamente bajos, y cuando se almacenan protegidos de las inclemencias meteorológicas y evitando insectos y roedores, se pueden conservar fácilmente durante varios años. Bajo condiciones ideales de almacenamiento (baja temperatura, atmósfera inerte, etc.) el período de seguridad para la conservación, se puede medir en decenios **(ONUAA 2007)**.

La composición química de los cereales es bastante homogénea. El componente más abundante es el almidón (60-75 %), de ahí su alto valor alimenticio. En la tabla 1.1 se muestra la composición química de algunos de los cereales más empleados en la producción de alimentos según **Rodríguez (2010)** citado en **Díaz (2014)**.

Tabla 1.1. Composición en por ciento de cereales utilizados en la producción de alimentos.

Contenidos	Maíz	Arroz	Sorgo	Trigo	Cebada
Humedad	10,9	12,0	11,7	11,1	10,6
Almidón	68,6	67,0	68,0	69,3	66,0
Proteína	10,0	7,7	10,4	0,2	13,0
Grasa	1,9	4,3	3,7	3,4	2,1
Fibra	3,4	2,3	1,9	2,2	5,6
Cenizas	0,2	0,3	0,4	0,4	2,7
Celulosa	3,6	2,0	2,0	2,0	2,0

1.2 Maíz. Generalidades

El maíz es una planta cultivada desde la antigüedad, hace más de 7000 años. Su origen parece situarse en la zona de México, donde se han encontrado los vestigios más antiguos. Aunque hay varias plantas emparentadas con el maíz (*Zea Mays*), solo una es capaz de cruzarse con él espontáneamente, se trata del Teosintle que se encuentra en México y Guatemala. El maíz es una planta anual, de verano, de porte robusto y con un rápido desarrollo **(Ortas 2008)**. Es el cereal nutritivo básico en la alimentación humana, debido al aporte en calorías y proteínas. El grano de maíz está constituido: 77 % almidón, 2 % azúcares, 9 % proteínas, 5 % aceites, 5 % pentosanas y 2 % ceniza **(Tovar 2008)**.

En el mercado nacional, el maíz tiene mayor demanda en el sector doméstico y en la micro y pequeña industria, para elaborar productos tradicionales, se consume y se procesa en forma de: tortilla, pinol, guirila, rosquillas, cereales combinados (tostado y pulverizado), en mazorca, ya sea asadas o cocidas; en masa cocida: nacatamal; en grano germinado, envasado en salmuera al 3 % y/o vinagre; semillas empacadas por variedad, como bebida indígena conocida como chicha, elaborada con maíz fermentado y como licor artesanal como la cususa **(INTA 2010)**.

1.2.1 Almidón presente en el maíz

El almidón más importante desde el punto de vista industrial es el de maíz. Al año se utilizan unos 60 millones de toneladas de maíz para fabricar almidón, bien para su uso como tal o como materia prima para la obtención de glucosa y fructosa. El almidón se presenta como polvo fino o como masas blancas, irregulares y angulares, constituidas principalmente por granos poligonales, redondeados o esferoidales de 3 a 35 micrones de diámetro, generalmente con un hilo central y circular o con varios surcos. Es inodoro y tiene un sabor ligero característico **(Tovar 2008)**.

Los almidones del maíz contienen pequeñas cantidades de grasas. Los lípidos asociados al almidón son, generalmente, lípidos polares, que necesitan disolventes polares tales como metanol-agua, para su extracción. Generalmente el nivel de lípidos en el almidón de maíz, está entre 0.5 y 1 % **(INTA 2010)**. El maíz es rico en almidón, con cierto tratamiento químico se hace un jarabe del almidón del maíz. De parte de este jarabe se puede obtener sacarosa, glucosa y fructosa. El almidón calentado y pulverizado se convierte en dextrina. En esta forma se emplea para preparar pastas

adherentes y mucílagos, como el de los sellos de correo y de las solapas de los sobres **(Agama y col. 2013)**.

1.3 Sorgo. Generalidades

El sorgo (*Sorghum bicolor* L. Moench) es uno de los cultivos más antiguos y actualmente uno de los cereales de mayor importancia en el mundo. Es muy eficiente en ambientes cálidos y con intensidad luminosa alta, como los prevalecientes en regiones semiáridas **(Rooney y Serna 2000)**. De acuerdo a **Taylor y col. (2006)**, es el mejor cereal en términos de resistencia a la sequía. Según **Hernández y col. (2011)** estas podrían ser las "plantas del futuro" debido a la cada vez más escasa agua disponible para irrigación y al más alto el nivel de CO₂ presente en el ambiente.

Es el quinto cereal de mayor importancia en el mundo después del trigo, el arroz, el maíz y la avena. Su buen comportamiento agronómico le concede favorables atributos: no es exigente a los suelos fértiles y es alelopático **(Chaviano 2005)**. Posee alto potencial de producción de granos y buenas perspectivas de contribución al desarrollo de la agricultura **(Pérez 2009)**. Sus granos son ricos en antioxidantes, tienen un aceptable valor proteico (similar al arroz y a la harina de trigo) y son altamente asimilables por el organismo humano al alcanzar hasta un 90 por ciento de digestibilidad. Tolera el calor y la salinidad mejor que el maíz, y puede crecer en una amplia variedad de suelos con un aporte limitado de nutrientes **(Dendy 2001)**. Al carecer de gluten y ser una fuente rica en vitaminas del complejo B, minerales y carbohidratos, ofrece una solución ante la creciente demanda de alimentos y bebidas para personas con enfermedad celiaca, considerado como un importante problema de salud en muchos países **(Malekzadeh 2005)**. En algunos países desarrollados y otros que están en este proceso, el sorgo es utilizado con fines de comercialización, destinándose en su mayor parte para la alimentación de ganado, siendo subutilizado en otros tipos de industria. Al igual que el maíz, el sorgo después de ser cosechado y almacenado puede ser canalizado a tres grandes industrias molineras: molienda en seco, molienda húmeda y nixtamalización **(Serna 2002)**. Comparándolo con el grano de maíz, el de sorgo es generalmente un poco más rico en proteínas, pero más pobre en materia grasa; como las de maíz, son de un valor biológico bastante débil; son particularmente deficitarias en lisina.

La composición química proximal del sorgo es casi idéntica a la del maíz, por lo que puede ser usado en su lugar para producir harinas, tortillas, almidón, jarabes y bebidas alcohólicas según **Rooney y Serna (2000)** citado en **Serna (2002)**. Está constituido por 2.8 % de materia seca, 82 % de carbohidratos, 9.5 % de proteínas, 2.9 % de grasas, 3.8 % de fibras y 1.8 % de minerales. Como puede notarse los carbohidratos son los más abundantes según lo que se reporta en esta fuente. La composición del grano de sorgo viene regida en su mayoría por el almidón, compuesto por el cual se valora a este cereal para su posible uso en la industria de las bebidas, obteniéndose azúcares, al ser este degradado. Aunque también tiene algunas variedades de fenoles y taninos, así como su elevado contenido de fibras (**Chaviano 2005**).

1.3.1 Almidón presente en el sorgo

Desde los años 50 el sorgo se ha visto como una alternativa para sustituir al maíz en la producción de almidón. Sin embargo, el grano de sorgo presenta varias desventajas, como son la presencia de endospermo periférico que actúa como una barrera contra la penetración de la solución de remojo, una matriz proteica más dura y entrecruzada que rodea los gránulos de almidón y la contaminación del almidón con pigmentos fenólicos presentes en el pericarpio, testa y tejido de la aleurona (**González 2015**). Varios investigadores han encontrado que el sorgo rinde aproximadamente 10% menos almidón que el maíz suave dentado y han demostrado que con el uso de enzimas proteolíticas y degradadoras de fibra se puede bajar significativamente el requerimiento de remojo en SO₂ (dióxido de azufre) sin sacrificar rendimientos de almidón. Una vez refinado el almidón de sorgo se puede usar intercambiabilmente con el de maíz porque ambos tienen propiedades viscoamilográficas casi idénticas. Los almidones de genotipos cerosos (95% o más de amilopectina) tienen usos industriales muy especiales debido primordialmente a su baja tasa de retrogradación (**Serna 1997**). Con unos valores que van del 56 al 73 por ciento, el contenido medio de almidones del sorgo es del 69,5 por ciento. Alrededor del 70-80 por ciento del almidón del sorgo es amilopectina mientras que el restante 20-30 por ciento es amilosa. Factores tanto genéticos como ambientales influyen en el contenido de amilosa del sorgo. El sorgo ceroso o glutinoso es muy pobre en amilosa y su almidón consiste prácticamente en un 100 por ciento de amilopectina (**Lareo 2012**). Ahora bien, en el sorgo azucarado el contenido de amilosa del almidón es de un 5 a un 15 por ciento superior al del sorgo normal. El contenido total en carbohidratos del sorgo azucarado es normal pues

contiene unos niveles extraordinariamente elevados de polisacáridos hidrosolubles (29,1%). La textura del endospermo del grano, el tamaño de las partículas de la harina y la digestibilidad del almidón guardan una fuerte correlación entre sí. En comparación con el grano corno, el almidón en el sorgo harinoso resulta más digerible. En el sorgo harinoso molido, el tamaño de las partículas es menor que en el tipo de sorgo corno también molido. El tamaño menor de las partículas y la menor superficie favorecen la acción enzimática, mejorando así la digestibilidad del almidón **(González 2003)**.

1.4 Generalidades sobre el almidón

El almidón es un carbohidrato de reserva, sintetizado y almacenado como fuente de energía en plantas superiores; después de la celulosa es el segundo hidrato de carbono más abundante en la biosfera. Aunque el contenido de almidón varía según la fuente de obtención, la más importante son los cereales (maíz, arroz, trigo) con un contenido aproximado de 30-80%, en leguminosas (frijol, chícharo, haba) un 25-50% y en tubérculos (papa, tapioca, yuca), representa un 60-90% de la materia seca **(Bernal y Martínez 2006)**.

Es sintetizado por las plantas al tomar dióxido de carbono del aire, el agua y la luz solar como fuente de energía produciendo glucosa ($C_6H_{12}O_6$) como intermediario **(Ruíz 2009)**. Es importante como constituyente de los alimentos en los que está presente, tanto desde el punto de vista nutricional como tecnológico. Es un polímero de cadena lineal o recta **(Gerena, 2013)**. Como características del almidón se encuentra que es un polvo fino de color blanco, amorfo, de densidad $1,5 \text{ g/cm}^3$; es insoluble en agua, alcohol y éter. Al microscopio presenta formas y características definidas, con aproximadamente un 13% de humedad como máximo y un pH cercano a 6. Cuando se hidrata y se dispersa en H_2O caliente se forma un compuesto de color claro que tiene un sabor suave; cuando se enfría puede formar un gel débil, si se calienta por tiempo prolongado y en condiciones ácidas, el almidón pierde su habilidad de espesante **(Morales y Sánchez 2004)**.

1.4.1 Estructura del almidón

El almidón es parte de los carbohidratos o polisacáridos que, junto con los lípidos, las proteínas y los ácidos nucleicos, constituyen las cuatro clases principales de moléculas biológicamente activas. Dicha macromolécula está compuesta de dos polímeros de unidades de glucosa: amilosa, de carácter esencialmente lineal, y la amilopectina,

altamente ramificada y de mayor peso molecular **(Singh y col. 2005)** citado en **(Hernández 2013)**.

1.4.1.1 Amilosa

La amilosa es un polímero lineal que forma largas cadenas, formadas por unidades anhidras de glucosa, unidas mediante enlaces α -(1-4) (el carbono-1 de unidad de D-glucosa enlazado al carbono-4) como se muestra en la figura 1.1 (a). La mayoría de los almidones contiene entre un 20-30% de amilosa unida por átomos de hidrógeno por lo que es lipofílica, mientras que los grupos hidroxilos están situados en el exterior de la hélice haciéndolo hidrofílico. En los extremos, esta molécula polimérica de unidades de glucosa anhidra posee un hidroxilo primario y dos secundarios, así como un grupo aldehídico reductor en la forma de hemiacetal, el cual es llamado extremo reductor de la molécula. El opuesto no reductor contiene un hidroxilo primario y tres hidroxilos secundarios y es, esta abundancia de grupos hidroxílicos, la que le imparte la propiedad hidrofílica a este polímero, sin embargo a causa de su linealidad y movilidad y los grupos hidroxilos, tiende a orientarse de forma paralela muy cercana entre sí permitiendo la formación de puentes de hidrógeno con los hidroxilos del polímero adyacente resultando en la reducción de la afinidad del polímero por el agua y la opacidad de la solución **(Corradini, 2005)**.

1.4.1.2 Amilopectina

La amilopectina constituye el 70-80% del almidón y es un polímero ramificado compuesto de unidades de glucosa, unidas mediante enlaces α -1-4 (en su mayoría) y α -1-6 (para las ramificaciones) como se muestra en la figura 1.1 (b) donde hay un punto de ramificación por cada 20-30 unidades de glucosa. El gran tamaño y la naturaleza de las uniones de amilopectina reducen la movilidad de los polímeros e interfiere con la tendencia de poder llegar a orientarse muy cercanamente entre ellas y permitir la formación de enlaces hidrógenos significativos. Por lo anterior, en la gelificación las soluciones acuosas de amilopectina son caracterizadas por estabilidad y claridad, y las soluciones de amilopectina no forman películas tan fuertes y flexibles como la amilosa **(Coopeland y col. 2009)**.

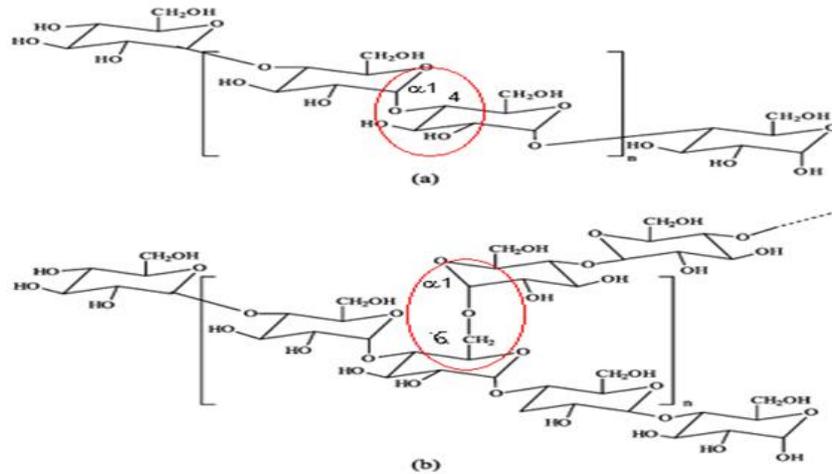


Figura 1.1. Estructura química de amilosa (a) y amilopectina (b)

A diferencia de la amilosa, la amilopectina no forma complejos con ácidos grasos o con alcoholes orgánicos y produce disoluciones helicoidales o micelares que dan una coloración rojo violácea con el yodo, debido a su poca afinidad (**Lehninger, 1995**).

1.4.2 Gelatinización de las partículas de almidón

Este fenómeno genera cambios importantes en las propiedades del almidón, causando un aumento de volumen en el gránulo y una progresiva pérdida de su estructura organizativa (detectada como pérdida de birrefringencia y cristalinidad) incrementando la permeabilidad al agua y a sustancias disueltas en ella (incluyendo colorantes), también la lixiviación de los componentes del almidón, la viscosidad de la suspensión del mismo en una solución acuosa y su susceptibilidad a la digestión enzimática (**Ruíz 2009**). Cuando estas pastas o engrudos se dejan enfriar o son almacenados se produce un fenómeno conocido como retrogradación el cual es la formación de un precipitado (cristalización) según sea el origen o la concentración de almidón debido a la asociación lenta de las moléculas de amilosa (**Sánchez 2002**).

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. Aparte de la temperatura, la gelatinización también se inicia por altas presiones hidrostáticas, aunque la degradación de los gránulos sucede de diferente manera, por lo que la viscosidad suele ser menor que después del tratamiento con calor, debido que los gránulos de almidón se mantienen intactos en su mayoría y la amilosa solubiliza pobremente (**Knorr y col. 2006**).

1.4.3 Hidrólisis del almidón

El almidón consiste de cadenas de unidades de glucosa, lineales para la amilosa y ramificadas para la amilopectina. La hidrólisis de una unión en la cadena involucra la ruptura de los enlaces glucosídicos de los polímeros que constituyen al almidón. Sacáridos de distintos pesos moleculares son liberados y dependiendo de la extensión y el tipo de hidrólisis se obtendrán una diversidad de productos **(Bettín 2010)**. En la actualidad la hidrólisis del almidón generalmente es llevada a cabo en su totalidad por un proceso netamente enzimático. La destrucción controlada de las cadenas poliméricas o hidrólisis del almidón, a través de soluciones ácidas o catalizadas por enzimas, dan lugar a la formación progresiva de moléculas de maltosa, glucosa, dextrinas y otros azúcares.

La reacción de hidrólisis del almidón es endotérmica y de primer orden. Se debe controlar la temperatura para evitar la formación de sustancias indeseables por reacciones colaterales **(Ordúz y Vergel 1987)**. La temperatura no es la única variable de gran peso en este proceso, sino que existen otras como el pH, la concentración de la enzima, la concentración del sustrato, el tiempo de reacción y la concentración de iones metálicos según lo reportado por **Fernández (2002)**.

Los productos hidrolizados se identifican por el tipo de hidrólisis usado en su fabricación; industrialmente se utilizan tres tipos: hidrólisis ácida, hidrólisis enzimática e hidrólisis ácida-enzimática.

1.4.3.1 Hidrólisis ácida

La destrucción controlada de las cadenas poliméricas o hidrólisis del almidón, a través de soluciones ácidas o catalizadas por enzimas, dan lugar a la formación progresiva de moléculas de maltosa, glucosa, dextrinas y otros azúcares **(Morales y Sánchez 2004)**. Comercialmente los hidrolizados de almidón son clasificados con base en la Dextrosa Equivalente (DE), el cual es un indicativo del contenido de azúcares reductores calculados como D-glucosa en base seca. Los productos hidrolizados se identifican por el tipo de hidrólisis usado en su fabricación; industrialmente se utilizan tres tipos: hidrólisis ácida, hidrólisis ácido-enzimática e hidrólisis enzimática **(Torres 2012)**. Entre los métodos de modificación química de almidones, mencionados anteriormente, la técnica de la hidrólisis ácida es una de las más utilizadas en la industria de obtención de almidones modificados, destinados a la industria de alimentos, papelera y textil.

Este sistema es aplicable cuando se desea conseguir productos en un rango de DE de 20-58. Aquí la hidrólisis puede efectuarse de forma continua o discontinua, se utilizan convertidores continuos porque son más eficientes, permiten mejor control de DE, minimizan la formación de color en los productos de conversión y se reduce enormemente el tiempo de operación **(Morales y Sánchez 2004)**.

1.4.3.2 Hidrólisis enzimática

Este proceso consiste en la utilización de enzimas como catalizadores para romper las moléculas de almidón, obteniéndose productos semejantes a la de la hidrólisis ácida. El tipo de enzimas más utilizada en el proceso son las amilasas, siendo las más conocidas las α -amilasa y las β -amilasa, las primeras desdoblan el almidón en glucosa y maltosa; se caracteriza por la facilidad de fragmentación de los almidones en dextrinas reductoras, que no dan color en el yodo, y las segundas, convierte la totalidad del almidón en glucosa. Este proceso se utiliza para obtener hidrolizados con DE de 73 o más, debido a que se garantiza menor concentración de impurezas tales como ácido orgánico, cenizas y productos coloreados. El producto así obtenido es la materia prima para la fabricación de jarabes con alto contenido de fructuosa y en la dextrosa cristalina. Para una eficiente hidrólisis enzimática del almidón por las amilasas conviene que esté gelatinizado, por lo que se realiza un cocimiento del almidón antes de la adición de dichas enzimas. Existen dos fases dentro del proceso de hidrólisis enzimática. Primero, la licuefacción y segundo, la sacarificación. La licuefacción se lleva a cabo en presencia de alfa-amilasa o beta-amilasa, mientras que la sacarificación, que es la conversión de almidón a glucosa, en presencia de glucoamilasa o pululanasa **(Morejón 2016)**.

1.5 Enzimas degradadoras de almidón

Las enzimas son proteínas (polipéptidos) que contiene cientos de residuos aminoacídicos que actúan como catalizadores efectivos en procesos tanto biológicos como industriales, pero son pocos los que están directamente relacionados en la interacción con el sustrato o con la catálisis de la reacción **(Mera y col. 2003)**. Algunas de las generalidades de las enzimas son:

Estabilidad: La desnaturalización o alteración por algún factor se traduce en una pérdida total o parcial de su actividad la cual puede llegar a ser irreversible dependiendo del tipo de estructura que sea desnaturalizada. Un aumento de la

temperatura en la enzima se traduce en un aumento de la energía vibracional que puede provocar la ruptura de los puentes de hidrógeno y la destrucción de las interacciones apolares. El pH afecta fuertemente la estabilidad debido a que la carga de los residuos aminoacídicos de la proteína depende de la concentración de protones en el medio, valores de pH que provoquen acumulación de las cargas (negativas o positivas por encima o por debajo del punto isoeléctrico) pueden provocar desestabilización de la estructura de la enzima debido a las fuerzas de repulsión.

Actividad: La capacidad catalítica o actividad es la propiedad esencial de una enzima. Desde el punto de vista termodinámico, la enzima como todo catalizador actúa disminuyendo la magnitud de la energía de activación que requiere una reacción de transformación de sustrato a producto. La capacidad catalítica reside en el centro activo el cual es una estructura compleja cuya configuración permite ubicar la molécula de sustrato en la posición correcta para que los grupos funcionales de la enzima efectúen su transformación química resultando así clara la relación entre funcionalidad biológica y estructura tridimensional.

Especificidad: Una de las propiedades más sobresalientes de las enzimas como catalizadores es su alta especificidad respecto al sustrato, razón por la cual esta debe poseer los enlaces químicos que pueden ser atacados por los grupos funcionales del centro activo de la enzima permitiendo su correcta ubicación en él para que la reacción tenga lugar.

1.5.1 Amilasas

Desdoblan los enlaces α -(1-4) del almidón en varios azúcares dentro de los que se encuentran la glucosa y la maltosa; se caracterizan por la facilidad de fragmentación de los almidones en dextrinas reductoras que no dan color con el yodo (**Ochoa y Herazo 2008**). Existen tres tipos de amilasas que se utilizan en el proceso de licuefacción: la de *Bacillus amyloliquefaciens*, la de *Bacillus liqueniformis* (bacterianas) y la *Aspergillus oryzae*. Estas se diferencian por su termoresistencia, siendo la *B. liqueniformis* la más estable con una temperatura óptima de 90°C (dando como productos: maltosa, maltotriosa, maltopentosa) contra 70°C de la *B. amyloquifaciens* (dando como producto: maltohexosas), esta última enzima se utiliza cuando el propósito es producir jarabes de maltosa siendo el disacárido de mayor producción (**Serna 2011**).

1.5.1.1 Bialfa T

Es una enzima amilolítica líquida 1,4- α -D-glucan-4-glucanohidrolasa de calidad alimentaria, producida por fermentación sumergida del *Bacillus licheniformis*. Hidroliza al azar los enlaces glucosídicos alfa-d-1,4 del almidón produciendo dextrinas solubles y oligosacáridos. Es extremadamente termoestable, su actividad aumenta con la temperatura y alcanza un máximo en el rango de 95-105°C y actúa bien a niveles bajo de pH que estén en el rango de 5 y 7. También se conoce que esta enzima contiene calcio fuertemente ligado, por lo que pequeñas cantidades adicionales de calcio estabilizan aún mejor la enzima a temperaturas por encima de 60°C (**Lehninger 1995**).

1.5.2 Glucoamilasa

Dentro de estas se encuentran las de *Aspergillus Níger* y las de *Rhizopus* sp, siendo más frecuente el uso de la primera. La amiloglucosidasa α -(1-4) glucan- glucosidasa actúa como un exocatalizador de la hidrólisis de enlaces α -(1-4) glucosídicos y debido a su bajo grado de especificidad en enlaces α -(1-3) y α -(1-6) glucosídicos, su accionar es más lento en la producción de moléculas de glucosa (**Morales y col. 2008**).

1.5.2.1 Glucozyme 2X

Glucozyme 2X es una enzima amiloglucosidasa, producida por la fermentación de una cepa seleccionada de *Aspergillus níger*. Es del grupo de las exo-1,4-alfa-glucosidasa (1,4D-Glucan glucanohidrolasa) que cataliza la liberación de sucesivas unidades de glucosa a partir del final de las cadenas de almidón licuado. Puede hidrolizar tanto las ramificaciones alfa-d-1,6 como los enlaces poliméricos alfa-d-1,4 del almidón. En cuanto a la temperatura, en ensayos efectuados a pH=4,3 y a diferentes temperaturas se encontró que la actividad óptima radica entre 65 y 70°C, sin embargo, para períodos prolongados se recomienda 60°C. Por otra parte, en ensayos llevados a cabo a 60°C y a diferentes pH, esta enzima tiene un óptimo de actividad a pH de 4,7 y un margen de trabajo de 3,5-6,0.

1.5.3 Enzima Glucosa Isomerasa

La glucosa isomerasa también se conoce como xilosa isomerasa, debido a su capacidad de convertir glucosa en fructosa. Es de gran importancia en la industria alimenticia para la producción de jarabe de fructosa; también es de interés en la producción de etanol a partir de xilano. Esta enzima se puede obtener de una gran

variedad de especies microbianas. Estos incluyen *Streptomyces olivochromogenes*, *S. marinus*, *S. rubiginosus*, *Bacillus coagulans*, *Actinoplanes missouriensis* y *Microbacterium arborescens* (**Jiménez 2014**). Las propiedades de la enzima varían dependiendo de la fuente, pero todas son similares en términos de operación de pH en un rango de 7,5-8,5 y temperatura cercana a 60 °C (**Rubio y col. 2004**). Esta enzima es apta para utilizarse en forma inmovilizada puesto que es intracelular, es estable a temperaturas elevadas, suficientes para frenar la contaminación microbiana, y porque todos los reactantes son moléculas pequeñas de forma que plantean pocos problemas de difusión. La actividad de la glucosa isomerasa producida por algunos microorganismos se ha utilizado en forma inmovilizada a soportes sólidos en la conversión continua de glucosa a fructuosa (**Rivero 2017**).

1.6 Jarabes glucosados

Los jarabes de D-glucosa son una mezcla entre una solución acuosa de D-glucosa, maltosa y otros oligosacáridos llamados dextrinas. Cabe señalar que en la industria y en gran parte de la literatura especializada, se llaman jarabes glucosados a hidrolizados a partir de una DE de 20 (aunque estos tengan muy bajos contenidos de glucosa) (**Rodríguez 2016**). A menudo se incurre en el error de pensar que dicho jarabe contiene 20 % de glucosa, pero de acuerdo con la definición, debe entenderse como un jarabe que presenta un poder reductor similar al de una solución con 20% de glucosa (**García y col. 1993**). Las características de los jarabes se obtienen según las condiciones de hidrólisis y el medio utilizado para dicha hidrólisis (**Sánchez 2002**). No todos los jarabes de glucosa son iguales y existen algunos parámetros que se deben tener en cuenta a la hora de seleccionar jarabes de glucosa para una aplicación específica, como son: el contenido de sólidos Brix y la dextrina equivalente DE.

1.6.1 Grados Brix

Se define como la concentración de sólidos solubles y es una medida de la densidad, así 1°Brix, es la densidad a 20°C, de una solución de sacarosa al 1 % (**Blanco 2002**).

1.6.2 Dextrina Equivalente (DE)

Indicativo del contenido de azúcares reductores de un edulcorante y calculado como dextrina. La DE representa el porcentaje de hidrólisis de los enlaces glucosídicos presentes. La glucosa pura tiene una DE de 100, y el almidón tiene una DE igual

a cero. Durante la hidrólisis del almidón, la DE indica qué tanto el almidón ha sido desdoblado. Otra definición utilizada generalmente, es el porcentaje en peso de glucósidos reductores expresados como D-glucosa presentes en el jarabe con respecto al peso de los sólidos totales de oligosacáridos en base seca. El nivel de dulzor del jarabe de glucosa aumenta a medida que aumenta el DE como lo muestra la tabla 1.2.

Tabla 1.2. Propiedades funcionales de los derivados de almidón en relación con sus valores de DE.

Propiedades	Valor de DE	
	Bajo	Alto
Dulzor	—————→	
Higroscopicidad	—————→	
Depresión del punto de congelación	—————→	
Elevación del punto de ebullición	—————→	
Presión osmótica	—————→	
Reacción de pardeamiento	—————→	
Fermentabilidad	—————→	
Potenciación del sabor	—————→	
Viscosidad	←—————	
Inhibición de la cristalización	←—————	
Agente de cuerpo	←—————	
Estabilizador de espuma	←—————	

Fuente: (Nieblas 2015)

La viscosidad del jarabe de glucosa depende del grado de hidrólisis, materia sólida, y temperatura. La viscosidad aumenta a medida que aumenta el DE, así como también existe una disminución del punto de congelación, debido al porcentaje de azúcares reductores (**Sánchez 2002**). La maltodextrinas es un almidón parcialmente hidrolizado que no es dulce y que tiene un valor DE menor de 20, mientras que el jarabe proveniente del almidón de maíz y tiene un valor DE de 20 a 91. La dextrosa comercial tiene valores DE de 92 a 99 (**Lancho 2015**).

1.6.3 Propiedades funcionales del jarabe de glucosa

Poder edulcorante: Por ser la glucosa ligeramente dulce regula el poder edulcorante en productos alimenticios. Normalmente un jarabe con 40 % de Equivalente de Dextrosa tiene un poder edulcorante de 40-45 % en relación con la sacarosa.

Control de cristalización: Evita el reordenamiento de los cristales de sacarosa en la producción de confitería, bebidas y jarabes, ampliando el tiempo de vida útil de los productos elaborados.

Poder reductor: Previene la oxidación, manteniendo de esta forma la estabilidad de color y brillo en productos envasados como jugos, licores y conservas en general.

Poder Conservante: Funciona como conservante en alimentos, ya que aumentan la presión osmótica del sistema de tal manera que los microorganismos no pueden crecer. En el caso de las mermeladas y productos similares, los jarabes ayudan al proceso de gelificación de las pectinas, y además causan una deshidratación al absorber agua que trae como consecuencia la inhibición de microorganismos.

Aporte de viscosidad: Aporta viscosidad contribuyendo a mejorar la textura en productos como licores, rellenos de confitería, rellenos de panadería; en lácteos como helados y yogurt.

Poder energético: Forma parte de la formulación de alimentos infantiles, contribuyendo en el balance energético. Aporta alrededor de cuatro calorías por gramo **(Morales y Sánchez 2004)**.

1.6.4 Aplicaciones de los jarabes glucosados

El jarabe de glucosa es un sustituto viable del azúcar. Puede ser usado junto con una variedad de sustancias sólidas secas, sin que afecte otros parámetros importantes tales como el poder edulcorante, contenido de cenizas y acidez. Esta ventaja permite su uso en un amplio rango de industrias.

Confitería: En ésta industria se utiliza como agente que evita la cristalización y ayuda a homogenizar productos como gomas de mascar y chocolates. Suministra una textura lisa, goza de cualidades de buen preservante para una larga vida en estantería y tiene varias propiedades organolépticas deseadas.

Mermeladas, gelatinas y frutas enlatadas: En este tipo de alimentos procesados, el jarabe de glucosa es usado para prevenir la cristalización del azúcar. Actúa como un buen preservativo y previene la descomposición del producto sin

incrementar excesivamente su dulzura. Es muy efectivo en disimular el excesivo dulce mientras realza el sabor de la preparación.

Productos de panadería: El jarabe de glucosa añade cuerpo, volumen y una óptima edulcoración a los productos de panadería. Por esta razón es usado en rellenos de cremas y pasteles. También previenen la cristalización, aumenta el tiempo que el producto tarda en estanterías y sus propiedades organolépticas mantienen el producto fresco por más tiempo.

Heladería: Da una textura suave y cremosa, asegura que los helados no se derritan pronto y permite edulcoración homogénea.

Farmacéuticas: Destaca su uso en jarabes y pastillas para la toz, tónicos basados en vitaminas y como agente granular para recubrimientos de tabletas. Provee cuerpo, consistencia, un buen sabor en la boca y edulcoración balanceada cuando son usados otros carbohidratos edulcorantes tales como el sorbitol.

Otras aplicaciones: El jarabe de glucosa también encuentra uso como preservantes, además ayuda en las industrias de fermentación y de fabricación de cerveza. También es usado en las industrias tradicionales de extracción de aceites por sus propiedades como adhesivos en gomas. Es usado para mejorar la estabilidad en adhesivos, como retardante fijo en concreto, como humectante en refrescadores de aire y para el control de la evaporación en colonias y perfumes. El jarabe de glucosa añade sabor al tabaco y presta una textura suave.

1.6.5 Descripción del proceso de producción de jarabes glucosados por vía enzimática

Se parte de preparar una suspensión de agua y almidón. El porcentaje de sólidos en esta suspensión se encuentra entre el 30 y 40 % en peso. Estudios realizados por **Nieblas (2015)** arrojan que se obtienen buenos resultados usando 35 % en peso para una suspensión de agua y almidón de sorgo, mientras que **Medina (2015)** señala un valor de 30 % p/p como óptimo para este mismo sustrato, otros estudios como el de **Rega (2016)** señala un valor de 30 % en peso de esta variable para una suspensión de agua y harina de sorgo. A continuación, se ajusta el pH de la suspensión hasta un valor entre 5 y 6,5, que es en el que actúa la enzima alfa-amilasa para la licuefacción, pues más adelante resulta más dificultoso este paso. Posteriormente, con el objeto de gelatinizar el almidón, la solución es calentada hasta una temperatura entre 95 y 110 °C, se le añade la enzima alfa-amilasa y comienza la licuefacción.

El objetivo del proceso de licuefacción es convertir los gránulos de almidón de la suspensión concentrada, a dextrinas solubles de baja viscosidad. Generalmente es calentada a una temperatura superior a 94 °C y por ser la enzima 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 α -1,4 enlaces glucosídicos y actúan de una manera aleatoria pero reproducible para reducir el peso molecular de los polisacáridos. Prácticamente todas las alfa-amilasas requieren calcio para una adecuada estabilidad. La cantidad de calcio necesaria es de 5 a 200 ppm. La hidrólisis dura de 1 a 2 horas hasta obtener una DE de 10-15 %, suficiente para evitar el fenómeno de retrodegradación del almidón. La enzima es inactivada por un segundo tratamiento de calor hasta temperatura ambiente. 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 (**Pardo y Ribera 2001**). Esta etapa de hidrólisis ha sido estudiada por **Nieblas (2015)** empleando la enzima Termamyl 120L con concentración óptima de 0,16 % p/p frente al sustrato almidón de sorgo obteniéndose buenos resultados con una DE máxima de 33,97 % y un Brix de 29,56. Otros estudios muestran resultados también favorables, llevados a cabo por **Rega (2016)**, autora que empleó la enzima Bialfa T con concentración óptima de 2 % p/p frente al sustrato harina de sorgo lográndose una DE máxima de 44,3 % y un Brix de 19,5.

Como segundo proceso de hidrólisis se lleva a cabo la sacarificación, con el objetivo de convertir la solución licuada de la etapa anterior a D-glucosa en rendimientos tan altos como sea posible. Usando la glucoamilasa, procedente fundamentalmente de cepas de *Aspergillus Níger*, es posible una conversión prácticamente total del almidón a D-glucosa. La cinética de la sacarificación del almidón licuado por glucoamilasa es complicada, porque en un tiempo dado en la hidrólisis una amplia serie de dextrinas lineales y ramificadas están presentes causando diversas reacciones simultáneas, cada una con una velocidad diferente. La cantidad de glucosa puede ser incrementada por tratamiento del almidón con enzimas desramificadoras tales como la isoamilasa y pululanasa que ayudan a reducir los enlaces α -(1-6) glucosídicos que impiden la rápida hidrólisis del almidón por glucoamilasa. El hidrolizado de almidón con alfa-amilasa es ajustado a un pH de 4,1-4,5, después de haber desactivado la primera enzima. La

reacción se efectúa a 60-62°C, la dosis de enzima depende de la actividad, pero oscila entre 0,65 y 0,8 L/ton de almidón, aunque esta dosis también varía de acuerdo a la DE y al tiempo de residencia deseado. De esta forma es posible alcanzar equivalentes en dextrosa del orden de 96 y 98, lo que implica entre 92 y 96 % de glucosa. La reacción tiene una duración entre 40 y 72 horas, después de las cuales es necesario desactivar la enzima con un tratamiento de calor a 80°C durante 20 minutos (**Serna 2011**). Esta etapa, al igual que la anterior, cuenta con estudios realizados por la autora **Nieblas (2015)** quien obtuvo valores máximos de DE de 84,4 % y Brix de 52,1 actuando la enzima AMG con concentración óptima de 0,375 % p/p frente al dextrinizado de almidón de sorgo, aunque el análisis estadístico demostró que esta concentración no es significativa en el proceso ya que no influye directamente en los resultados de DE y Brix alcanzados; por otra parte el tiempo de sacarificación sí resultó ser influyente de manera positiva para los Brix pero no para la DE, comportándose la velocidad de reacción con tendencia a disminuir a partir de las 24 horas de reacción. Empleando la enzima Glucozyme 2X frente al dextrinizado de harina de sorgo realizó sus estudios la autora **Rega (2016)** con valor fijo de 0,75 %p/p de concentración para toda su experimentación consiguiendo valores máximos de DE de 87,25 % y Brix de 22,9. Al término de la hidrólisis y una vez inactivada la enzima, el jarabe es purificado mediante tratamiento con carbón activado, filtración y resinas de intercambio iónico. El filtrado con carbón activado se lleva a cabo para remover impurezas, material proteico y pigmentos. La resina aniónica se utiliza principalmente para remover fenólicos y cloruros, y la resina catiónica para remover calcio que es un inhibidor de la enzima glucosa isomerasa que se emplea posteriormente en la etapa de conversión a jarabe fructosado (**Aguilasocho 2004**). Luego de estos procesos se evapora la solución hasta un valor de Brix de 65.

1.7 Purificación del jarabe de glucosa empleando columnas de intercambio iónico

El intercambio iónico es una operación básica de separación con una interfase sólido-líquido, se produce al poner en contacto un sólido iónico (intercambiador) y una disolución conteniendo iones (electrolito). La eficacia del proceso depende del equilibrio sólido-fluido y de la velocidad de transferencia de masa (**Rashmi 2012**). Las resinas de intercambio iónico son materiales sintéticos, sólidos e insolubles en agua, que se presentan en forma de esferas o perlas de 0.3 a 1.2 mm de tamaño efectivo,

aunque también las hay en forma de polvo. Están compuestas de una alta concentración de grupos polares, ácidos o básicos, y actúan tomando iones de las soluciones y cediendo cantidades equivalentes de otros iones. Hay dos tipos básicos de resinas según **Ortega (2015)**:

- Resinas del intercambio de cationes: emiten iones hidrogeno (H^+) u otros iones como intercambio por cationes impuros presentes en determinada solución.
- Resinas de intercambio de aniones: despiden iones de hidróxido (OH^-) u otros iones de cargas negativas en el intercambio por los iones impuros que están presentes en determinada solución.

La principal ventaja de las resinas de intercambio iónico es que pueden recuperar su capacidad de intercambio original, mediante el tratamiento con una solución regenerante que puede ser ácido, base o sal (según la resina y el uso) que desplace los iones retenidos por la resina y los reemplace por iones deseados. Este procedimiento se llama regeneración y se realiza cuando la resina agota su capacidad, permitiendo de esta manera utilizar la resina una y otra vez (**Ávila 2014**).

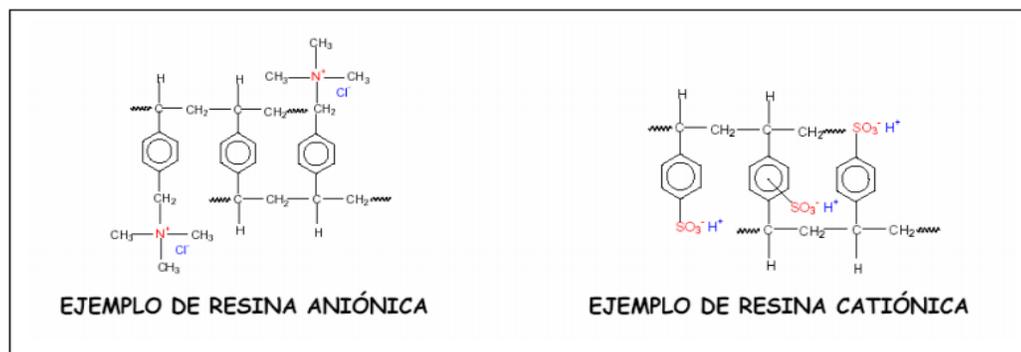


Figura 1.2. Estructura de una resina de intercambio.

La mayoría de las resinas de intercambio iónico se usan en columnas. El proceso de intercambio es una operación discontinua: una etapa de agotamiento, y una etapa de regeneración de las resinas agotadas. Se emplean fundamentalmente en la descalcificación, la desnitratación, la desionización, la desmineralización y el ablandamiento de agua (**Frederic y col. 2010**).

Al inicio de la operación de intercambio iónico la mayor parte de la transferencia de masa tiene lugar cerca de la entrada del lecho donde el fluido se pone en contacto con el intercambiador. A medida que transcurre el tiempo el sólido próximo a la entrada se encuentra prácticamente saturado y la mayor parte de la transferencia tiene lugar lejos

de la entrada (**Leakovic y col. 2000**). Debido a la resistencia que opone el sistema a la transferencia de iones desde el seno del líquido a los centros de intercambio se establece un gradiente de concentración en el lecho. La región donde ocurre la mayor parte del cambio de concentración es la llamada zona de transferencia de masa, esta zona separa la zona virgen de la resina y la de saturación. A medida que progresa el intercambio iónico la zona de transferencia de masa se traslada en el lecho hasta alcanzar su extremo inferior como lo representa la figura 1.3, instante a partir del cual la disolución de salida contendrá cantidades crecientes de los iones que se desea intercambiar. El tiempo transcurrido desde el comienzo de la operación en el lecho hasta que los iones de la disolución aparecen en la corriente de salida o más concretamente cuando se alcanza la máxima concentración permisible en el efluente, se denomina tiempo de ruptura. La curva que representa la evolución de la concentración del efluente que abandona el lecho recibe el nombre de curva de ruptura u onda de adsorción y se representa en la figura 1.3 (**Agamez 2014**).

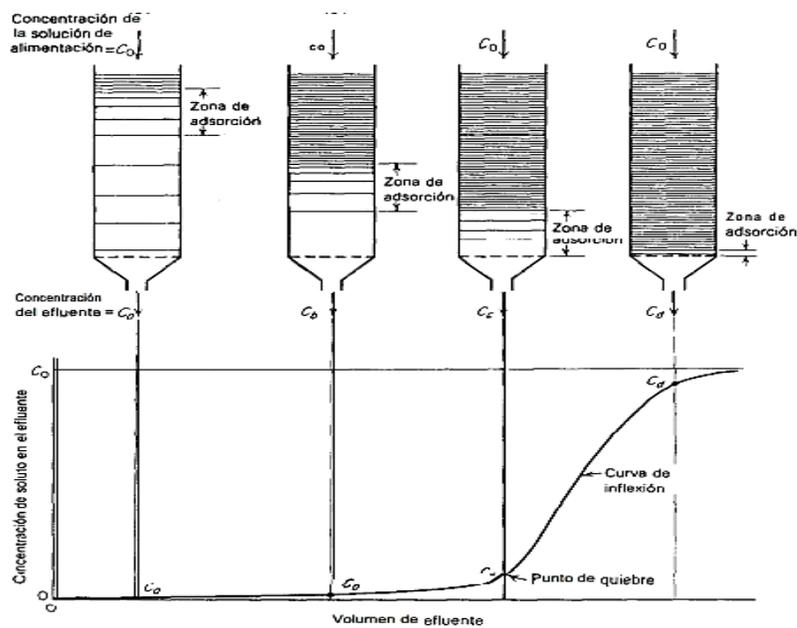


Figura 1.3. Curva de ruptura u onda de adsorción.

(Fuente: Treybal 1985)

La purificación del jarabe de glucosa se lleva a cabo con el fin de que cumpla con los parámetros de pureza y sea apto como sustrato para la conversión a fructosa por la acción de la enzima glucosa isomerasa inmovilizada. Se realiza un tratamiento con las resinas de intercambio iónico con el fin de eliminar una serie de minerales que

afectarían este proceso. Luego de esta etapa el jarabe de glucosa debe tener una conductividad menor a 50 $\mu\text{S}/\text{cm}$, una concentración de calcio inferior a 1 ppm y una absorbancia a 480 nm menor a 0.3 (**Quesada y Hernández 2012**).

1.7.1 Escalado de equipos. Criterios de escalado.

Escalado es el proceso mediante el cual se logra la exitosa puesta en marcha y la operación económica de una unidad a escala comercial basándose, al menos en parte, en resultados de investigaciones realizadas a una escala más pequeña. Para que el concepto de escalado sea aplicado, es imprescindible que el diseño se realice sobre la base de investigaciones que se tengan que realizar con ese fin específico, a una escala inferior a la industrial. Para la definición de los límites entre una escala y otra existe una gran diversidad de criterios y en muchos casos se ha utilizado el volumen de los equipos como el criterio fundamental, particularmente en lo relacionado con la industria Biotecnológica. También se han utilizado como criterios las relaciones entre las dimensiones lineales de los equipos (factores de escala geométricos), a partir de consideraciones de criterios de semejanza, se toma como valor aproximado que los factores de escala geométricos (lineales) deben estar en el rango de 5 a 15 (**González 2000**).

Según el Principio de Semejanza se establecen los cuatro tipos de semejanza más importantes en las aplicaciones de Ingeniería Química y Bioquímica (**Perry y Green 1989**):

- 1. Semejanza geométrica:** La condición de dos cuerpos o espacios en los cuales para cada punto de uno existe un punto correspondiente en el otro.
- 2. Semejanza mecánica:** Término genérico que engloba las semejanzas estática, cinemática y dinámica.
 - **Semejanza estática:** La condición de cuerpos o estructuras semejantes geoméricamente, cuando sometidas a tensión constante sufren deformaciones relativas tales que permanecen geoméricamente semejantes y por consiguiente las relaciones de los desplazamientos correspondientes son iguales a la relación de escala.
 - **Semejanza cinemática:** Condición de sistemas semejantes geoméricamente en los cuales las partículas correspondientes describen trayectorias semejantes geoméricamente en intervalos de tiempos correspondientes.

- **Semejanza dinámica:** Condición de sistemas en movimiento, semejantes geoméricamente, en los cuales son iguales las relaciones entre las fuerzas correspondientes.

3. Semejanza térmica: La condición de sistemas semejantes geoméricamente en los cuales la relación de diferencias de temperaturas correspondientes es constante y si están en movimiento, son cinemáticamente semejantes.

4. Semejanza química: La condición de sistemas semejantes geoméricamente, cinemáticamente y térmicamente, en los cuales las diferencias de concentración correspondientes mantienen una relación constante unas con otras, o como caso especial de la definición general, son iguales entre sí.

1.8 Jarabes fructosados

Los jarabes de maíz de alta fructosa, JMAF (HFCS, por sus siglas en inglés, high fructose corn syrup) son soluciones concentradas que contienen básicamente fructosa y glucosa (dextrosa) con cantidades menores de sacáridos de alta masa molecular. Los productos comerciales pueden llegar a contener 42, 55 o 90 % de fructosa en base seca (**Atiyeh y col. 2002**). La fructosa (también llamada levulosa o azúcar de frutas) se encuentra naturalmente en muchas frutas y vegetales. La miel contiene hasta un 50% en masa de fructosa en base seca. Cada unidad de sacarosa se compone de una molécula de fructosa y una molécula de dextrosa que en conjunto forman al disacárido ya mencionado. Se considera el azúcar natural más dulce, esto beneficia a los productos que la contienen, debido a que los hace menos calóricos, porque se requiere menor cantidad para obtener una dulzura similar a la de la sacarosa (**Wikipedia 2018**).

1.8.1 Propiedades funcionales de los jarabes de fructosa

Los jarabes de maíz de alta fructosa son más dulces que los jarabes de maíz convencionales debido a la presencia de fructosa, aunque la intensidad de dulzura depende de muchos factores tales como la temperatura, el pH y la concentración. En general, el jarabe de maíz de alta fructosa con 42 % (p/p) presenta la misma dulzura que la sacarosa, el de 55 % (p/p) es un poco más dulce que la sacarosa y, finalmente, el de 90 % (p/p) es de un 20 a un 60 % más dulce que la sacarosa. Otras propiedades del jarabe con alto contenido de fructosa es que presenta una alta solubilidad, reduciendo así la posibilidad de la cristalización; sus propiedades humectantes permiten que se alargue la vida de anaquel en productos de panadería; la fácil

descomposición de la fructosa durante el cocimiento da como resultado una mejora en el sabor y en color y su alta presión osmótica inhibe el crecimiento microbiano (**Rubio y col. 2004**).

1.8.2 Aplicaciones de los jarabes de fructosa

Su principal uso es como edulcorante en bebidas gaseosas reemplazando a la remolacha o a la caña de azúcar. Su principal ventaja es que para el mismo nivel endulzante es entre un 10-20 % más barato que la sacarosa, además de ser menos calórica. Otra de sus ventajas es la mejor solubilidad de la glucosa y fructosa frente a la sacarosa, lo cual implica una menor tendencia a cristalizar en una amplia gama de productos. Por estos motivos se utiliza en productos de confitería como mermeladas y cremas, helados, conservas, etc. Aumenta el sabor a fruta y también a chocolate, y enmascara el gusto amargo de las sustancias sustitutas del azúcar. La fructosa reduce el punto de congelación en los helados y así los hace más blandos, más cremosos y agradablemente “sabrosos”. De acuerdo con las pruebas clínicas, los diabéticos pueden controlar su nivel de glucosa mucho mejor con alimentos que contienen fructosa que con los que contienen sacarosa o almidón (**Lancho 2015**).

1.8.3 Descripción del proceso de conversión de glucosa a fructosa

Si se convierte glucosa en fructosa, el producto aumenta su dulzura y en consecuencia su valor. Una forma de llevar a cabo esto es la isomerización alcalina, aunque esta técnica produce un color excesivo y demasiados subproductos. La glucosa isomerasa es una enzima que isomeriza la glucosa a concentraciones elevadas, dando lugar a jarabes de maíz ricos en fructosa, este procedimiento es el que más enzima inmovilizada consume mundialmente y su producción de jarabes alcanza varios millones de toneladas por año según **Girelli (2005)** citado en **Krajewska (2009)**.

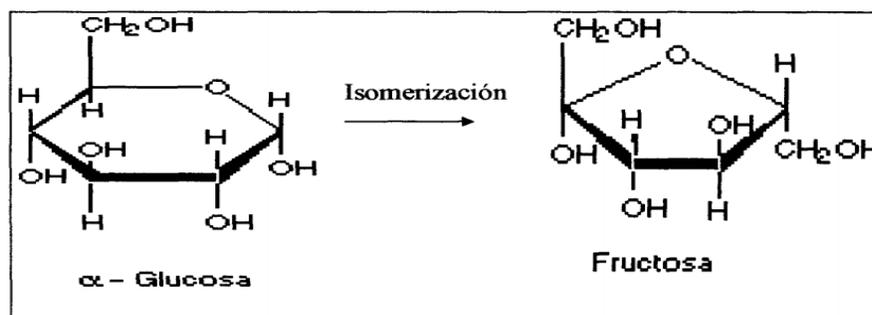


Figura 1.4. Estructura de glucosa y fructosa.

En este proceso es necesario mantener una temperatura relativamente alta para obtener una conversión de glucosa en fructosa aceptable. La temperatura seleccionada es habitualmente de 55-60°C ya que así también se minimiza el riesgo de contaminación microbiana. El pH de la reacción debe ser 7 o mayor para asegurar su correcta actividad y garantizar su estabilidad. Para limitar la formación de subproductos el tiempo de reacción debe ser minimizado, lo cual puede realizarse manteniendo altas concentraciones de enzima inmovilizada (**Hernández y col. 2008**). La isomerización de glucosa a jarabe de alta fructosa a nivel industrial se realiza fundamentalmente en reactores continuos, en los cuales la glucosa obtenida de la sacarificación del almidón se pasa a través del reactor que contiene la glucosa isomerasa (**Mateo y col. 2007**). Las impurezas insolubles de la alimentación son eliminadas por filtración mientras que las solubles son eliminadas poniéndolas en contacto con carbón activo seguido de un intercambio iónico.

1.9 Conclusiones Parciales

- Entre los cereales analizados el sorgo presenta grandes condiciones para ser utilizado en la industria alimenticia y en particular en los procesos de obtención de almidón y de jarabes glucosados, sustituyendo al maíz que es la materia prima más utilizada y con un alto costo de importación para el país.
- Las vías empleadas en la hidrólisis de los almidones para la obtención de jarabes: ácida y enzimática, depende del empleo que se vaya a dar a los mismos y donde la hidrólisis enzimática es la más utilizada actualmente.
- Los jarabes glucosados y fructosados presentan propiedades muy beneficiosas dentro de los diversos tipos de jarabes que se producen a partir de almidón, además de su diversidad de usos en la producción de alimentos,
- Los grados Brix y los Equivalentes de Dextrosa (ED) son los parámetros principales que miden la calidad de los distintos tipos de jarabes que se producen a partir de almidones.
- La purificación de jarabes glucosados se realiza empleando resinas de intercambio iónico para que sea apta su utilización como sustrato en la producción de jarabes fructosados.

CAPÍTULO 2

Capítulo 2. Desarrollo experimental

La obtención del jarabe de fructosa consta de cuatro etapas: obtención del jarabe de glucosa, purificación del mismo por intercambio iónico, isomerización con la enzima glucosa isomerasa y separación del jarabe de fructosa del de glucosa por cromatografía. Los diagramas de bloques representativos de los procesos de obtención de jarabes glucosados y de jarabe fructosados se muestran en la figura 2.1. El presente desarrollo experimental estudia la obtención de jarabes de glucosa, su purificación con carbón activado y con resinas de intercambio iónico.

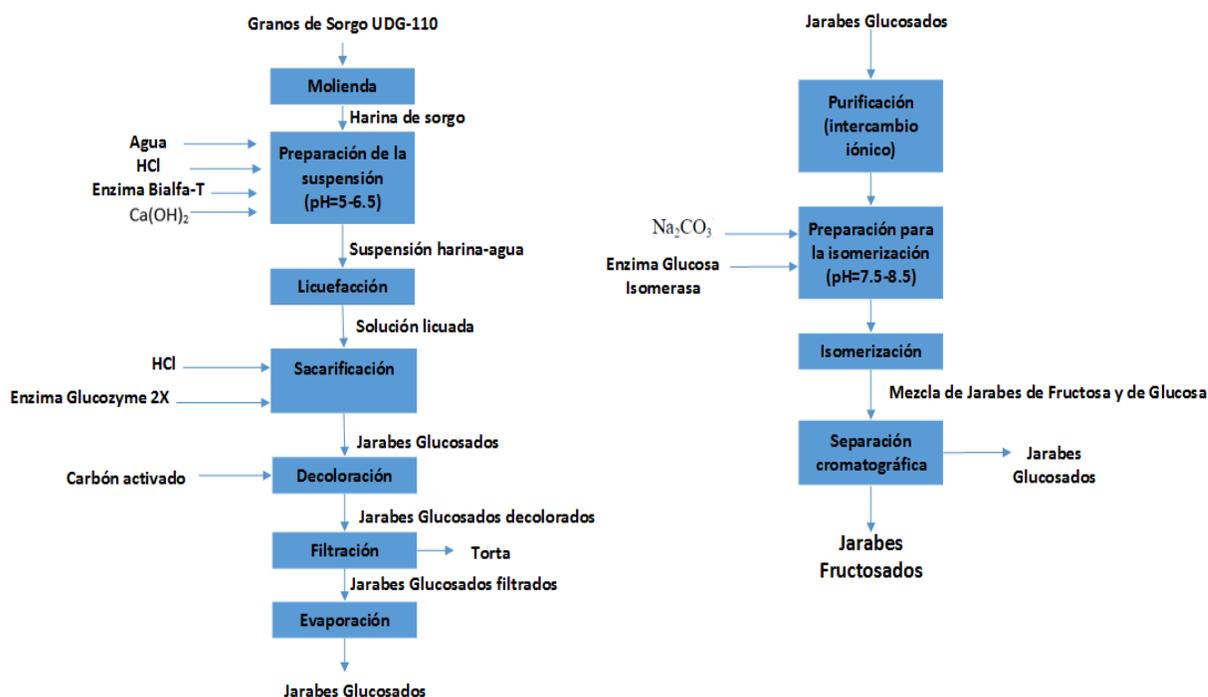


Figura 2.1. Diagrama de bloques de los procesos de obtención de jarabes de glucosa y de fructosa.

2.1 Materiales y métodos para la obtención de jarabes glucosados a partir de harina de sorgo mediante hidrólisis enzimática

Las materias primas fundamentales a emplear fueron el sorgo blanco (UDG-110) molido, proveniente de la Estación Experimental, además de las enzimas Bialfa T, producido por fermentación sumergida del *Bacillus Licheniformis* que hidroliza al azar los enlaces glucosídicos alfa-d-1,4 del almidón produciendo dextrinas solubles y oligosacáridos; y la Glucozyme 2X, producida por la fermentación de una cepa seleccionada de *Aspergillus Níger*, la cual puede hidrolizar tanto las ramificaciones alfa-

d-1,6 como los enlaces poliméricos alfa-d-1,4 del almidón, ambas proveídas por la Empresa GydeMa de la provincia de Cienfuegos.

Con el sorgo molido previamente, se preparó una suspensión de harina de sorgo-agua a la concentración de trabajo 30 % p/p. En la etapa de licuefacción o dextrinización se utilizó además hidróxido de calcio ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) al 0,1 %, a fin de aumentar la estabilidad de la enzima **(Torres 2012)**.

2.1.1 Diseño experimental para el proceso de obtención de jarabes glucosados

Valorando la influencia de las variables y niveles estudiados por **(Rega 2016)** en su trabajo, se ampliaron los niveles de dos de las variables estudiadas para la nueva experimentación, la concentración de la enzima alfa-amilasa Bialfa T en la obtención de jarabes dextrinizados y el tiempo de acción de la segunda enzima Glucozyme 2X en la etapa de sacarificación, fijando la relación sólido-líquido de la suspensión a tratar a un valor de 30 % p/p que es el mejor valor reportado por **Rega (2016) y Serna (2011)** y la concentración de la Glucozyme 2X a 0,75 % p/p empleada por **Rega (2016)**. Se aplicó un diseño experimental factorial multinivel 2^k donde k representa el número de variables independientes, en este caso fueron dos: concentración de Bialfa T y tiempo de sacarificación. El total de experimentos realizados resultó ser de seis, los cuatro correspondientes al diseño, más una réplica a dos de ellos al azar. En la tabla 2.1 se muestran las variables y niveles para la obtención de los jarabes glucosados y en la tabla 2.2 la matriz experimental del diseño. Para la selección de la relación sólido/líquido se tuvo en cuenta además el mejor resultado logrado por **Medina (2015)** en su estudio para jarabes dextrinizados, donde la variable más influyente fue la relación sólido-líquido en su menor nivel que fue 30 % p/p. El tiempo de sacarificación utilizado con la Glucozyme 2X fue de 48-72 horas, se tomó según lo reportado por **Serna (2011)** y a partir de los resultados obtenidos por **Rega (2016)** quien alcanzó los mejores resultados con el nivel más alto de tiempo de sacarificación (48h) considerado en su estudio.

Tabla 2.1. Variables y niveles en la hidrólisis y sacarificación para jarabes glucosados.

Variables independientes	Niveles
Concentración de Bialfa T (X_1)	1,5-2,5 % p/p
Tiempo de sacarificación (X_2)	48-72 h

Tabla 2.2. Matriz del diseño experimental.

Experimentos	X ₁ (% p/p)	X ₂ (h)
1	1,5	48
2	1,5	72
3	2,5	48
4	2,5	72
5	2,5	72
6	2,5	48

2.1.2 Descripción del proceso de obtención de jarabes desarrollado en el laboratorio

Para esta parte del trabajo se tomaron como base los resultados alcanzados por **Rega (2016)** quien estudió la obtención de jarabes glucosados trabajando directamente con harina de sorgo blanco y siguiendo la metodología de **Nieblas (2015)**, que obtuvo jarabes de sorgo, pero a partir de almidón de sorgo rojo obtenido en la Empresa de GydeMa de Cienfuegos.

Preparación de la suspensión harina de sorgo-agua: Con el sorgo molido previamente, se preparó una suspensión de harina de sorgo-agua a la concentración de trabajo, 30 % p/p.

Etapas de licuefacción o dextrinización: Una vez preparada la suspensión a la concentración de 30 % p/p, se le añade el hidróxido de calcio (Ca(OH)₂) al 0,1 % con el fin de aumentar la actividad de la enzima Bialfa T (**Torres 2012**). Luego se ajusta el pH utilizando HCl 1N con un pH-metro (*MARCA HANNA 213*) a un valor entre 5 y 6 lo más cercano a 5,5 por considerarse el mejor valor para trabajar con temperaturas altas en cortos períodos de tiempo. Se coloca el beaker que contiene la suspensión en una hornilla (*MARCA STUART SB 162-3*) alcanzándose una temperatura entre 90 y 95 °C y se introduce en el líquido el agitador mecánico (*MARCA IKA RW-16*) con una velocidad de agitación de 555 rpm, con el objetivo de lograr un mezclado perfecto y homogenización de la suspensión. Cuando la suspensión alcanza una temperatura alrededor de los 70 °C comienza la gelatinización del almidón y se le añade la enzima Bialfa T, se sigue aumentando la temperatura hasta los valores mencionados anteriormente y se continúa el proceso por dos horas. Finalmente, el almidón licuado o dextrinizado se lleva a temperatura ambiente para inactivar la enzima y se le ajusta el

pH a un valor entre 4 y 4,5 lo más próximo posible a 4,3 que es donde mejor actúa la enzima Glucozyme 2X para comenzar la sacarificación.

Etapas de sacarificación: La sacarificación se realiza con la enzima Glucozyme 2X, donde se usó una concentración de la misma de 0,75 % p/p. Esta etapa se realiza en una zaranda (*MARCA CERTO MAT IS*) y se mantiene la temperatura entre 58-60°C por un tiempo de 48 horas. Cuando concluye esta etapa se retira el erlenmeyer que es el recipiente utilizado, y se calienta la mezcla sacarificada hasta alcanzar los 85°C, manteniéndose por un espacio de 15 minutos con el objetivo de inactivar la enzima Glucozyme 2X.

Refinación: El jarabe fue filtrado a vacío con tierra de infusorio empleando papeles de filtro, embudos de vidrio y erlenmeyers de 500 ml de capacidad donde se recuperaba el líquido filtrado.

2.1.3 Determinación de las variables respuesta

Tanto las muestras tomadas en cada etapa del proceso como los licores finales fueron centrifugados en una centrífuga (*MARCA EPPENDORF 5702R*) durante 10 minutos, antes de la determinación del °Brix y los ART.

2.1.3.1 Grados Brix

Este método se utiliza fundamentalmente para la determinación de los sólidos disueltos contenidos en el sirope de glucosa, utilizando un refractómetro con escala Brix. Para los objetivos de este método en el caso de sirope de glucosa se utiliza el Brix como una medida del contenido de materia seca. En el estudio se usa un refractómetro (*MARCA ATAGO*).

2.1.3.2 Azúcares Reductores Totales (ART)

Los Azúcares Reductores Totales fueron determinados en varias muestras tomadas durante el proceso, utilizando el Ácido 3,5-Dinitrosalicílico (Anexo 1).

2.1.3.3 Equivalente de Dextrosa (ED)

El equivalente de dextrosa se determina en función de los azúcares reductores a partir de ecuación 2.1.

Donde: S es el contenido de sustancia seca en por ciento de la muestra inicial.

2.1.4 Determinación de otros parámetros de calidad del jarabe de glucosa

2.1.4.1 Acidez

La acidez de la muestra previamente diluida se determina mediante valoración con hidróxido de sodio 0,1N usando fenolftaleína al 1% como indicador (Anexo 2).

2.1.4.2 Conductividad

La conductividad se determina utilizando el conductímetro (MARCA HANNA EC 215).

2.1.4.3 pH

El pH se determina a partir del método potenciométrico, utilizando para ello el pHmetro (MARCA HANNA 213), consultar el Anexo 3.

2.1.5 Resultados del proceso de obtención de jarabes glucosados

En la tabla 2.3 se muestran los resultados de la etapa de licuefacción o dextrinización y en la tabla 2.4 los resultados de la etapa de sacarificación. En las figuras 2.2 y 2.3 se exponen los resultados obtenidos, donde se valora la influencia de las enzimas Bialfa T y el tiempo de sacarificación en el Brix y el ED.

Tabla 2.3. Resultados de la etapa de licuefacción.

Experimentos	X ₁ (%)	X ₂ (h)	°Brix	ART (g/L)	ED (%)
1	1,5	48	20,4	88,835	9,645
2	1,5	72	15	40,393	4,3855
3	2,5	48	22,5	91,526	9,9371
4	2,5	72	21	130,549	14,174
5	2,5	72	19,5	158,807	17,242
6	2,5	48	19,4	56,540	6,1387

Tabla 2.4. Resultados de la etapa de sacarificación.

Experimentos	X ₁ (%)	X ₂ (h)	°Brix	ART (g/L)	ED (%)
1	1,5	48	21,5	566,53	61,51
2	1,5	72	20,1	818,16	88,83
3	2,5	48	23,1	511,36	55,52
4	2,5	72	24,5	909,08	92,79
5	2,5	72	24,4	910,43	92,93
6	2,5	48	22,2	448,11	48,65

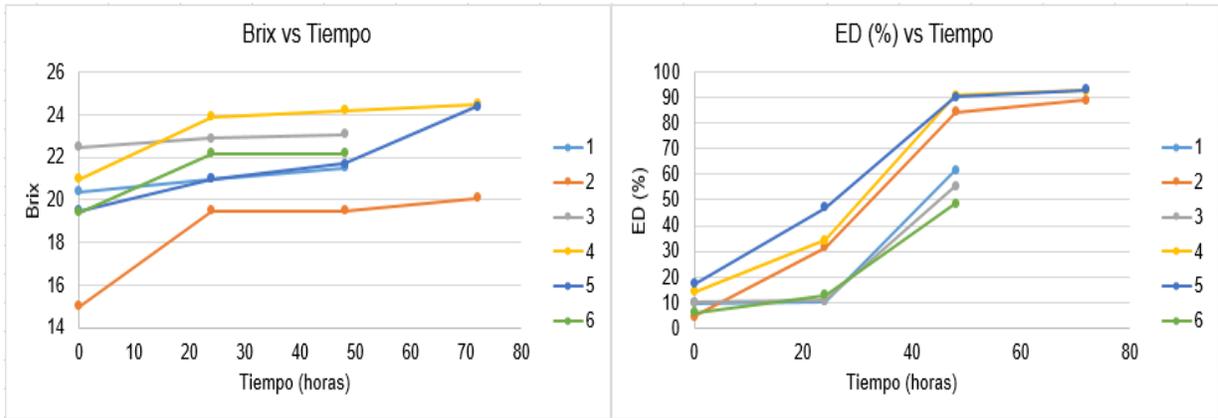


Figura 2.2. Comportamiento del Brix y el ED en función del tiempo para la sacarificación.

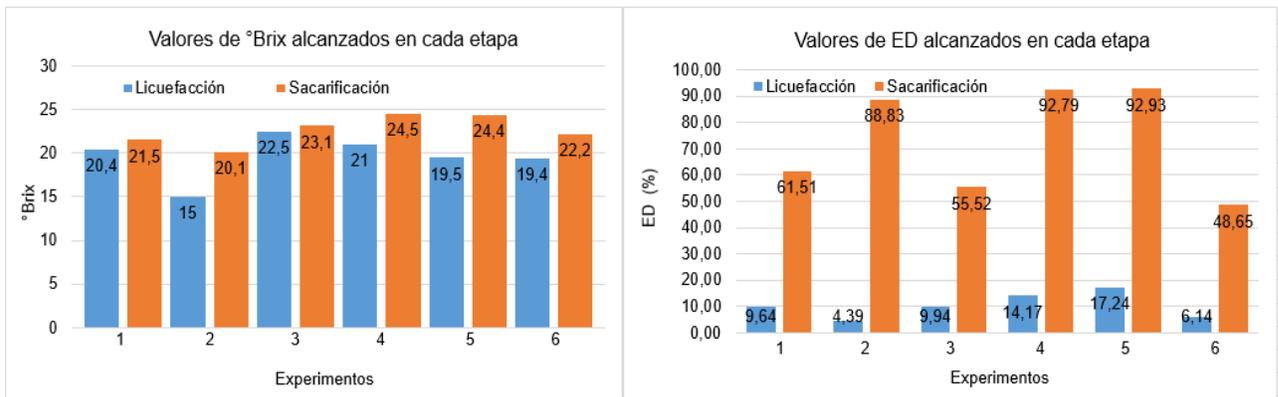


Figura 2.3. Influencia de la concentración de Bialfa T y tiempo de sacarificación con Glucozyme 2X en el Brix y el ED.

En las Figuras 2.2 y 2.3, se observa que no se obtienen grandes resultados en cuanto al Brix como los logrados por Nieblas (2015), sin embargo, hay que señalar que en este trabajo el estudio se realiza con otra enzima distinta: Termamyl la que reportó muy buenos resultados y se trabajó partiendo de almidón y no de harina; se lograron valores mayores de esta variable si se comparan con los resultados de Rega (2016) debido a que se usaron valores de concentraciones de enzima Bialfa T más elevadas. Para la etapa de licuefacción los experimentos 3 y 4 (con sus respectivas réplicas) presentan los valores de Brix y ED mayores, destacándose el último mencionado porque alcanza los mejores resultados, una de las causas es que en ellos se usa la mayor concentración de enzima Bialfa T. Comparando los experimentos 1 y 3, puede notarse que para el caso del 3 se obtienen mejores resultados en cuanto a grados Brix ya que

se usó una concentración de enzima mayor. En la etapa de sacarificación, vale destacar que los experimentos 3 y 4 presentan una variación en los grados Brix pequeña, mientras que la diferencia en el ED se hace notable, lo anterior corrobora la poca influencia del tiempo de sacarificación en los grados Brix y el marcado aumento del ED. Además, para la etapa de sacarificación se tiene que a partir de las 48 horas la velocidad de conversión tiende a disminuir y tampoco se logran valores elevados de Brix como se obtuvieron por **Nieblas (2015)** con la Termamyl 120. El ED en la etapa de licuefacción mantiene un comportamiento diferente al del Brix; aquí el experimento que sigue destacándose con mejores resultados es el 4, sin embargo, junto con el 3 son los dos de mayores resultados logrados, coincidiendo con que todos trabajan a la mayor concentración de enzima. En la sacarificación sí hay un cambio apreciable en los resultados. A partir de las 24 horas puede notarse que para los experimentos los valores que se alcanzan son altos, por lo que el tiempo influye positivamente en esta variable (ED), corroborándose los resultados obtenidos por **Rega (2016)**. En general, se aprecia que se alcanzan altos valores para los grados Brix en la etapa de licuefacción, lo cual es lógico ya que se obtiene la solubilidad de los almidones en esta etapa por la acción de la enzima Bialfa T, más la transformación de parte de ellos en azúcares; variando este muy poco en la etapa de sacarificación. Sin embargo, para el ED el comportamiento es mayor en la segunda etapa de hidrólisis, que es en donde es mayor la conversión a azúcares y el tiempo de acción de la enzima Glucozyme 2X tiene mayor influencia. Se tomaron los datos obtenidos del experimento 5 (réplica del 4), para seguir la cinética de la conversión enzimática, en la figura 2.4 se refleja el comportamiento del equivalente de dextrosa (ED) al transcurrir el tiempo.

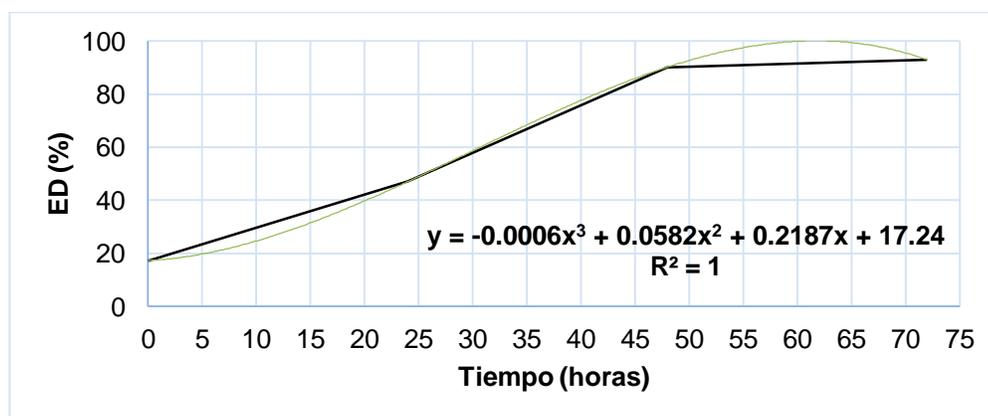


Figura 2.4. Comportamiento de ED en el tiempo para el experimento 5 (réplica del 4).

Como se aprecia en la figura 2.4 el ED del que parte la etapa de sacarificación, que es el obtenido al concluir la licuefacción, se encuentra en el rango establecido (10-20 %) lo que demuestra que la enzima Bialfa T es una enzima desramificante o licuificante y no sacarificante y solo rompe los enlaces α -d-1,4. En la etapa de sacarificación, la velocidad de acción de la Glucozyme 2X, la que se mantuvo constante su concentración para cada experimento, es mucho mayor en las primeras 48 horas, disminuyendo en las otras 24 horas siguientes, tendiendo a ser asintótica ya a las 72 horas. En estudios realizados por varios investigadores (**Fujill et al., 1981**) y (**Kusunoki and Kawakami 1982**), quienes trabajan el efecto combinado de alfa amilasas y glucoamilasas en diferentes tipos de almidones, señalan que el efecto de la alfa amilasa responde a un modelo cinético de Michaelis-Menten, sin embargo para las glucoamilasas, existe una inhibición competitiva de producto y se hace más complejo el proceso, ya que puede haber condensación de la glucosa en maltosa e isomaltosa, por tanto llegan a la conclusión que el efecto de esta enzima depende de la naturaleza cambiante del sustrato, que no es la muestra original de que se parte. Puede considerarse que las dos horas para la licuefacción y las 48 horas para la sacarificación son adecuadas, pero a partir del estudio realizado por **Rega (2016)** se decidió extender el tiempo de la sacarificación hasta 72 horas para analizar este efecto, como resultado se obtuvieron valores de ambas variables (Brix y ED) superiores a los obtenidos por esta autora, lo que indica que el tiempo de sacarificación también es significativo. En la figura 2.4 puede observarse también que en el modelo ajustado alcanza un máximo de ED a las 60 horas de sacarificación por lo que debe valorarse este resultado.

2.1.6 Análisis estadístico del diseño experimental

Los resultados obtenidos y mostrados en la tabla 2.4 fueron sometidos a un tratamiento estadístico utilizando el Software Statgraphics Plus 4.1 para estudiar la influencia de cada una de las variables independientes sobre las variables respuestas: °Brix y ART.

2.1.6.1 Análisis del Brix

En el análisis realizado para esta variable se obtuvo tanto la ecuación que se ajusta al modelo como la figura 2.5 que muestra el diagrama de Pareto y efectos principales. La ecuación 2.2 es la del modelo y se ajusta para un valor de $R^2=88\%$.

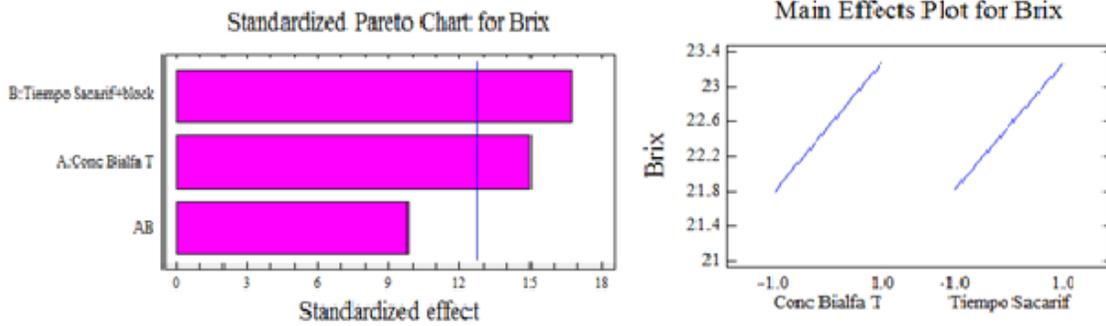


Figura 2.5. Relación entre el Brix y las variables: concentración de Bialfa T y tiempo de sacarificación.

En la figura 2.5 el primer gráfico constituye el Diagrama de Pareto en el que se muestra la existencia de dos parámetros significativos influyendo de forma positiva, los cuales son el tiempo de sacarificación y la concentración de Bialfa T. En este también se aprecia que ninguna de las variables analizadas y la interacción entre ellas influyen de forma negativa. Esto significa que cualquier aumento que se produzca en ellas favorecerá la variable respuesta que se analiza. En el Diagrama de Efectos Principales también se refleja lo expuesto anteriormente, donde se aprecia que interacción entre la concentración de Bialfa T y el tiempo de sacarificación no tiene efecto en esta variable.

2.1.6.2 Análisis de los ART

En el análisis realizado para esta variable se obtuvo tanto la ecuación que se ajusta al modelo como la figura 2.6 que muestra el diagrama de Pareto y la gráfica de Efectos Principales. La ecuación 2.3 es la del modelo con un $R^2=92,37\%$.

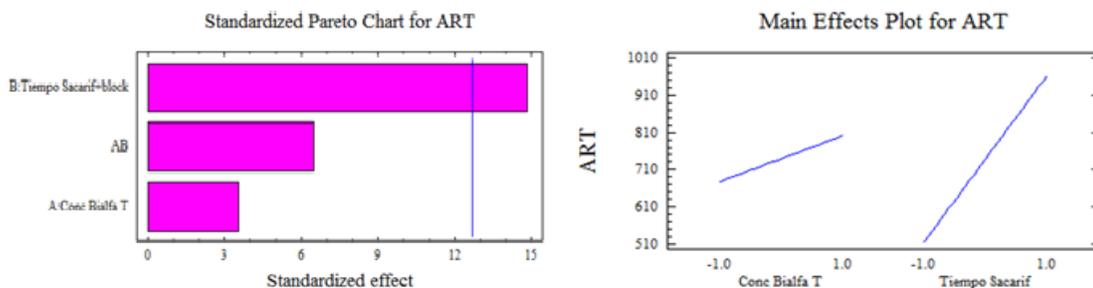


Figura 2.6. Relación entre los ART y las variables: concentración de Bialfa T y tiempo de sacarificación.

En la figura 2.6 el Diagrama de Pareto muestra la existencia de una variable significativa y que además influye de forma positiva en el proceso, esta es el tiempo de sacarificación. Este resultado indica que cualquier aumento favorece la variable respuesta que se está analizando; esto se pudo corroborar al comparar estos resultados con los obtenidos por **Rega (2016)**, quien tomó niveles más bajos de tiempo de sacarificación (24-48 horas) y alcanzó valores inferiores de ART a los obtenidos en este estudio. La gráfica de Efectos Principales también representa que aumentando la concentración de enzima y el tiempo de sacarificación se logran mejores resultados en los azúcares reductores totales (ART).

2.1.7 Características físico-químicas de los jarabes obtenidos a partir de la harina de sorgo

En la tabla 2.5 se muestran las características físico-química de los jarabes obtenidos a partir de la harina de sorgo, en donde hay que destacar la acidez que presentaron los jarabes, párametro que estuvo un poco elevado y se debió a que la filtración se demoraba bastante tiempo y el lugar en el que se realizaba no se mantenía una temperatura suficientemente fría como para evitar que estos se pusieran ácidos. Por lo que constituye un problema detectado durante el proceso que debe tenerse en cuenta si se realiza a escalas mayores.

Tabla 2.5. Caracterización físico-química de los jarabes obtenidos a partir de la harina de sorgo.

Exp.	X₁(%)	X₂(h)	Densidad (g/ml)	pH	Acidez (%)	Conductividad (µS/cm)
1	1,5	48	1,06	4,18	0,134	2620
2	1,5	72	1,03	4,85	0,108	2610
3	2,5	48	1,04	4,45	0,153	3150
4	2,5	72	1,02	4,25	0,147	3140
5	2,5	72	1,05	5,04	0,131	2817
6	2,5	48	1,05	4,90	0,102	2950

2.2 Estudio de la influencia de las variables empleando como sustratos almidón de maíz y harina de sorgo

Se realizó una nueva experimentación con la finalidad de estudiar la influencia del tipo de sustrato y de la concentración de la enzima Bialfa T en las variables ED y Brix. En el

caso del tipo de sustrato se evaluó el almidón de maíz y la harina de sorgo, ya que en estudios realizados anteriormente se evidencia que los valores de ED se ven favorecidos con el empleo de harina de sorgo según **Rega (2016)**, no siendo igual para el Brix que se favorece con el empleo de almidón de maíz como sustrato según **Morejón (2016)**. En cuanto a la concentración de Bialfa T se determinó aumentar el nivel de su concentración para estudiar que efecto traería consigo este cambio basado en que en estudios anteriores esta variable fue de gran influencia para el proceso. Se decidió establecer como valores fijos la relación sólido-líquido en un 30 % p/p, la concentración de la enzima Glucozyme 2X en 0,75 % p/p y el tiempo de sacarificación en 48 horas. Se efectuó un diseño experimental factorial multinivel del tipo 2^k donde k representa el número de variables independientes que en este caso fueron dos: tipo de sustrato y concentración de Bialfa T; el total de experimentos resultó ser ocho, los cuatro correspondientes al diseño más una réplica a cada uno. En la tabla 2.6 se muestran los valores de las variables independientes y en la tabla 2.7 la matriz correspondiente.

Tabla 2.6. Variables y niveles en la hidrólisis y sacarificación para jarabes glucosados.

Variables independientes	Niveles
Tipo de sustrato (X_1)	<ul style="list-style-type: none"> • Almidón de maíz (+1) • Harina de sorgo (-1)
Concentración de Bialfa T (X_2)	2,5-5,0 % p/p

Tabla 2.7. Matriz del diseño experimental.

Experimento	X_1	X_2 (% p/p)
1	Almidón de maíz	5,0
2	Harina de sorgo	5,0
3	Almidón de maíz	2,5
4	Harina de sorgo	2,5
5	Almidón de maíz	5,0
6	Harina de sorgo	5,0
7	Almidón de maíz	2,5
8	Harina de sorgo	2,5

Para el desarrollo experimental en el laboratorio se siguió la misma metodología que se plantea en el epígrafe 2.1.2, pero teniendo en cuenta las especificidades de esta nueva experimentación, pues se filtraron las muestras después de la etapa de licuefacción, por tanto, se trabaja solo con las dextrinas, sin influencia de sólidos que no son almidón. Los jarabes de glucosa obtenidos fueron sometidos a procesos de purificación con carbón activado y resinas de intercambio iónico y se concentraron en un rotoevaporador hasta un valor de 40 °Brix.

2.2.1 Determinación de variables respuesta y otros parámetros de calidad

Como variables respuesta fueron determinados el Brix y el ED, según las metodologías planteadas en el epígrafe 2.1.3. Como otros parámetros de calidad se determinaron la conductividad y el pH según lo planteado en el 2.1.4.

2.2.2 Resultados del proceso de obtención de jarabes glucosados.

En la tabla 2.8 se muestran los resultados de la etapa de licuefacción o dextrinización y la de la sacarificación. En la figura 2.3 se expone los resultados obtenidos en el proceso de producción del jarabe glucosado, donde se valora la influencia del tipo de sustrato y de la enzima Bialfa T en el Brix y el ED.

Tabla 2.8. Resultados de la licuefacción y de la sacarificación.

Experimento	Variables independientes		Licuefacción		Sacarificación	
	X ₁	X ₂ (% p/p)	°Bx	ED (%)	°Bx	ED (%)
1	Almidón de maíz	5	21,5	22,30	29,5	63,76
2	Harina de sorgo	5	20,8	55,52	22,8	90,10
3	Almidón de maíz	2,5	15	25,20	21	86,20
4	Harina de sorgo	2,5	10	9,94	14	55,52
5	Almidón de maíz	5	22	23,34	29,3	65,30
6	Harina de sorgo	5	20	55,03	23,2	87,20
7	Almidón de maíz	2,5	15,5	26,10	21,8	88,10
8	Harina de sorgo	2,5	9,8	9,34	15,8	58,50

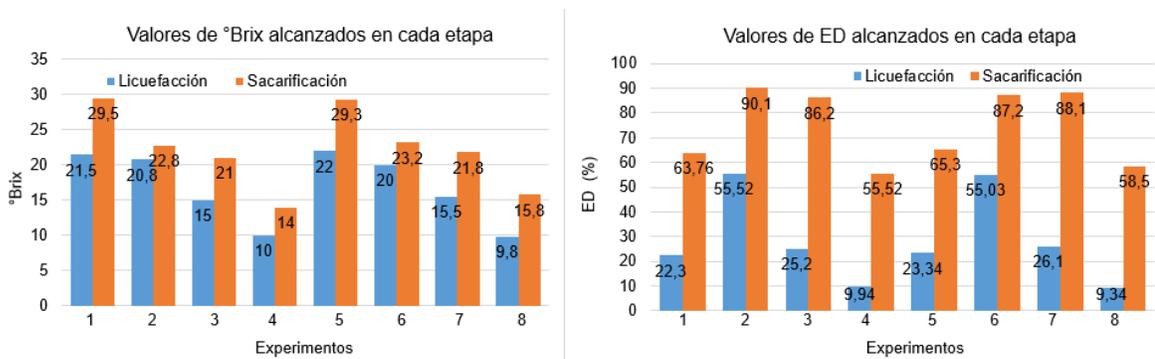


Figura 2.7. Influencia del tipo de sustrato y de la concentración de Bialfa T en el Brix y el ED.

En la figura 2.7 se aprecia que el Brix es superior para las muestras donde se emplea como sustrato almidón de maíz que con la harina de sorgo, lo cual es lógico porque es el sustrato tradicional para este tipo de producto, además de que es 100 % almidón y la harina de sorgo contiene un 68 % de almidón. Un aumento de la concentración de Bialfa T influye positivamente en el Brix, destacándose los experimentos 1 y 2 que emplean el nivel más alto de esta variable, obteniéndose valores relativamente bajos de Brix para los experimentos 3 y 4 que trabajaron con la menor concentración de Bialfa T e incluso inferiores a los obtenidos por **Morejón (2016)** y por **Rega (2016)** a pesar de que se empleó una concentración mayor, lo que corrobora que la enzima ha perdido parte de su actividad debido a su almacenamiento por dos años. En el caso del ED no se arribaron a los mismos resultados que para el Brix pues se alcanzaron valores ligeramente superiores para el experimento 2 en el que se trabajó con harina de sorgo como sustrato y a la mayor concentración de Bialfa T. En los experimentos 1 y 3 se emplea para ambos como sustrato almidón de maíz y puede apreciarse que el ED mayor se logra con la menor concentración de enzima, esto confirma que la concentración de Bialfa T no tiene una marcada influencia en esta variable pues es una enzima desramificante o licuificante y no sacarificante y solo rompe los enlaces α -d-1,4.

2.2.3 Análisis estadístico del diseño experimental

Los resultados obtenidos de la sacarificación mostrados en la tabla 2.10 fueron sometidos a un tratamiento estadístico utilizando el Software Statgraphics Centurion XV para estudiar la influencia de cada una de las variables independientes sobre las variables respuestas: °Brix y ED.

2.2.3.1 Análisis del Brix

En el análisis realizado para esta variable se obtuvo tanto la ecuación que se ajusta al modelo como la figura 2.8 que muestra el diagrama de Pareto y la gráfica de efectos principales. La ecuación 2.4 es la del modelo y se ajusta para un valor de $R^2=99,65 \%$.

(2.4)

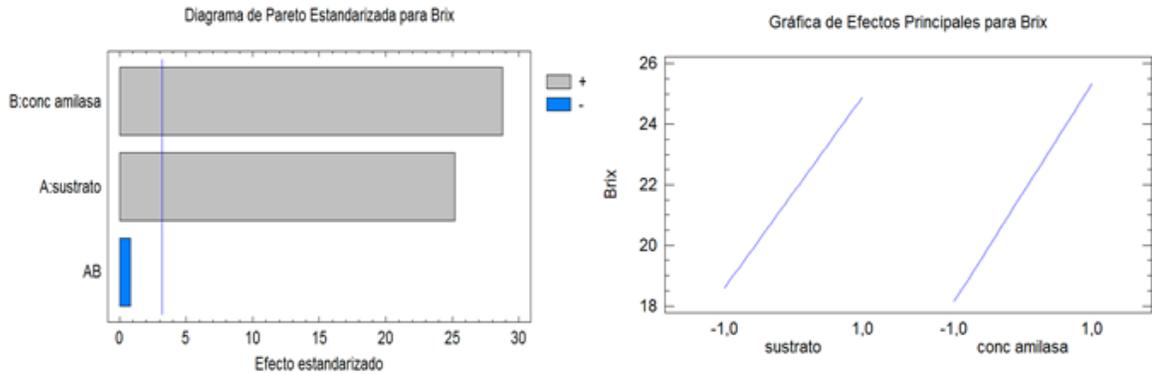


Figura 2.8. Relación entre el Brix y las variables: tipo de sustrato y concentración de Bialfa T.

Como se muestra en el diagrama de Pareto de la figura 2.8 las variables concentración de Bialfa T, así como el tipo de sustrato resultaron ser significativas, influyendo ambas positivamente en el Brix, esto se debe a que la enzima Bialfa T actúa en la licuefacción logrando la solubilidad de los almidones, lo que trae consigo un aumento de los sólidos totales representados por el Brix, demostrando que esta enzima es licuificante y no sacarificante. En el caso del tipo de sustrato se logran mejores resultados en cuanto al Brix cuando se trabaja con almidón de maíz que cuando se emplea harina de sorgo, esta influencia también se demuestra al comparar los resultados alcanzados por los autores **Morejón (2016)** y **Rega (2016)**. La gráfica de Efectos Principales respalda los resultados obtenidos, mostrando que un aumento de las variables estudiadas favorece el Brix.

2.2.3.2 Análisis del ED.

En el análisis realizado para esta variable se obtuvo tanto la ecuación que se ajusta al modelo como la figura 2.9 que muestra el diagrama de Pareto y la gráfica de efectos principales. La ecuación 2.5 es la del modelo con un $R^2=99,69 \%$.

(2.5)

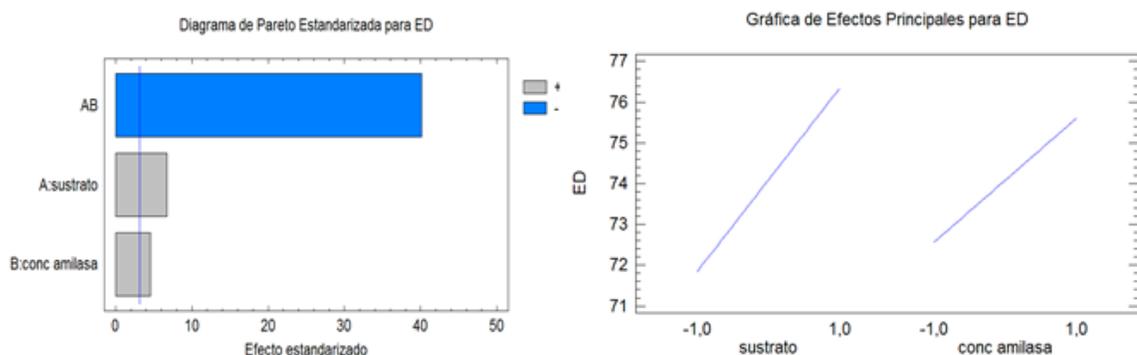


Figura 2.9. Relación entre ED y las variables: tipo de sustrato y concentración de Bialfa T.

En el diagrama de Pareto, así como en la gráfica de Efectos Principales mostrados en la figura 2.9 se ve que la variable más significativa es la interacción entre el tipo de sustrato y concentración de amilasa, influyendo de forma negativa, lo que significa que en este caso no tiene una marcada influencia la concentración de Bialfa T por lo que realizando una comparación con el diseño experimental anterior puede emplearse valores más bajos de esta variable obteniéndose buenos resultados en el ED, además se concluye también que para una misma concentración de Bialfa T el tipo de sustrato que se emplea no tiene una influencia tan marcada, lográndose valores similares en el ED cuando se emplea almidón de maíz y harina de sorgo.

2.2.4 Características de los jarabes obtenidos a partir de almidón de maíz y de harina de sorgo.

En la tabla 2.9 se presentan las principales especificaciones de los jarabes glucosados obtenidos por vía enzimática a partir del almidón de maíz y de harina de sorgo. En la tabla 2.10 se muestra una comparación de las propiedades organolépticas de los jarabes.

Tabla 2.9. Especificaciones de jarabes glucosados obtenidos por vía enzimática.

Especificaciones físico-químicas	Jarabes de almidón de maíz	Jarabes de harina de sorgo blanco
ED	86 máx	90 máx
Brix (antes de evaporar)	29 máx	23 máx
Conductividad ($\mu\text{s}/\text{cm}$)	2020 mín	2610 mín
pH	4,4-4,6	4,18-5,04

Los resultados indican que los jarabes obtenidos mediante la harina de sorgo presentan características bastantes buenas con respecto a los que se elaboraron a partir de almidón de maíz. Con respecto al Brix hay que especificar que fue mayor para los que parten de almidón de maíz, debido a que este sustrato tiene un 100 % de almidón por lo que se logra en la licuefacción una mayor proporción de sólidos totales. En cuanto a la conductividad se aprecian valores superiores para jarabes de harina de sorgo, esto se debe a que el contenido de cenizas en el sorgo es mucho mayor que en el maíz y presentan una mayor cantidad de material lignocelulósico no convertido.

Las propiedades organolépticas obtenidas (tabla 2.10) se corresponden a la de los jarabes obtenidos con almidón de maíz, la diferencia que resalta radica en el color final que se adquiere y es debido a que, como ya se había planteado anteriormente, las materias primas usadas son distintas.

Tabla 2.10. Propiedades organolépticas de los jarabes comparados anteriormente.

Propiedades	Jarabes a partir de almidón de maíz	Jarabes a partir de harina de sorgo blanco
Aspecto	Líquido medianamente viscoso, sin turbidez	Sin turbidez y un poco viscoso
Olor	Característico, casi imperceptible, libre de olores extraños	Característico, casi imperceptible, libre de olores extraños
Sabor	Característico, dulce excesivo	Característico, dulce excesivo
Color	Amarillo muy claro	Amarillo

2.3 Etapa de evaporación de los jarabes de glucosa

La evaporación primeramente se realizó en un beaker colocado sobre una hornilla para que el jarabe llegara a su punto de ebullición y de esta manera se concentrara, pero al alcanzarse una temperatura superior a los 100 °C ocurrió un fenómeno llamado caramelización debido al calentamiento de los carbohidratos, tomando el jarabe un color marrón, aunque se logró un Brix de 40 que era el deseado, se produjo la formación de un color excesivo no esperado. A partir de este resultado se determinó que era una mejor opción desarrollar esta etapa en un rotoevaporador (*MARCA IKA RV 10*) a una temperatura de 70 °C y una velocidad de agitación del balón que contiene el jarabe de glucosa de 180 rpm; se sometió a este proceso 200 mL de cada jarabe obtenido,

alcanzándose un Brix final de 40 y muy poco cambio en el color. Por lo que, no se recomiendan altas temperaturas para la concentración de jarabes para evitar cambios no deseados en el color y la formación de otros compuestos producto de la caramelización de la glucosa.

2.4 Purificación de los jarabes de glucosa

Los jarabes de glucosa primeramente se pusieron en contacto con carbón activado con la finalidad de decolorarlos y para facilitar el posterior filtrado a vacío, luego se sometieron a un tratamiento con resinas de intercambio iónico para disminuir su conductividad y eliminar iones presentes y no deseados como el calcio y los fenólicos.

2.4.1 Etapa de purificación empleado carbón activado

Como primera etapa de purificación se realizó un tratamiento con carbón activado en polvo, poniendo este adsorbente en contacto con el jarabe por un tiempo de 30 minutos a 60 °C, luego se elimina el carbón residual filtrándolos a vacío. Se estudió el cambio en el color como consecuencia de la variación en la concentración del carbón activado en 0,5 % p/v, 1 % p/v y 2 % p/v.

El color de los jarabes se determinó de acuerdo al método espectrofotométrico descrito por **Hernández y col. (2008)**, el mismo se reporta en unidades de densidad óptica (UDO), estos valores se relacionaron con una escala de color (**Guzmán 1992**) que se muestra en la tabla 2.11. Las UDO se calculan usando la ecuación 2.6, donde T es la transmitancia.

Tabla 2.11. Clasificación subjetiva del color de acuerdo a las UDO.

UDO	Color Visual
0,025	Agua
0,035	Paja muy ligero
0,05	Paja ligero
0,06	Paja
0,075	Paja amarillo muy ligero
0,1	Amarillo medio ligero
0,125	Amarillo ligero
0,15	Amarillo
0,2	Amarillo fuerte

Se le realizó el mismo tratamiento con carbón activado al jarabe obtenido a partir de almidón de maíz y al obtenido a partir de harina de sorgo. En la tabla 2.12 y en la figura 2.10 se muestran los resultados obtenidos; como se aprecia se lograron valores inferiores de color para los jarabes tratados en comparación con el crudo, lo que indica que el tratamiento cumplió con su objetivo. En cuanto a la clasificación subjetiva de color establecida en la tabla 2.11 los jarabes de maíz mostraron después de tratados un color amarillo medio ligero, mientras que los de sorgo presentaron un color amarillo ligero diferente al color de los jarabes de maíz, esto es debido a que los jarabes de sorgo presentan un mayor contenido de cenizas en su composición que le confiere cierta turbidez.

Tabla 2.12. UDO para diferentes concentraciones de carbón activado para jarabes de maíz y de sorgo.

Jarabe	De maíz			De sorgo		
	T (600nm)	T (450nm)	UDO	T (600nm)	T (450nm)	UDO
Crudo	333,333	40	0,921	200	17,857	1,049
Carbón activado a 0,5 % p/v	111,111	83,333	0,125	90,909	66,666	0,135
Carbón activado a 1 % p/v	142,855	111,111	0,109	100	76,923	0,114
Carbón activado a 2 % p/v	125	100	0,097	142,857	111,111	0,109

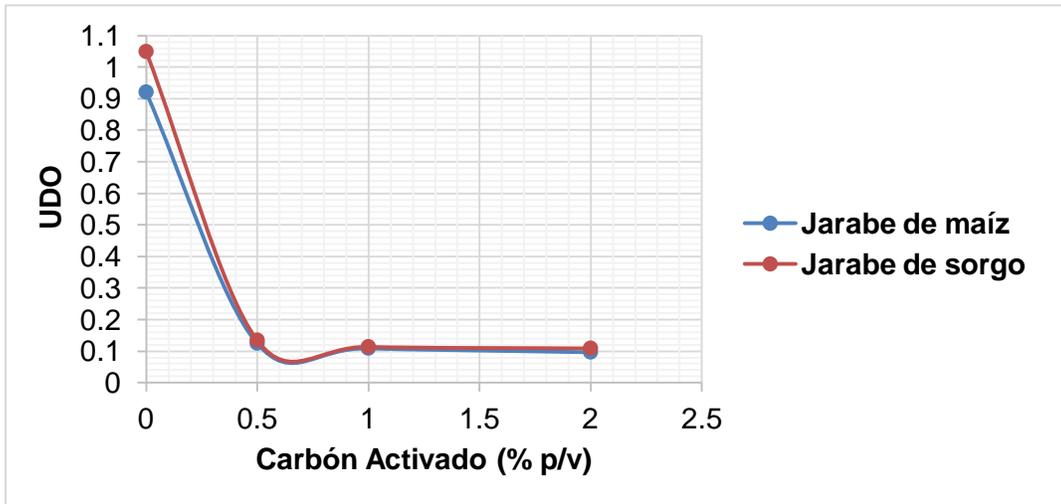


Figura 2.10. Influencia de la concentración de carbón activado para jarabe de maíz y de sorgo.

Vale destacar que el color se hace más claro a medida que aumenta la concentración de carbón activado, aunque la diferencia no es muy significativa por lo que la concentración de 0,5 % p/v es la adecuada para este tratamiento para ambos sustratos, siendo por tanto mejor el efecto económico a la hora de seleccionarla, por el alto costo del carbón.

2.4.2 Etapa de purificación usando resinas de intercambio iónico

Para todos los experimentos realizados con las diferentes resinas de intercambio iónico se utilizó una columna de 1,5 cm de diámetro y a un flujo constante de alimentación del jarabe de 5 ml/min. Primeramente, se prepararon 3 L de jarabe de sorgo según los resultados del epígrafe 2.1.5 y para su purificación se empleó una resina de intercambio catiónica variando la altura de la cama en 30 y 40 cm, como resultado se obtuvo que ni la resina de intercambio ni la altura de la cama tuvieron un efecto significativo en la purificación, al dar porcentajes de remoción de color bajos del orden de 12,9 y 12,4 % para ambas alturas de cama; para la clarificación se obtuvo 13,75 y 23,75 % de remoción de sólidos para 30 y 40 cm de resina respectivamente, comportándose como un adsorbente y no como intercambiador de iones, pues no se observó ningún efecto en la conductividad eléctrica; por lo que se considera que esta resina ha perdido sus propiedades; se le realizó un proceso de regeneración a la misma sin apreciarse cambios en la conductividad eléctrica del jarabe.

Se procedió a la purificación del jarabe de maíz obtenido como resultado del diseño experimental del epígrafe 2.2.2 empleando una resina de intercambio mixto (Marca Merck) con la que se obtuvieron resultados más favorables en comparación con la anterior pero todavía insuficientes para cumplir con el parámetro de conductividad menor de 50 $\mu\text{S}/\text{cm}$ (**Quesada y Hernández 2012**) requerido para el jarabe de glucosa como sustrato para su conversión a fructosa.

Posteriormente se utilizó una resina de intercambio mixto (Marca Amberlite MB150, ficha técnica en Anexo 4) con la que se lograron resultados de conductividad bastantes favorables, estos son mostrados en la tabla 2.13. Los valores de conductividad en $\mu\text{S}/\text{cm}$ fueron convertidos a ppm TDS equivalente (mg/L) empleando el conversor de unidades **Lenntech (2017)**.

$$1 \mu\text{S}/\text{cm} = 0,64 \text{ ppm TDS} = 0,64 \text{ mg/L}$$

Tabla 2.13. Resultados de cambio de conductividad empleando la resina Amberlite MB150.

Vol. Efluente (mL)	Conductividad ($\mu\text{S}/\text{cm}$)	Conductividad (mg/L)	C/Co
0	2020	1292,80	1
55	1,1	0,70	0,0005
105	2,3	1,47	0,0011
160	3,2	2,05	0,0016
215	29,3	18,75	0,0145
269	27,6	17,66	0,0137
319	26,1	16,70	0,0129
370	63,3	40,51	0,0313
425	118,4	75,78	0,0586
475	614	392,96	0,3040
526	973	622,72	0,4817
576	1423	910,76	0,7045
627	1850	1184,23	0,9160

En la figura 2.11 se puede observar la onda de adsorción correspondiente, donde se ve que el punto de ruptura se encuentra en el valor de $118,4 \mu\text{S}/\text{cm}$ de conductividad para un volumen de efluente de 425 mL, cuando se llega a este valor se recomienda regenerar la resina o sustituirla por una nueva, además se aprecia que la resina empleada no llega a agotarse completamente ya que no se alcanza el valor inicial de conductividad, que se hubiera logrado si el volumen de jarabe tratado fuera mayor.

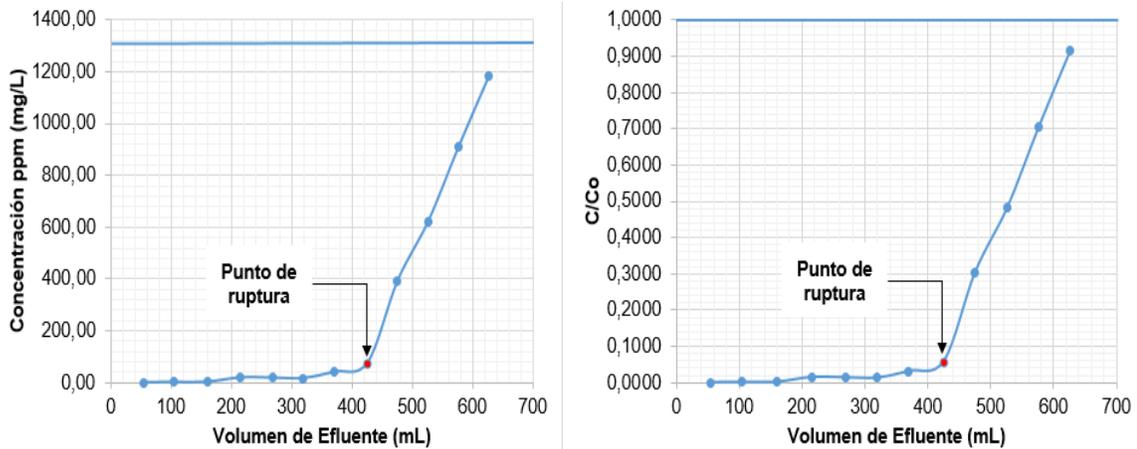


Figura 2.11. Onda de adsorción (Amberlite MB150).

Se determinó la absorbancia de las muestras a 480 nm, como resultado se obtuvieron valores bastantes menores a 0,3 que es el reportado por **Quesada y Hernández (2012)** que deben tener los jarabes glucosados para ser aptos como sustrato en la conversión a jarabes fructosados, este resultado también se debe a que una gran parte del color y la turbiedad fueron removidos en el tratamiento con carbón activado.

Para los experimentos de intercambio iónico en continuo a escala de laboratorio, como se había explicado anteriormente, se utilizó una columna con un diámetro interior (D) 0,015 m y una altura (H) 0,40 m, la altura de la cama de resina Amberlite MB150 (h) 0,22 m, diámetro de partículas (d_p) de 0,3 mm.

(Treybal 1985), reporta que en columnas modelo, se deben cumplir dos condiciones de diseño: que la relación diámetro interior de la columna/diámetro de partícula, sea igual o mayor a 25 (evita efectos de canalizaciones y reduce el mezclado axial) y que la relación altura/diámetro interior de la columna sea superior a 4. Lo anterior se cumple en las columnas usadas para desarrollar los experimentos a escala de laboratorio, ya que — y — 14,17.

Conociendo los valores de diámetro y altura de la cama puede determinarse empleando la ecuación 2.7 el volumen de resina en litros (V_r) para esta columna.

$$\text{—} \tag{2.7}$$

Con los datos de densidad aparente, porosidad y esfericidad, se calculó la caída de presión en la columna de laboratorio, aplicando la ecuación 2.8 de Ergun **(Treybal 1985)**.

$$\text{—} \text{—} \text{—}$$

(2.8)

Donde, ϵ : porosidad (adimensional); μ : viscosidad (0,74 Pa*s); v_o : velocidad superficial (0,0004 m*s⁻¹); d_p : diámetro de partícula (m); h: altura de la cama (m).

Como resultado del cálculo se obtiene que $\Delta P_{\text{laboratorio}} = 74,4 \text{ Pa}$.

2.4.2.1 Características de la resina de intercambio iónico Amberlite MB150

- **Determinación de la densidad aparente (Prueba en probeta):**

Pesar una probeta seca y limpia, adicionar una masa de bagazo hasta un determinado volumen, luego se pesa la probeta con todo su contenido y por diferencia se obtiene la

masa del sólido que se desplaza en la probeta. La densidad aparente en g/mL se obtiene según la ecuación 2.9:

$$\text{-----} \quad (2.9)$$

- Cálculo de la porosidad:

La porosidad (ϵ) se calcula a partir de la ecuación 2.10:

$$\text{-----} \quad (2.10)$$

Donde: ρ_{real} es la densidad real tomada como un promedio entre la densidad real de una resina catiónica fuerte y una aniónica fuerte (proporcionadas en ficha técnica por el fabricante) debido a que la usada es una mixta (1,135 g/mL); ρ_{ap} es la densidad aparente calculada anteriormente.

(Rosabal y Valle 2006) refieren que la densidad aparente siempre es menor que la densidad real de las partículas, debido a los espacios vacíos existentes entre dichas partículas que forman el conglomerado. La porosidad y la densidad aparente de un material dependen generalmente del grado de compactación del conglomerado, es decir, de la presión externa que se ejerza sobre el mismo. Los valores obtenidos están en correspondencia a lo planteado por esta fuente.

2.4.2.2 Cálculo de los parámetros que definen el comportamiento de procesos de adsorción e intercambio iónico en semicontinuo.

(a) Cálculo del tiempo al que se alcanza el punto de ruptura (t_r)

El punto de ruptura fue determinado experimentalmente a partir de la onda de adsorción, este fue 75,78 mg/L para un tiempo de contacto de 90 minutos. **(Mc Cabe y Smith 1990)**, refieren que para calcular el tiempo al que se alcanza el punto de ruptura se utiliza la ecuación 2.11, que se muestra a continuación:

$$- dt \quad (2.11)$$

Siendo, C: concentración de disolución al tiempo de saturación de resina (mg.L^{-1}) (considerado al punto de ruptura); C_0 : concentración inicial de la disolución (mg.L^{-1}).

Como resultado del cálculo se obtiene que el punto de ruptura se alcanza a los 80 minutos, valor muy cercano al obtenido de forma experimental que fue de 85 minutos.

(b) Cálculo de la longitud de lecho no utilizada (LUB).

El cálculo de la longitud de lecho no utilizada constituye un método para evaluar la capacidad de adsorción de adsorbentes en columnas de flujo continuo. En todos los casos la onda de adsorción permite establecer el punto de ruptura representado en la figura 2.11, tiempo al cual es necesario detener la operación de la columna y proceder al cambio del adsorbente. Para calcular la longitud de lecho no utilizada se emplea la ecuación 2.12, sugerida por **Ruthven (1984)** citado en **Alomá (2011)**.

—
(2.12)

Donde, h : altura del lecho (m); $t_{s, b}$: tiempo al que se alcanza la saturación de la resina y el punto de ruptura (minutos).

Como resultado de aplicar esta ecuación se obtiene que la longitud de lecho no utilizada es 0,068 m, que representa un 32 % del lecho.

(c) Cálculo de la capacidad de adsorción del lecho (q)

La capacidad de adsorción del lecho puede determinarse empleando la ecuación 2.13.

————— (2.13)

Donde: V : volumen de efluente hasta el punto de ruptura, en m^3 ; C_0 : concentración inicial, en mg/L; C : concentración en el punto de ruptura, en mg/L; V_r : volumen de resina, en m^3 , q : capacidad de adsorción del lecho, en mg absorbido/vol. de resina.

Como resultado de este cálculo se obtiene que el lecho tiene una capacidad de adsorción de 13780,88 mg absorbido/L de resina.

(d) Porcentaje total de remoción de iones durante la operación de la columna.

El porcentaje total de metal retenido durante la operación de la columna cuando se alcanza el punto de ruptura se obtiene por la ecuación 2.14:

—
(2.14)

Al aplicar la ecuación anterior se obtiene como resultado que se logra un cambio en la conductividad de 94,14 %, por lo que puede afirmarse que esta resina, cuyo mayor uso es para tratamiento de aguas, puede ser usada también en la purificación de jarabes.

2.5 Conclusiones parciales

- En el proceso de obtención de jarabes glucosados la concentración de Bialfa T tiene mayor influencia en el Brix que en el ED como variables respuesta, seguido del tiempo de sacarificación, aunque este a partir de las 48 horas no ejerce una influencia tan marcada sobre el ED.
- Los resultados alcanzados con la harina de sorgo no están muy alejados de los obtenidos con almidón de maíz, siendo mejores cuando se trabaja con almidón de maíz y la menor concentración de enzima Bialfa T y con harina de sorgo para la mayor concentración de esta enzima.
- La evaporación del jarabe a vacío en rotoevaporador garantiza la no caramelización del mismo, evitando el excesivo color y logrando un ahorro de tiempo en el proceso.
- En el tratamiento con carbón activado se sugiere trabajar con la menor concentración (0,5 % p/v) al no apreciarse cambios significativos en el color para los otros valores tomados.
- En el tratamiento para la purificación del jarabe con diferentes resinas de intercambio iónico, la Amberlite MB150 (empleada en la purificación de agua) ofreció los mejores resultados al brindar un 94,14 % de remoción de sales disueltas y una capacidad de intercambio de 13 780,88 mg absorbido/L de resina (al punto de ruptura), evitando una excesiva conductividad eléctrica en el jarabe que afecta al proceso de isomerización para fructosado.

CAPÍTULO 3

Capítulo 3: Propuesta tecnológica. Análisis económico

A solicitud de la Empresa GydeMa de Cienfuegos y con el fin de estudiar el proceso de obtención de jarabes fructosados, para posteriormente incluirlos en el surtido de productos, es necesario realizar el escalado de la columna de intercambio iónico, así como el diseño preliminar del reactor para la isomerización ambos a escala de planta piloto, definiendo previamente las características del proceso de purificación del jarabe de glucosa a escala de laboratorio y de acuerdo con sus particularidades.

3.1 Escalado de la columna de intercambio iónico a nivel de planta piloto

Se desea escalar la columna de intercambio iónico de laboratorio hasta el nivel de planta piloto, para ello se emplea la metodología propuesta por **Curbelo (1997)**, la cual toma en consideración los parámetros de operación del modelo en función de las mejores condiciones. En esta metodología se plantea que para el modelo y el prototipo se deben cumplir los siguientes principios:

- Similitud geométrica.
- Similitud térmica. El rango de temperatura de trabajo no varía.
- Similitud cinemática. Las propiedades físicas del fluido se mantienen constantes de una escala a otra, para garantizar el régimen de transferencia de masa.
- Similitud dinámica. Dado que el Reynolds es laminar.
- Similitud química. La capacidad adsorptiva de la cama se mantiene de una escala a otra. Este fue el criterio fundamental seleccionado para el escalado de la columna de intercambio iónico.

El volumen a tratar será de 120 L de jarabes de glucosa por día de trabajo de la planta para producir jarabes fructosados. El modelo es la columna a escala de laboratorio y el prototipo es la de planta piloto.

_____ (3.1)

El valor de la capacidad de adsorción del lecho (q) se calculó en el capítulo 2 epígrafe 2.4.2.2 siendo de 13780,88 mg absorbido/L de resina, a partir de este resultado y aplicando la ecuación 3.1 se obtuvo que el volumen de resina necesario para la columna a escala piloto es de 0,011 m³ para una concentración en el punto de ruptura de 32 mg/L. Conociendo este valor se puede calcular el diámetro interior de la columna

(D) y la altura de la cama (h), considerando una relación – según lo recomienda **Sánchez (2015)**, los resultados del escalado se muestran en la tabla 3.1, estos valores fueron estandarizados a 0,20 m de diámetro, 0,40 m de altura de la cama y 0,60 m de altura total de la columna para la planta piloto.

Tabla 3.1. Dimensiones de la columna modelo y la prototipo.

Dimensiones	Modelo	Prototipo
D (m)	0,015	0,21
h (m)	0,22	0,32
H (m)	0,4	0,57
V. resina (m ³)	3,75*10 ⁻⁵	1,1*10 ⁻²

3.2 Selección preliminar del equipamiento para llevar a cabo el proceso de obtención de jarabes fructosados

Teniendo en cuenta las condiciones de operación en la etapa de isomerización y cada una de las variables que influyen en el mismo, queda definido que para desarrollar el proceso se requiere de un recipiente con agitación empleando como medio de calentamiento vapor. Primeramente, se lleva el jarabe glucosado a una concentración de iones magnesio Mg²⁺ de 100 ppm con el objetivo de activar la enzima glucosa isomerasa; los iones magnesio sufren la competencia de los iones calcio, por lo que su concentración debe ser 20 veces mayor que la del calcio (**Aguilasocho 2004**). Luego se regula el pH del jarabe de glucosa en un rango de 7,5-8,5. El catalizador empleado es la enzima glucosa isomerasa inmovilizada. Este proceso se mantiene a una temperatura de 60 °C, temperaturas mayores causarían baja actividad enzimática. En el proceso explicado anteriormente es el reactor el equipo más importante.

3.2.1 Selección del tipo de reactor

(**Mc Cabe y Smith 1990**) plantean que cuando se trabaja en procesos a pequeñas escalas de forma discontinua, se utilizan reactores de tipo tanque agitado. Por consiguiente, tomando en consideración la forma en que se desarrolla el proceso de obtención de jarabes fructosados, se infiere la selección de un reactor de este tipo. En la tabla 3.2 se muestra una comparación entre el reactor tanque agitado y el tubular.

Tabla 3.2. Base de datos para la selección del tipo de reactor a utilizar en el proceso de obtención de jarabes fructosados.

Aspectos a considerar	Reactor tanque agitado	Reactor tubular
Técnicos y tecnológicos	1) Necesita de un agitador 2) Es perfectamente agitado 3) Trabaja a condiciones finales, la composición es la misma en cada punto del reactor 4) Menor transferencia de calor 5) Necesita mayor tiempo para la uniformidad de la temperatura 6) Trabaja a presiones moderadas 7) Puede tener operación continua o discontinua	1) El flujo de fluido es ordenado 2) Puede haber mezclado radial del fluido, pero no longitudinal 3) Tiempo de residencia igual para todos los elementos del fluido 4) Mayor uniformidad en el calentamiento 5) Trabaja a altas presiones 6) Mayor transferencia de calor 7) Operación continua
Espaciales	Su construcción es más fácil	Son más difíciles de construir
Económicos	Cuando trabaja en operación discontinua el costo de operación es más elevado que cuando trabaja en operación continua.	Mayor costo de construcción y mantenimiento.

3.2.2 Selección del medio de suministro de calor

Se selecciona la chaqueta como medio de calentamiento para llevar a cabo la etapa de isomerización, garantizando así que se produzca esta reacción a la temperatura requerida de 60 °C; pues a pesar de tener un costo de fabricación mayor y ser de difícil mantenimiento, los tanques enchaquetados son los más efectivos en cuanto al área de transferencia de calor, sin importar el alto costo de las chaquetas frente a su gran eficiencia; además de ser más apropiados cuando se trata de un proceso en el que se manejen productos alimenticios (Ulrich 1985).

3.2.3 Selección del tipo de agitador

Para la etapa de isomerización se selecciona un agitador de hélice, teniendo en cuenta las propiedades de la mezcla que se va a agitar: su viscosidad y densidad y los requerimientos del proceso. Estos agitadores utilizan un flujo axial y provocan gran turbulencia, es decir, producen un movimiento de la mezcla en todo el recipiente actuando como una bomba que succiona el líquido a lo largo de su eje antes de la reenviarlo al fondo. El líquido entonces es elevado a lo largo de las paredes y una vez en la parte superior del recipiente es succionado hacia el centro antes de descender.

Giran a altas velocidades, entre 300 y 1000 rpm, lo que provoca una agitación vigorosa en los tanques. Además, se usan cuando se trabaja con sólidos hasta 50% masa y para viscosidades menores de 4000 cP o cuando se agitan volúmenes grandes de líquidos. Consumen poca energía y son de bajo costo (**Kern 1979**).

3.3 Balances de energía en la chaqueta para desarrollar la reacción isomerización

La etapa de isomerización requiere calentar los jarabes glucosados hasta una temperatura de 60°C, y luego mantener esa temperatura para que se produzca la reacción isomerización. Este calentamiento se pretende llevar a cabo utilizando vapor de baja presión a 1,4 atm.

Datos:

Masa de la mezcla almidón-agua, $M_{JG} = 71,19 \text{ kg}$

Capacidad Calorífica de los jarabes glucosados, $C_{pJG} = 3,54 \text{ kJ/kg}^\circ\text{C}$

Diferencia de temperaturas, $\Delta T = 30^\circ\text{C}$

Temperatura que entra la mezcla, $T_1 = 30^\circ\text{C}$

Temperatura hasta donde se lleva la mezcla, $T_2 = 60^\circ\text{C}$

Temperatura del medio calefactor, $t_1 = 121^\circ\text{C}$

Calor latente del vapor, $\lambda_v = 2534,1 \text{ KJ/Kg}$ (**Keenan 1983**)

Coefficiente total de transferencia de calor, $U_D = 321,18 \text{ kJ/sm}^2 \text{ }^\circ\text{C}$ (Calculado según la metodología que plantea **Kern (1979)**, la cual se explicará detalladamente en el diseño de la chaqueta del reactor).

Área física de transferencia de calor, $A_f = 1,15 \text{ m}^2$ (Calculado según la metodología que plantea **Kern (1979)**, la cual se explicará detalladamente en el diseño de la chaqueta del reactor).

El calor que hay que transferirle a esa masa para que alcance la temperatura de 60°C es de:

(3.2)

Entonces para calcular el tiempo en que se realiza este proceso nos auxiliaremos de las ecuaciones de la sección 10.38 del **Perry y Chilton (1973)** para procesos a batch:

_____ (3.3)

Luego el tiempo que se demora en calentar la masa hasta la temperatura deseada a esas condiciones se calcula por la ecuación 3.4:

$$\frac{\text{---}}{\text{---}} \quad (3.4)$$

$$\theta = 0,27 \text{ seg}$$

Entonces la cantidad de calor (Q_g) en ese tiempo se convierte en el flujo calórico:

$$\text{---} \quad (3.5)$$

Balance de energía entre el medio calefactor y la mezcla:

$$(3.6)$$

Para llevar de 30°C a 60°C se requiere de una masa de vapor, $mv_1 = 10,913651 \text{ Kg/s}$.

Se requiere además de la determinación del calor requerido para mantener la temperatura durante cuatro horas. Una vez que el sistema alcanza esta temperatura no habría que suministrar más calor si no fuera por las pérdidas del sistema, las cuales se han estimado sean un 10 % del calor que se alimentó para llevarlo a dicho estado.

$$(3.7)$$

$$Q_p = 756,06 \text{ kJ en } 14400 \text{ seg.}$$

$$Q'_p = 0,053 \text{ kJ/s}$$

$$mv_2 = 2,0719 \cdot 10^{-5} \text{ kg/s}$$

La masa de vapor necesaria para esta etapa será la suma de estos balances y con un monto de **10,913672 kg de vapor/s**.

3.4 Dimensionamiento de los equipos fundamentales del proceso

El dimensionamiento de los equipos es uno de los pasos más importantes cuando se está diseñando una planta. A continuación se tienen en cuenta las metodologías planteadas por **Kern (1979)**, **Rosabal y Valle (2006)** y **Levenspiel (1985)**, entre otros, para dimensionar el reactor con agitación enchaquetado, que es el equipo fundamental del proceso.

El diseño del reactor para la isomerización se realizó según lo planteado por **Levenspiel (1985)**, considerando un volumen de 100 L equivalentes a 0,1 m³ y una relación altura-diámetro de 1:1,25. Los resultados se muestran en la tabla 3.3.

Capítulo 3. Propuesta tecnológica. Análisis económico

Tabla 3.3. Diseño del reactor para la isomerización.

Parámetro	Valor
Volumen, V (m ³)	0,1
Conversión, X (%)	70
Tiempo de reacción, t (horas)	4
Diámetro, D (m)	0,45
Altura, H (m)	0,675

Los valores de diámetro y altura del reactor para la isomerización obtenidos en la tabla 3.3 se estandarizaron hasta 0,45 m y 0,70 m respectivamente.

El diseño del agitador de hélice se realizó según la metodología propuesta por **Rosabal y Valle (2006)**. En la tabla 3.4 se muestran los resultados de este diseño.

Tabla 3.4. Diseño del agitador de hélice para el reactor para la isomerización.

Nomenclatura	Datos	Ecuación	Resultados	Referencia
Largo, d (m)	D=0,45 m d=(0,2-0,5)D	$d=0,25 \cdot D$	d=0,1125 m	Rosabal y Valle (2006)
Distancia del agitador al fondo del reactor, h (m)	d = 0,1125 m h=(0,5-1)d	$h= 0,7 \cdot d$	h=0,0787 m	Rosabal y Valle (2006)
Altura del líquido en el reactor, Ho (m)	D=0,45 m Ho=(0,8-1,2)D	$Ho=0,8 \cdot D$	Ho=0,36 m	Rosabal y Valle (2006)
Reynolds de mezclado, Rem	$\mu_{JG}=0,74 \text{ Pa} \cdot \text{s}$ $\rho_{JG}=1177,8 \text{ kg/m}^3$ N=555 rpm d=0,1125 m	—————	Rem=11179,89	Rosabal y Valle (2006)
Potencia consumida, P (kW)	Kn=0,25 (p.276) $\rho_{JG}=1177,8 \text{ kg/m}^3$ N=555 rpm d=0,1125 m		P=907,095 kW	Rosabal y Valle (2006)

Para el diseño de la chaqueta, se tiene en cuenta la mayor área de transferencia de calor correspondiente. En la tabla 3.5 se muestran los resultados. Como puede observarse, el área física ($A_f=1,15 \text{ m}^2$) es mayor que el área de transferencia de calor ($A= 0,31 \text{ m}^2$), lo que justifica la colocación de la chaqueta, la cual está a una altura

Capítulo 3. Propuesta tecnológica. Análisis económico

igual a la del líquido en el reactor, o sea, a 0,36 m, además tendrá un espesor de 1 pulgada.

Tabla 3.5. Diseño de la chaqueta del reactor para la isomerización.

Nomenclatura	Datos	Ecuación	Resultado	Referencia
Diámetro de la camisa (Dc)	D= 0,45 m d=0,1125 m			Kern (1979)
Área física de Transferencia de Calor (Af)	D= 0,45 m H=0,70 m	_____		Kern (1979)
Calor transferido (Qg)	m _{JG} = 71,19 kg Cp _{JG} = 3,54 kJ/kg °C ΔT=30°C			Kern (1979)
Reynolds modificado (Rej)	d=0,1125 m N= 555 rpm ρ _{JG} = 1177,8 kg/m ³ μ _{JG} = 0,74 Pa*s	_____	Rej= 11179,8984	Kern (1979)
Coeficiente individual de TC (hi)	jH= 260 (p816) (μ/μ _w) ^{0,14} =1(Se caliente) D=0,45 m k _{JG} = 0,297 W/m°C μ _{JG} = 0,74 Pa*s Cp _{JG} = 3,54 kJ/kg°C	_____		Kern (1979)
Coeficiente total de TC limpio (Uc)	hoi=8505 hi=354,55	_____		Kern (1979)
h _D	R _D =0,001 (h/pie ² °F)/BTU	_____		Kern (1979)
Coeficiente total de TC de diseño (U _D)		_____		Kern (1979)
ΔT verdadera	Δt ₁ = 91 °C Δt ₂ = 61 °C	_____		Kern (1979)
Área de Transferencia de Calor (A)		_____		Kern (1979)

3.5 Análisis económico de la planta piloto para la obtención de jarabes fructosados.

El análisis económico que se realiza tiene como objetivo determinar el costo total de la inversión de una planta piloto para estudiar el proceso de obtención de jarabes fructosados incluyendo la etapa de purificación de jarabes glucosados. Esta planta piloto incluye como equipos fundamentales una columna de intercambio iónico y un reactor enchaquetado de tipo tanque agitado. Este análisis se realizó para una capacidad de planta de 100 L/día de jarabes fructosados siguiendo la metodología planteada por **Peters y Timmerhaus (1991)**.

3.5.1 Costo de adquisición del equipamiento

Para el cálculo de la cantidad de PVC requerido para la columna de intercambio iónico y de acero inoxidable para la confección del reactor para la isomerización y dos tanques de almacenamiento, todos ellos de forma cilíndrica según la ecuación 3.8. Los resultados se muestran en la tabla 3.6.

(3.8)

Donde: D es el diámetro (m), H es la altura (m), x es el espesor de la plancha (0,02 m), Vcilindro es la cantidad de acero o de PVC requerido para la construcción del equipo (m^3).

Una vez calculada Vcilindro se determina por la ecuación 3.9 el costo de acero o PVC para cada equipo mostrados en la tabla 3.6, conociendo que: el costo de la plancha de PVC es $10,99 \$*kg^{-1}$, el costo de la plancha de acero inoxidable es $1620,16 \$*ton^{-1}$, la densidad del PVC es $1,05 kg/m^3$ y la densidad del acero es $7,85 t/m^3$.

Costo (\$) = Vcilindro*Precio*Densidad (3.9)

Al costo de la columna de intercambio iónico se le adiciona el costo de la resina Amberlite MB150, el que es \$ 47,15 y al del reactor se agrega la chaqueta (\$ 100) y el agitador de hélice (\$ 40).

Tabla 3.6. Costo total de los equipos.

Equipo	Cantidad	D (m)	H (m)	x (m)	V (m ³)	Costo de la plancha	Densidad del material de construcción	Costo total del equipo (\$)
Columna de intercambio iónico	1	0,21	5,3	0,002	0,007	10,99	1,05	47,20
Reactor para la isomerización	1	0,45	0,7	0,02	0,019	1620,16	7,85	1651,16
Tanques de almacenamiento	2	0,82	1,22	0,02	0,020	1620,16	7,85	508,73
Costo Total (\$)								2207,47

Como puede apreciarse en la tabla 3.6 el costo más alto es para el reactor para la isomerización ya que incluye una chaqueta y un agitador, seguido de los dos tanques de almacenamiento y de la columna de intercambio iónico, en correspondencia estos valores con los volúmenes de cada equipo. En el caso de la columna influye grandemente el costo de la resina de intercambio iónico.

3.5.2 Cálculo del Costo Total de Inversión

La estimación del costo total de inversión en función del costo de adquisición, cada uno de los restantes componentes de los costos directos, costos indirectos, capital fijo de inversión y el costo total de inversión, se realizó utilizando los factores de proporción y las ecuaciones correspondientes a la tabla 17 del **Peters y Timmerhaus (1991)**, adaptándola a las características de la inversión, los resultados son mostrados en la tabla 3.7.

Se puede determinar el Costo Total de Inversión (CTI), según la ecuación 3.10:

$$CTI = CFI + 0,15 * CFI \quad (3.10)$$

El Capital Fijo de Inversión, se calcula, según la expresión 3.11:

$$CFI = CD + CI \quad (3.11)$$

Los componentes de los Costos Totales Directos e Indirectos son mostrados en la tabla 3.7, así como un resumen del cálculo del costo total de inversión.

Tabla 3.7. Costo total de inversión.

COSTOS DIRECTOS		
COMPONENTE	%	COSTO (\$)
Costo del equipamiento (E)	E	2207,47
Instalación	39% E	860,91
Instrumentación	13% E	286,97
Electricidad	10% E	220,75
Tuberías	30% E	662,24
Facilidades de Servicio	55% E	1 214,11
CD		3 244,98
COSTOS INDIRECTOS		
COMPONENTE	%	COSTO (\$)
Ingeniería y supervisión	35% E	772,61
CI		772,61
CD + CI		4 017,60
OTROS COMPONENTES	%	COSTO (\$)
Derecho de Contrato	5% (CD + CI)	200,88
Contingencia	10% (CD + CI)	401,76
Inversión de trabajo (IT)		0,15*CTI
Costo Fijo de Inversión (CFI)		4 620,23
Costo Total de Inversión (CTI = IT+ CFI)		5 435,57

3.6 Conclusiones Parciales

- En el escalado de la columna de intercambio iónico a nivel de planta piloto se tomó como criterio fundamental la similitud química ya que la resina mantiene su capacidad adsorbtiva de una escala a otra. Los resultados fueron estandarizados a 0,20 m de diámetro, 0,40 m de altura de la cama y 0,60 m de altura total de la columna para la planta piloto.
- El balance de energía en la chaqueta arrojó que son necesarios aproximadamente 11 kg/s de vapor para desarrollar la etapa de isomerización.
- En el diseño del reactor y sus componentes fundamentales se calculó que el agitador consume una potencia de 907,095 kW, la chaqueta tiene un área de transferencia de calor de 0,31 m² y las dimensiones del reactor son: diámetro 0,45 m y altura 0,70 m.
- El costo total de la inversión para la instalación de una planta piloto para la obtención de jarabes de fructosa es de \$ 5 435,57.

Conclusiones

1. Del estudio de las variables que intervienen en la elaboración de jarabes glucosados a partir de harina de sorgo se obtiene que se puede trabajar con el nivel intermedio de concentración de Bialfa T (2,5 % p/p) y el menor de tiempo de sacarificación (48 horas), al no apreciarse diferencias significativas en los resultados de las variables respuesta entre los dos diseños experimentales.
2. La calidad de los jarabes de glucosa de harina de sorgo es similar a la de los jarabes de maíz, diferenciándose en los valores de la conductividad que en los de sorgo son mayores.
3. Para lograr una mejor calidad en la purificación de los jarabes se sugiere trabajar con una concentración de carbón activado de 0,5 % p/v, luego con la resina de intercambio iónico Amberlite MB150 lográndose un 94,14 % de remoción de sales disueltas y por último evaporando a vacío para alcanzar la concentración de sólidos deseada evitando la formación de color.
4. La obtención de la onda de adsorción para la resina Amberlite MB150 permitió determinar la capacidad de adsorción de la misma de 13 780,88 mg absorbido/L de resina para el tratamiento de jarabes, parámetro empleado para el escalado de la columna de intercambio iónico a nivel de planta piloto.
5. En el diseño del reactor se calcularon sus dimensiones, dando como resultados 0,45 m de diámetro y 0,70 de altura, así como las de sus componentes principales: el agitador y la chaqueta.
6. El costo total de la inversión para la instalación de una planta piloto para la obtención de jarabes de fructosa es de \$ 5 435,57, resultado adecuado para esta escala.

Recomendaciones

1. Continuar el estudio de obtención de jarabes glucosados de sorgo mejorando las condiciones de preparación de la materia prima y filtrando los dextrinizados antes de la etapa de sacarificación, ya que la conductividad eléctrica fue muy elevada en los jarabes de harina de sorgo.
2. Realizar un estudio para corroborar los valores de azúcares reductores totales (ART) en función del Brix por el método del DNS y el de Eynon-Lane para almidón como sustrato.
3. Aplicar a los jarabes otros tratamientos como: floculación, coagulación, sedimentación, entre otros, con el objetivo de bajar la conductividad antes del tratamiento de intercambio iónico para disminuir los costos de este proceso.

Referencias bibliográficas

- AGAMA, E., JUÁREZ, E., LOZANO, S., ROSALES, O. L. & BELLO, L. A. 2013. Características del almidón de maíz y relación con las enzimas de su biosíntesis, *Agrociencia*, 47, 1-12.
- AGAMEZ, C. 2014. *Diseño de un sistema de intercambio catiónico de lecho fijo para la potabilización de agua en el corregimiento de Malagana (Bolívar)*. Universidad de San Buenaventura Seccional Cartagena.
- AGUILASOCHO, B. 2004. *Obtención de Jarabes Fructosados a partir de Almidón de Dos Tipos de Sorgo (Sorghum bicolor)*. Instituto Tecnológico y de Estudios Superiores de Monterrey.
- ALOMÁ, I. 2011. *Tecnología sostenible para la obtención de un biosorbente de metales pesados a partir del bagazo de caña de azúcar*. Universidad Central "Marta Abreu" de Las Villas.
- ATIYEH, H. & DUVNJAK, Z. 2002. Production of fructose and ethanol from sugar beet molasses using *Saccharomyces cerevisiae* ATCC 36858. *Biotechnology Progress*, 18, 234-239.
- ÁVILA, B. R. 2014. *El intercambio iónico, su descripción y comportamiento químico*. Instituto Politécnico Nacional de México.
- BERNAL, L. & MARTÍNEZ, B. E. 2006. Una nueva visión de la degradación del almidón. *Revista del Centro de Investigación Universidad La Salle*, 7, 77-90.
- BETTÍN, L. Y. 2010. Estudio de la producción de jarabes glucosados a partir de maltodextrinas empleando dos enzimas comerciales. *Revista de la Facultad de Química Farmacéutica*, 17, 165-172.
- BLANCO, J. C. 2002. *Producción de jarabes especiales de alta fructosa (HFS) a partir de jarabes de glucosa obtenidos de tres variedades de yuca (armenta, amarga y chile) cultivadas en la región Guanenta (Santander)*. Universidad Industrial de Santander.
- CHAVIANO, M. 2005. El sorgo: contribución al desarrollo sostenible y ecológico de la producción popular de arroz. *Agricultura Orgánica*, 1, 8-11.
- COPELAND, L., BLAZEK, J., SALMAN, H. & CHIMNG, M. 2009. Form and functionality of starch. *Food Hydrocolloids*, 23, 1527-1534.
- CORRADINI, E. 2005. Comparative studies of corn thermoplastic starches with different amylose content. *Polímeros*, 15, 268-273.

- CURBELO, T. 1997. *Características de la aplicación del escalado en la Ingeniería Química*.
- DENDY, D. B. 2001. *Cereales y productos derivados: química y tecnología*, Zaragoza.
- DÍAZ, Y. 2014. *Perfeccionamiento del proceso de malteado de sorgo para la producción de maltinas para enfermos celíacos*. Universidad Central "Martha Abreu" de Las Villas.
- FERNÁNDEZ, A. 2002. *Estudio de la hidrólisis enzimática en la producción de un jarabe con alto contenido de maltosa a partir del almidón de Sagú (Maranta Arundinacea)*. Universidad de Costa Rica.
- FREDERIC, P., MILLER, E. & VANDOME, A. 2010. Ion Exchange Resin. *VDM Publishing House Ltd*, 13.
- FUJILL, M., MURAKAMI, S. & YAMADA, Y. 1981. *Biotechnol bioeng*, 18.
- GARCÍA, M., QUINTERO, G., RODOLFO, R. & AGUSTÍN, M. 1993. *Biotecnología Alimentaria*.
- GERENA, F. M. 2013. *Obtención de jarabes azucarados a partir de la hidrólisis química de residuos de cáscaras de naranja (citrus sinensis l var valencia) y papa (solanum tuberosum) variedad diacol capiro (r-12) para ser empleados como edulcorantes en la industria de alimentos*. Universidad Nacional Abierta y a Distancia "UNAD".
- GIRBÉS, T. & JIMÉNEZ, P. 2009. *Cereales*.
- GIRELLI, A. & MATTEI, E. 2005. Application of immobilized enzyme reactor in on-line high performance liquid chromatography: A review. *Journal of Chromatography B* 819, 3-16.
- GONZÁLEZ, J. F. 2015 *Obtención de maltina a partir de sorgo malteado como materia prima fundamental*. Universidad Central "Martha Abreu" de Las Villas.
- GONZÁLEZ, M. E. 2003. Elaboración de Jarabes de Fructosa a partir de Variedades de Sorgo (Sorghum bicolor, L. Moench). *Investigación y Ciencia*, 29-34.
- GONZÁLEZ, R. 2000. *Principios básicos de escalado*, Universidad de Matanzas "Camilo Cienfuegos".
- GUZMÁN, S. 1992. *Optimización de un procedimiento enzimático para la licuefacción del almidón mediante la metodología de superficie de respuesta*. Tesis, Instituto Politécnico Nacional. México.

- HERNÁNDEZ, C., PÉREZ, E., HEREDIA, E. & SERNA, S. 2011. Sorgo como un cultivo multifacético para la producción de bioetanol en México: Tecnologías, avances y áreas de oportunidad. *Revista Mexicana de Ingeniería Química*, 10.
- HERNANDEZ, D. 2013. *Modificación del almidón de sagú (Maranta arundinacea) por vía química, física y enzimática*. Universidad de La Habana.
- HERNÁNDEZ, J. P., RODRÍGUEZ-AMBRIZ, S. L. & BELLO-PÉREZ, L. A. 2008. Obtención de jarabe fructosado a partir de almidón de plátano (*Musa paradisiaca* L.). Caracterización parcial. *Interciencia*, 33 (5), 372-376.
- INTA. 2010. Cultivo del maíz: guía tecnológica para la producción de maíz (*Zea mays* L.)
- JIMENÉZ, C. 2014. *Investigación sobre propiedades y aplicaciones de la enzima: D-Xilosa Isomerasa*. Instituto Politécnico Nacional.
- KEENAN, J. H. 1983. *Thermodynamic Properties of Water Including, Vapor, Liquid and Solid Phases*, Edición Revolucionaria.
- KERN, D. 1979. *Procesos de Transferencia de Calor*, La Habana, Editorial Pueblo y Educación. Primera Reimpresión.
- KNORR, D., HEINZ, V. & BUCKOW, R. 2006. High pressure application for food biopolymers. *Biochemical et Biophysical Acta* 1764, 619–631.
- KRAJEWSKA, B. 2009. Properties and their customizing by enzyme immobilizations: A review, *J Mol Catal B: Enzym*, 59, 22-40.
- KUSUNOKI, K. & KAWAKAMI, K. 1982. *Biotechnol Bioeng*, 24.
- LACEO, C. 2012. Evaluación de boniato y grano de sorgo dulce para la producción de bioetanol. *Proyecto FPT 266*.
- LANCHO, A. C. 2015. *Obtención de jarabe a partir del almidón del maíz morado Zea Maydis L.* Universidad Nacional de Callao, Perú.
- LEAKOVIC, S., MIJATOVIC, I., CERJAN, S. & HODZIC, E. 2000. Nitrogen removal from fertilizer wastewater by ion exchange, *Water Research*, 34, 185-190.
- LEHNINGER, A. L. 1995. *Las Bases Moleculares de la Estructura y Función Celular*, Barcelona.
- LENNTech. 2017. *Menú de conversor de unidades de conductividad* [Online]. Available: <https://www.lenntech.es/calculadoras/conductividad/conductividad.htm> [Accessed 10 de junio de 2018].

- MALEKZADEH, S. A. & FAHID, A. 2005. Coeliac disease in developing countries: Middle East, India and North Africa. *Best Pract Res Clin Gastroenterol.* 19, 351-358.
- MATEO, C., PALOMO, J., LORENTE, G., GUISAN, J. & FERNÁNDEZ-LAFUENTE, R. 2007. Improvement of enzyme activity, stability and selectivity via immobilization techniques. *Enzyme and Microbial Technology* 40, 1451-1463.
- MC CABE, W. & SMITH, J. 1990. *Operaciones Básicas de la Ingeniería Química*, La Habana.
- MEDINA, J. 2015. *El sorgo: una opción en la producción de jarabes dextrinizados*. Universidad de Cienfuegos "Carlos Rafael Rodríguez".
- MERA, I., HOYOS, J. L., CARRERA, J., FORERO, C. L. & VELASCO, R. V. 2003. Caracterización enzimática de alfa-amilasa y glucoamilasa en la hidrólisis de almidón de yuca (manihot esculenta). *Revista biotecnología de la Facultad de Ciencias Agropecuarias*.
- MORALES, A. S., ÁLVAREZ, B. H. & SÁNCHEZ, C. C. 2008. Dynamic models for the production of glucose syrups from cassava starch. Short communication. *Food and bioproducts processing*, 25-30.
- MORALES, Y. & SÁNCHEZ, I. A. 2004. *Diseño conceptual y comparación técnica de los procesos de hidrólisis ácida y enzimática para la producción de glucosa a partir de almidón de yuca*. Universidad Industrial de Santander.
- MOREJÓN, J. E. 2016. *Sustitución de la hidrólisis ácida por la enzimática en la obtención de jarabes glucosados utilizando almidón de maíz como sustrato*. Universidad Central "Marta Abreu" de Las Villas.
- NIEBLAS, C. 2015. *Análisis de la producción de almidón y jarabes glucosados a partir del sorgo para la industria alimenticia*. Universidad Central "Marta Abreu" de Las Villas.
- OCHOA, M. & HERAZO, G. 2008. *Bioetanol: Alcohol Carburante Recuperado*.
- ONUAA 2007. Cereales, Legumbres, Leguminosas y Productos Proteínicos Vegetales, *CODEX ALIMENTARIUS*.
- ORDÚZ, J. & VERGEL, C. 1987. *Estudio de las variables de proceso para el diseño de un reactor tubular para hidrólisis ácida continua de almidones*. Universidad Industrial de Santander.
- ORTAS, L. 2008. *El cultivo de maíz: fisiología y aspectos generales*.

- ORTEGA, V. & DOLORES, M. 2015. *Aplicación de la tecnología de intercambio iónico a la depuración de aguas residuales de la industria oleícola*. Universidad de Granada, España.
- PARDO, M. & RIBERA, P. 2001. *Diseño de un biorreactor para la hidrólisis enzimática de almidones*. Universidad Nacional de Colombia.
- PÉREZ, A. H. 2009. *Empleo de forrajeras proteicas y sorgo energético en la dieta porcina*.
- PERRY, J. H. & CHILTON, C. H. 1973. *Chemical Engineers Handbook*, New York, 5th edition, McGraw-Hill.
- PERRY, R. E. & GREEN, D. 1989. *Perry's Chemical Engineer's Handbook*, La Habana, Edición Revolucionaria.
- PETERS, M. S. & TIMMERHAUS, K. D. 1991. *Plant Desing and Economics for Chemical Engineers*, New York, 3rd edition, McGraw-Hill.
- QUESADA, M. & HERNÁNDEZ, A. 2012. Producción de jarabe de fructosa con enzimas inmovilizadas en un proceso continuo a partir de tiquisque (*Xanthosoma sagittifolium*). *Ciencia y Tecnología*, 28, 13-24.
- RASHMI, D. 2012. Taste Masking by Ion Exchange Resins. *Lambert Academic Publishing (LAP)*, 13.
- REGA, L. 2016. *Obtención de jarabes glucosados a partir de sorgo mediante hidrólisis enzimática*, Universidad Central "Marta Abreu" de Las Villas.
- RIVERO, B. 2017. *Diseño del sistema de evaporación en la producción de glucosa por vía enzimática en la UEB "Chiquitico Fabregat"*. Universidad Central "Marta Abreu" de Las Villas.
- RODRÍGUEZ, L. 2010. *Obtención de Bioetanol a partir de sorgo, empleando las Enzimas generadas del malteo del propio grano*. Universidad Central "Martha Abreu" de Las Villas.
- RODRÍGUEZ, R. 2016. *Propuesta tecnológica para la obtención de glucosa por hidrólisis enzimática a partir del azúcar refino*. Universidad Central "Marta Abreu" de Las Villas.
- ROONEY, L. W. & SERNA, S. O. 2000. Sorghum In: K.KULP & PONTE, J. (eds.). *Handbook of Cereal Science and Technology*. New York.
- ROSABAL, J. M. & VALLE, M. 2006. *Hidrodinámica y separaciones mecánicas*, La Habana, Editorial Félix Varela.

- RUBIO, M., BERNAL, M., RAMÍREZ, L. I., GARCÍA, R. S. & DURÁN, C. 2004. *Montaje de técnicas analíticas para medir glucosa, fructosa y sacarosa por cromatografía de líquidos en jugos de caña de azúcar*. Informe Final de Proyecto CNIAA – PIQA y QA, México.
- RUIZ, M. I. 2009. *Obtención de jarabes de glucosa a partir de almidón de yuca por medio de hidrólisis enzimática, para ser usados como sustrato en la producción de bioetanol*. Universidad Industrial de Santander.
- RUTHVEN, D. M. 1984. *Superficie de lecho no utilizada*, New York, IN PROCESSES, P. O.
- SÁNCHEZ, A. 2002. *Obtención de jarabes de glucosa por hidrólisis enzimática de almidón extraído de tres variedades de yuca (Amarga, Armenia y Chile) cultivadas en provincia Guanenta (Santander)*.
- SÁNCHEZ, C. 2015. Fichas técnicas de etapas de proceso de plantas de tratamiento de aguas residuales de la industria textil. *INDITEX*, 1-28.
- SERNA, S. 1997. Refinación de almidón y producción de jarabes glucosados a partir de sorgo y maíz. *Investigación y Desarrollo Tecnológico*.
- SERNA, S. 2002. Avances recientes en la utilización del sorgo en América Latina. *La Calera*.
- SERNA, S. 2011. Bioconversión de almidones en jarabes dextrinizados, maltosados, glucosados y fructosados. *Quinto Simposio Internacional de Innovación y Desarrollo de Alimentos*.
- SINGH, N. & KAURN, S. 2005. Physicochemical, cooking and textural properties of milled rice from different Indian rice cultivars. *Food Chemical* 2, 253-259.
- TAYLOR, J. R., SCHOBBER, T. J. & BEAN, S. R. 2006. Novel food and non-food uses for sorghum and millets. *Journal of Cereal Science*, 44, 252–271.
- TORRES, L. M. 2012. Concentración de enzimas amilolíticas en la hidrólisis del almidón de jengibre. *Ciencia Rural*.
- TOVAR, T. 2008. *Caracterización morfológica y térmica del almidón de maíz (Zea mays l) obtenido por diferentes métodos de aislamiento*. Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo.
- TREYBAL, R. 1985. *Operaciones con Transferencia de Masa*, La Habana, Cuba, Edición Revolucionaria.
- ULRICH, G. 1985. *Diseño y economía de los procesos de Ingeniería Química*.

Referencias bibliográficas

WIKIPEDIA, C. 2018. *Jarabe de maíz* [Online]. Wikipedia: la enciclopedia libre.
Available:
https://es.wikipedia.org/w/index.php?title=Jarabe_de_ma%C3%ADz&oldid=105938988 [Accessed 5 de marzo del 2018].

Anexos

Anexo 1: Determinación de azúcares reductores totales (ART).

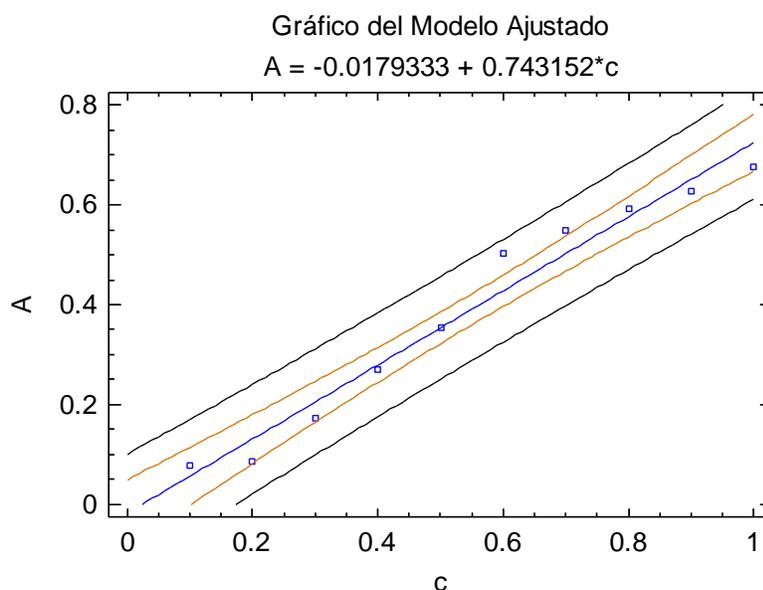
Fundamento del método:

Este se basa en la relación lineal que existe entre la absorbancia y la concentración según la ley de Lamber-Beer, siendo la absorbancia medida proporcional a la concentración de azúcares reductores presentes en la muestra.

Procedimiento:

1. Se añade a un tubo de ensayo 1 mL del sobrenadante centrifugado y 2 mL de la solución de reactivo 3,5 – Dinitrosalicílico mezclando bien.
2. Se colocan los tubos de ensayo en baño de agua hirviendo durante 5 minutos, extrayéndose posteriormente y dejándose enfriar hasta temperatura ambiente.
3. Se enrasan todos los tubos de ensayo hasta 10 mL con agua destilada y se lee en el espectrofotómetro a 540 nm contra un blanco preparado con 1 mL de agua destilada el cual debe sufrir la misma técnica operatoria **(Nieblas 2015)**.

Para la confección de la curva de calibración se prepararon 10 soluciones a diferentes concentraciones de glucosa, midiéndose la absorbancia de las mismas, luego puede saberse la cantidad de glucosa y se obtiene el siguiente gráfico.



Anexo 2: Determinación de la acidez.

Fundamento del método:

La acidez de la muestra previamente diluida mediante valoración con solución de hidróxido de sodio usando fenolftaleína al 1 % como indicador se expresa como ácido clorhídrico.

Reactivos:

Solución de hidróxido de sodio 0.1 N, de concentración exacta.

Indicador de fenolftaleína al 1%.

Aparatos, utensilios y medios de medición:

Balanza técnica con límite máx. de 610 g y valor de división de 0,1 g.

Frasco cónico de 500 ml.

Probeta graduada de 250 ml.

Bureta de 25 ml graduada en 0,1 ml.

Procedimiento:

Se pesan (50 ± 0.5 g) de sirope de glucosa en un frasco cónico de 500 ml y se diluyen con 200 ml de agua aproximadamente, se añade 1 ml de indicador de fenolftaleína al 1 % y se valora con soluciones de hidróxido de sodio 0,1 N hasta la aparición del primer color rosado permanente.

Expresión de los resultados:

Método para los cálculos.

Donde:

a: volumen en ml de solución de hidróxido sodio 0,1 N consumidos en la valoración.

m: masa de la muestra, en gramos.

Anexo 3: Determinación de pH.

Este método se utiliza para la determinación del pH mediante el método potenciométrico en todos los tipos de sirope de glucosa.

Fundamentación del método:

Según la norma NC- 90-13-13:80. Aseguramiento Metrológico. Medidores de pH, reglas generales para efectuar mediciones de pH.

Reactivos:

Según NC- 90-13-13:80. Aseguramiento Metrológico. Medidores de pH.

Reglas generales para efectuar mediciones de pH y NC-90-13-08:79.

Aseguramiento Metrológico Medidores de pH. Soluciones reguladoras de pH

Soluciones reguladoras de pH. Requisitos para la elaboración.

Aparatos utensilios y medios de medición:

- Balanza técnica con límite máximo de 610 g y valor de división de 0,1 g.
- Metro de pH exacto y confiable, equipado con electrodo de cristal y calomer, o combinado, capaz de medir pH en un intervalo de 1 a 10, con precisión de 0,1 pH.

Anexo 4: Ficha técnica de la resina de intercambio Amberlite MB150.

AMBERLITE MB150 es una resina de lecho mixto equilibrada iónicamente. Lista para usar, tal como se suministra, es una mezcla de una resina catiónica fuertemente ácida y una resina de intercambio de aniones tipo 1 fuertemente básica. Se utiliza para la producción de agua de alta pureza y otras aplicaciones que requieren agua totalmente desmineralizada.

Modelo: Amberlite MB150

Composición volumétrica: 40% Catión/60% Anión

Forma iónica: Hidrógeno/Hidróxido

Relación equivalente catión/anión: 1/1

Capacidad: 0,55 eq/L

Forma física: esféricas, húmedas y completamente hidratadas.

Intervalo de pH: 0-14

Flujo: 5-10 m³/h

Temperatura máxima: 60 °C

Estabilidad química: Insoluble en agua, soluciones diluidas de ácidos o bases y disolventes comunes.