



# **Evaluación del proceso de obtención de jarabes a partir de mieles de caña panelera**

**Adriana Carolina Peña Holguín**

Universidad Nacional de Colombia  
Facultad de Ciencias Agrarias, Área Curricular de Agroindustria  
Bogotá D.C., Colombia  
2017



# **Evaluación del proceso de obtención de jarabes a partir de mieles de caña panelera**

**Adriana Carolina Peña Holguín**

Tesis presentada como requisito parcial para optar al título de:  
**Magister en Ciencia y Tecnología de Alimentos**

Director:

I.Q. Néstor Ariel Algecira Enciso

Línea de Investigación:

Calidad de los Alimentos

Universidad Nacional de Colombia  
Facultad de Ciencias Agrarias, Área Curricular de Agroindustria  
Bogotá D.C., Colombia

2017



*Lo que obtienes al alcanzar tus metas no es tan importante como en lo que te conviertes al conseguirlas.*

*Henry David Thoreau*



## **Agradecimientos**

A Dios, a mi familia y a todas las personas que me brindaron su apoyo para la realización de esta tesis, en especial al ingeniero Néstor Algecira, director del proyecto, por su asesoría y apoyo; al ingeniero Hugo Reinel García por su orientación y principalmente por darme la oportunidad de trabajar con él y desarrollar mis capacidades en investigación, además de ser un modelo a seguir en mi vida profesional; a los ingenieros Luz Esperanza Prada, Ricardo Andrés López, John Espitia y Sonia Polo por su ayuda; y Andrea Ballesteros por su cooperación.



## Resumen

La agroindustria panelera en Colombia ha tenido un adelanto tecnológico que la ha llevado a convertirse en una de las pioneras a nivel mundial en su rama, sin embargo, se aún se presentan problemas en el proceso de producción, así como de mercado que limitan el crecimiento de esta cadena productiva. La “Diversificación y desarrollo de productos con valor agregado y calidad”, es una demanda de este sector que busca la creación de nuevas oportunidades de mercado. Los jarabes o *syrups* de caña, los cuales pueden obtenerse a partir de mieles de caña hidrolizadas, pueden ser una opción interesante debido a su amplio rango de uso en la industria de alimentos como insumos alimenticios o aditivos culinarios. En el presente trabajo se planteó la obtención de jarabes de caña a partir de la hidrólisis mieles de caña panelera. Las mieles de caña fueron elaboradas usando las variedades RD-7511 y CC-93-7711 sin adición de cal hasta alcanzar una concentración de  $66,89 \pm 0,26$  °Brix en la planta piloto de Corpoica sede CIMPA ubicada en el municipio de Barbosa, Santander. Los ensayos de hidrólisis se llevaron a cabo utilizando un diseño factorial incompleto con dos métodos de hidrólisis (ácida y enzimática) y un control, dos temperaturas ( $60,2 \pm 3,5$  °C y ambiente de  $28 \pm 2,5$  °C), con y sin agitación y tres repeticiones. Para la hidrólisis se ajustó el pH a  $4,61 \pm 0,05$  con ácido cítrico en una concentración de  $1,092 \pm 0,005$  g por litro de miel. Para la hidrólisis enzimática se empleó invertasa comercial en una concentración promedio de  $1,093 \pm 0,005$  g por litro de miel. Los resultados mostraron que la hidrólisis enzimática presentó las mejores condiciones para la obtención de jarabes, alcanzando una concentración final de azúcares reductores de  $61,6 \pm 3,22\%$  y  $19,91 \pm 2,58\%$  de sacarosa y a  $60,2 \pm 3,5$  °C y tres horas de reacción.

**Palabras clave:** Hidrólisis, Caña de Azúcar, Diversificación de productos, Azúcares reductores.

## Abstract

The panela agroindustry in Colombia has had a technological advance that has led it to become one of the pioneers worldwide in its branch; however, there are still problems in the production process, as well as market that limit growth of this productive chain. The "Diversification and development of products with added value and quality", is a demand of this sector that seeks the creation of new market opportunities. Sugarcane syrups, which can be obtained from hydrolyzed sugarcane honeys, can be an interesting option due to their wide range of use in the food industry as food inputs or culinary additives. In the present work, sugarcane syrups were obtained from the hydrolysis of panela honey. The sugarcane honeys were elaborated using the varieties RD-7511 and CC-93 -7711 without addition of lime until reaching a concentration of  $66.89 \pm 0.26$  ° Brix in the pilot plant of Corpoica branch CIMPA located in the municipality of Barbosa, Santander. The hydrolysis assays were carried out using an incomplete factorial design with two hydrolysis methods (acid and enzymatic) and one control, two temperatures ( $60.2 \pm 3.5$  °C and ambient  $28 \pm 2.5$  °C), with and without agitation and three repetitions. For hydrolysis, the pH was adjusted to  $4.61 \pm 0.05$  with citric acid at a concentration of  $1.092 \pm 0.005$  g per liter of sugarcane honey. For the enzymatic hydrolysis, commercial invertase was used, with an average concentration of  $1.093 \pm 0.005$  g per liter of sugarcane honey. The results showed that the enzymatic hydrolysis presented the best conditions for obtaining sugarcane syrups, reaching a final concentration of reducing sugars of  $61.6 \pm 3.22\%$  and  $19.91 \pm 2.58\%$  of sucrose and  $60.2 \pm 3.5$  °C and three hours of reaction.

**Keywords:** Hydrolysis, Sugar cane, Diversification of products, Reducing sugars.

# Contenido

	Pág.
<b>Resumen</b> .....	<b>IX</b>
<b>Abstract</b> .....	<b>X</b>
<b>Lista de figuras</b> .....	<b>XIII</b>
<b>Lista de tablas</b> .....	<b>XIV</b>
<b>Introducción</b> .....	<b>1</b>
<b>1. Revisión Bibliográfica</b> .....	<b>7</b>
1.1. Proceso de elaboración de la panela .....	7
1.2. Mielles de caña de azúcar .....	8
1.3. Hidrólisis de sacarosa.....	11
1.3.1. Hidrólisis ácida.....	12
1.3.2. Hidrólisis enzimática .....	13
1.4. Hidrólisis de jugos y mieles de caña de azúcar.....	16
1.5. Jarabes.....	19
<b>2. Materiales y Métodos</b> .....	<b>23</b>
2.1. Hidrólisis de mieles de caña .....	23
2.2. Diseño del reactor.....	27
2.3. Análisis del proceso.....	27
2.3.1. Análisis financiero.....	27
<b>3. Resultados y Análisis</b> .....	<b>29</b>

---

3.1.	Hidrólisis de mieles de caña.....	29
3.2.	Diseño del reactor .....	31
3.3.	Análisis del proceso .....	41
3.3.1.	Análisis financiero .....	46
<b>4.</b>	<b>Conclusiones y Recomendaciones .....</b>	<b>51</b>
4.1.	Conclusiones.....	51
4.2.	Recomendaciones.....	52
<b>A.</b>	<b>Anexo: Datos experimentales .....</b>	<b>53</b>
<b>B.</b>	<b>Anexo: Resultados del análisis estadístico .....</b>	<b>55</b>
	<b>Bibliografía .....</b>	<b>59</b>

## Lista de figuras

	Pág.
<b>Figura 1-1.</b> Ilustración del proceso de elaboración de la panela .....	7
<b>Figura 1-2.</b> Miel de Trapiche. Estable (Izquierda). Desestabilizada, con presencia de dos fases (Derecha).....	9
<b>Figura 1-3.</b> Reacción de hidrólisis *de la sacarosa.....	11
<b>Figura 1-4.</b> Diagrama de velocidad de reacción y constante de Michaelis-Menten .....	14
<b>Figura 2-1.</b> Diseño experimental utilizado .....	24
<b>Figura 2-2.</b> Potenciómetro marca Scott.....	25
<b>Figura 2-3.</b> Refractómetro marca Anton Para Abbemat 300 .....	25
<b>Figura 2-4.</b> Polarímetro ATAGO SAC i para la determinación de sacarosa .....	26
<b>Figura 2-5.</b> Montaje para la determinación de azúcares reductores por el método de Lane y Eynon .....	26
<b>Figura 3-1.</b> Variación de la concentración de sacarosa durante la hidrólisis enzimática de mieles de caña .....	32
<b>Figura 3-2.</b> Velocidad de reacción estimada para la hidrólisis enzimática de mieles de caña .....	34
<b>Figura 3-3.</b> Diseño del reactor .....	40
<b>Figura 3-4.</b> Diagrama de flujo del proceso de producción de panela.....	41
<b>Figura 3-5.</b> Diagrama de flujo y balance de masa para el proceso de producción de panela y el proceso de producción de jarabes a implementar en las centrales de mieles	43

## Lista de tablas

	<b>Pág.</b>
<b>Tabla 1-1.</b> Sectores comerciales para la cadena productiva de panela y su agroindustria	3
<b>Tabla 1-1.</b> Composición química y nutricional de la miel de trapiche .....	10
<b>Tabla 1-2.</b> Poder inversor de ácidos inorgánicos y orgánicos .....	12
<b>Tabla 3-1.</b> Variación de la concentración de sacarosa expresada como PurezaPol.....	30
<b>Tabla 3-2.</b> Grado de hidrólisis.....	31
<b>Tabla 3-3.</b> Datos usados para el cálculo del reactor .....	35
<b>Tabla 3-4.</b> Propuesta de ficha técnica de jarabe de caña .....	45
<b>Tabla 3-5.</b> Características de jarabes sacarosa comerciales .....	45
<b>Tabla 3-6.</b> Costos anuales de materia prima .....	47
<b>Tabla 3-7.</b> Costos anuales de mano de obra .....	47

# Introducción

La producción de panela es la agroindustria más antigua del país, pues se realiza desde hace cuatro siglos y constituye una de las actividades que caracterizan la identidad social, cultural y económica de Colombia. Es una de las principales actividades económicas en las regiones de los Andes colombianos, como fuente de ingresos para más de 70.000 familias campesinas y una disponibilidad cercana a los 15.000 trapiches como infraestructura para la fabricación de panela (Espinal *et al.*, 2005), que responden a una significativa demanda nacional y a un consumo arraigado en los sectores urbanos y rurales del país. La panela es un producto de economía campesina, el cual se produce en casi todo el país durante todo el año y constituye la economía básica de 236 municipios, en 12 departamentos (Martínez y Acevedo, 2003). Colombia es el primer productor de panela en América y el segundo productor mundial, después de la India, con una participación cercana al 10% de la producción mundial (13 millones t/año) valorada en 550 millones de dólares (FAO, 2007).

La agroindustria de la panela en Colombia cumple importantes roles: económicos, sociales, culturales, ambientales y de seguridad alimentaria (Rodríguez, s.f). A pesar de su importancia la agroindustria de la panela afronta serios problemas de mercado que limitan su desarrollo y el mantenimiento de sus múltiples roles en la sociedad colombiana. En primer lugar, la producción artesanal de panela enfrenta una fuerte competencia con el azúcar obtenido en condiciones de gran industria que suscita cambios en los patrones de consumo a favor del azúcar, especialmente en las zonas urbanas. De otro lado, estructuralmente se presenta una sobreoferta de caña para azúcar y panela que ocasionan frecuentes caídas de los precios que afectan principalmente a los pequeños productores paneleros (García *et al.*, 2007).

---

En 2010 en la “Agenda prospectiva de investigación y desarrollo tecnológico para la cadena productiva de la panela y su agroindustria en Colombia” se identificaron diecinueve factores críticos los cuales se constituyen en la base para la formulación, validación y estructuración de proyectos alrededor de la cadena productiva de la panela y su agroindustria. Estos factores pueden dividirse en: once demandas tecnológicas, definidas como los factores de naturaleza tecnológica que limitan el desempeño y restringen el alcance de mejores niveles de eficiencia a partir del uso y explotación de la variable tecnológica, y ocho demandas no tecnológicas, correspondientes a factores que no se encuentran asociados a la tecnología y su aplicación, sino que pueden ser de naturaleza económica, política, social, cultural, entre otras, pero que igualmente requieren atención para mejorar los niveles de competitividad de la cadena productiva (Castellanos *et. al.*, 2010).

Dentro de las demandas tecnológicas está la “Diversificación y desarrollo de productos con valor agregado y calidad”, para lo cual se propone la generación de un trabajo intensivo en investigaciones para la diversificación en las líneas de producción en productos de valor agregado y diferenciado incrementando el portafolio de la cadena productiva, logrando la creación de mercados a partir de la creación de necesidades de consumo y desarrollo de productos. Para poder evaluar la diversificación de los productos obtenidos a partir de la caña de azúcar en una primera instancia se seleccionaron siete familias de productos, basados en su uso en la industria, cada una enmarcada en un entorno comercial y económico particular para un sector de negocio específico como se observa en la Tabla 1-1 (Castellanos *et. al.*, 2010).

La caña como materia prima para la obtención de productos a partir de sus extractos, tiene en el mercado mundial como principales productos alternativos al azúcar y el bioetanol: la producción de jarabes de caña, cosméticos, farmacéuticos, empaques de bagazo de caña y bebidas alcohólicas. Estas tendencias ofrecen un panorama del contexto en el cual se encuentra ubicada la cadena productiva en el ámbito comercial, y las posibilidades para diversificar la actividad productiva en escenarios futuros. De igual manera se logró generar un punto de referencia y contraste para la definición del producto priorizado (Castellanos *et. al.*, 2010).

**Tabla 1-1.** Sectores comerciales para la cadena productiva de panela y su agroindustria

Familias de productos	Cadena competidora	Productos principales	País referente
Edulcorantes	Caña de azúcar	Panela en bloque, pulverizada y saborizada	Brasil e India Ecuador y Chile
Farmacéuticos	Caña de azúcar / Apícola	Policosanoles	China, Estados Unidos e India
Jarabes y Mieles	Apícola	Jarabe de caña puro, mieles invertidas y jarabe de caña saborizado	Italia, Francia
Productos de papel	-	Productos de bagazo de caña, cajas, platos, empaques, etc.	China
Biocombustibles	Caña de azúcar	Bioetanol	Estados Unidos, China, Brasil
Bebidas	-	Té, café, aromáticas, néctares con panela, licores	-
Cosméticos	Productos naturales en el campo de los cosméticos	Cremas, tratamientos y productos para el cabello con azúcar crudo como ingrediente activo	Australia, Unión Europea, entre otros

Fuente: Castellanos *et al.*, 2010

Entre las tendencias en el uso de extractos de caña de azúcar, están los jarabes de miel de caña o jarabes de caña como insumos alimenticios o aditivos culinarios, los cuales pueden ser naturales o saborizados, es decir, producidos sin la adición de sustancias que modifiquen sus propiedades organolépticas o con la adición de estas para ofrecer una gama de productos diversificada, que permita un nivel de diferenciación con productos similares. El mercado mundial de los jarabes naturales muestra un nivel de comercialización estructurado, presentando factores de competitividad por la gran variedad de plantas de las cuales se pueden extraer jugos para la fabricación de *syrops*, como lo son el agave, el maple, el arce y por supuesto la caña de azúcar. Los principales países productores de jarabes de caña de azúcar en el mundo son Italia, India, China y Brasil (Castellanos *et al.*, 2010).

Dado que los jarabes de caña o *syrops* de caña, tienen un mayor contenido de azúcares reductores (glucosa y fructosa) los cuales poseen un mayor valor biológico para el organismo que la sacarosa; y además al ser líquidos de fácil disolución y con un mayor poder edulcorante que la sacarosa, pueden ser usados en la industria de alimentos como insumos alimenticios o aditivos culinarios (naturales o saborizados) en refrescos, bebidas

---

carbonatadas, en productos de panadería y otros. También debido a su naturaleza higroscópica, los jarabes invertidos se utilizan como humectantes en la fabricación de dulces (Kotwal y Shankar, 2009). Dadas estas características los jarabes de caña se constituyen en una opción interesante en Colombia en cuanto a la diversificación de productos ya que estos pueden obtenerse a partir de mieles de caña hidrolizadas. Sin embargo, para la diversificación y desarrollo de productos con valor agregado y calidad se requiere del entendimiento de los fenómenos y desarrollo de nuevas líneas de producción que garanticen calidad e innovación en productos derivados de la agroindustria panelera a partir del fortalecimiento de infraestructura, equipos y procesos, enfocados al nicho de mercado objetivo (Castellanos *et. al.*, 2010).

La optimización de los sistemas de producción, en términos de unidades y eficiencia, acompañada del avance tecnológico, entendimiento de fenómenos y mecanización de las operaciones, debe contribuir al incremento de la productividad y a mejorar la calidad del producto. Para el mejoramiento de calidad de la panela y sus presentaciones así como de productos alternativos, se requiere el perfeccionamiento de equipos e infraestructura, y a su vez trabajar en el desarrollo de nuevas tecnologías apropiadas para cumplir con los indicadores de calidad en mieles y panela exigidos por la industria y el consumidor actual, y así modernizar su producción, y expandir sus mercados (García, 2008). Además, la adopción de una estrategia productiva orientada hacia la diversificación de los usos de la caña, involucra cambios en los patrones de organización de la unidad microempresarial, un uso más eficiente de los recursos de tierra, trabajo y capital, y el diseño de estrategias para la incursión efectiva a los mercados de los nuevos productos del sistema. Esta diversificación de productos busca alternativas de aprovechamiento de nuevos productos o nuevos usos (García *et al.*, 2007).

En este sentido, la Federación Nacional de Productores de Panela Fedepanela está incentivando, a través de proyectos de regalías, la instalación de plantas denominadas Centrales de mieles, en las cuales se reciben mieles vírgenes procedentes de diferentes trapiches paneleros con el fin de mezclarlas y homogenizarlas para elaborar panela de calidad, de coloración homogénea, e inocua producida mediante la utilización de tecnología a vapor, bajo condiciones higiénicas y ajustadas a las normas vigentes. Actualmente en el país existen en funcionamiento dos centrales de mieles una en

Cisneros, Antioquia y otra en Quinchía, Risaralda. Hay otras cinco centrales construidas que se encuentran en proceso de entrar en funcionamiento, dos en Cundinamarca (Caparrapí y Útica) y tres en Tolima (Mariquita, Alvarado y Palocabildo). Además, hay dos más en construcción, una en el Tambo, Nariño y otra en San José de Isnos, Huila<sup>1</sup>.

Según Comerpanela, unidad de comercialización de Fedepanela, con las centrales de mieles la producción de panela se tecnifica y se contribuye con la regulación de calidad y precios de la misma, lo que incentivará a que los paneleros adopten nuevas prácticas de producción, ya que uno de los objetivos del plan estratégico de la federación, es la adecuación de la infraestructura y la modernización tecnológica (Contexto ganadero, 2016).

Con el montaje de las centrales de mieles también se busca mejorar las condiciones del mercado de la panela y la calidad de vida de los productores colombianos al buscar la incursión en nuevos mercados nacionales, e internacionales e incentivar un mayor consumo, ya que la visión de Fedepanela es crear una cadena dinámica, en donde la federación participaría en todo el plan de comercialización y de promoción, así como en la identificación de aliados y el desarrollo productivo<sup>2</sup>. De acuerdo con esto, en las centrales de mieles además de la producción de panela se puede pensar en elaborar mieles invertidas o jarabes de caña a partir de las mieles vírgenes de caña panelera que reciben como producto alternativo a la producción de panela, generando una opción de diversificación de productos para el sector panelero.

Con base en esta perspectiva, el presente trabajo planteó como objetivo general la evaluación del proceso de obtención de jarabes a partir de mieles de caña panelera, para lo cual fue necesario: establecer las condiciones de reacción para la obtención de jarabes mediante hidrólisis de mieles de caña panelera, desarrollar la ingeniería del reactor para la obtención de jarabes, y finalmente desarrollar una propuesta conceptual para la incorporación de la obtención de jarabes como alternativa en unidades procesadoras de caña de panelera.

---

<sup>1</sup> Datos suministrados por Carlos Guerrero, director comercial de Comerpanela.

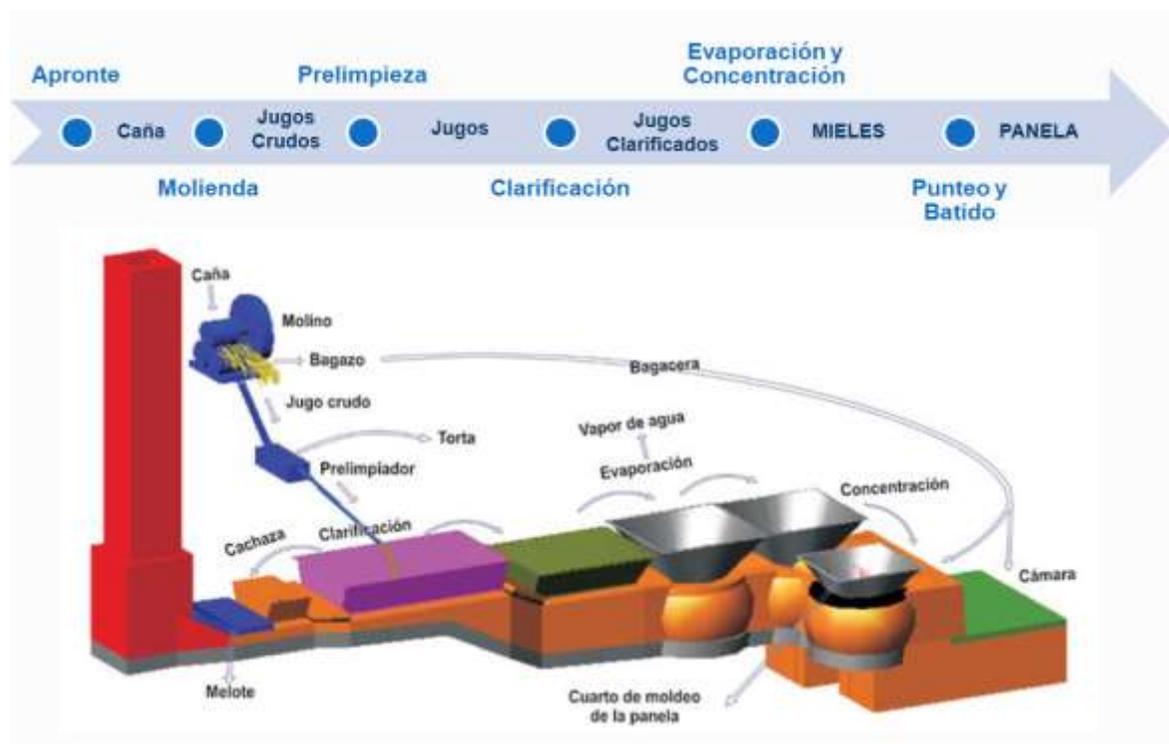
<sup>2</sup> Información tomada de [www.fedepanela.org.co](http://www.fedepanela.org.co)



# 1.Revisión Bibliográfica

## 1.1. Proceso de elaboración de la panela

El proceso de elaboración de la panela consiste básicamente en extraer los jugos por compresión de la caña, prelimpiarlos, clarificarlos y concentrarlos desde 18-20 °Brix hasta 93-96 °Brix, según la presentación final de la panela. En la Figura 1-1 se muestra una representación isométrica del proceso de elaboración de panela, en la que se ilustra gráficamente las operaciones y equipos empleados en el proceso.



**Figura 1-1.** Ilustración del proceso de elaboración de la panela

Fuente: Tomado de García *et al.*, 2007

Una vez los jugos se encuentran limpios de bagacillo y tierra se clarifican mediante la acción combinada del calor, desde 75 hasta 94 °C, y adición de sustancias mucilaginosas que promueven la formación de una nata llamada cachaza, la cual se retira de manera manual con el fin de garantizar una mayor limpieza de los jugos. Los jugos clarificados se concentran por evaporación del agua, manteniendo un pH alrededor de 5,8 para inhibir la inversión de la sacarosa, para lo cual se utiliza un corrector de pH, que usualmente es cal. La temperatura de ebullición de los jugos es de 96-97 °C y cuando alcanzan un contenido de sólidos solubles totales entre 65 y 75 °Brix, adquieren el nombre de mieles y a partir de allí se inicia la concentración hasta obtener la panela. El punto de panela se da cuando las mieles alcanzan una temperatura de ebullición entre 120-125 °C, y un contenido de sólidos solubles totales entre 92 y 96 °Brix, según la presentación final de la panela.

En la producción de panela se trabaja alrededor del punto isoeléctrico del jugo para asegurar el equilibrio de los azúcares (sacarosa y reductores), pues a pH mayores de 7 existe una menor inversión de la sacarosa (Honig, 1982 citado por Prada Forero *et al.*, 2014).

## 1.2. Mieles de caña de azúcar

A partir de la caña de azúcar se pueden obtener dos tipos de mieles, la primera, es un subproducto del proceso de elaboración del azúcar conocido como miel de purga o melaza. La segunda, es un producto intermedio en la producción de panela llamada miel de trapiche o miel virgen.

La Miel de Purga o Melaza es el licor madre resultante de la cristalización final del azúcar del cual no puede extraerse más sacarosa por métodos convencionales. En el proceso de extracción de sacarosa se produce transformaciones sobre los componentes naturales presentes en el jugo de caña, elevando el número de constituyentes de la miel a más de 200 sustancias, entre estos el furfural y otros compuestos de intensa coloración

y efecto tóxico. Esta miel es muy utilizada en la alimentación animal, pero principalmente se usa como materia prima para la obtención de alcohol (Bello y García, 2005).

La Miel de Trapiche o Miel Virgen es el producto que resulta de la concentración del jugo clarificado de la caña de azúcar durante el proceso de elaboración de panela. Esta miel al igual que las mieles de purga puede ser utilizada para la producción de bebidas destiladas, sin embargo, este mercado es dominado por los ingenios azucareros (Bello y García, 2005).

La miel de trapiche es un líquido denso y viscoso de color marrón (Figura 1-2) y aroma agradable, con un contenido de sólidos solubles variable entre 65 y 75 °Brix. Tiene un bajo contenido de proteína y alto de carbohidratos (Tabla 1-1), la mayor parte estos carbohidratos corresponden a sacarosa (80 a 90%). Debido a la alta concentración de azúcares, durante el tiempo de almacenamiento la miel de trapiche tiende a separarse en dos fases (Figura 1-2), una constituida básicamente por sacarosa cristalizada y otra sobrenadante y rica en azúcares reductores, sin embargo si las mieles presentan un alto contenido de humedad estas presentan la tendencia a fermentarse y por lo tanto a invertir la sacarosa (García *et al.*, 2007), esto debido a que las levaduras causantes de la fermentación producen hidrolasas que hidrolizan la sacarosa liberando fructosa y glucosa. Con el fin de estabilizar las mieles de trapiche muchas veces se realiza una inversión de las mieles.



**Figura 1-2.** Miel de Trapiche. Estable (Izquierda). Desestabilizada, con presencia de dos fases (Derecha)

**Tabla 1-1.** Composición química y nutricional de la miel de trapiche

COMPONENTE	CONTENIDO
Agua (g/100g)	25,0
Carbohidratos (g/100g)	76,6
Proteína (g/100g)	0,7
Grasa (g/100g)	0,2
Fibra (g/100g)	0,5
Ceniza (g/100g)	1,0
Calcio (mg/100g)	70
Fósforo (mg/100g)	40
Hierro (mg/100g)	1,5
Tiamina (mg/100g)	0,03

Fuente: Programa de Procesos Agroindustriales, Corpoica, sede Cimpa. 2006 citado en García *et al.*, 2007

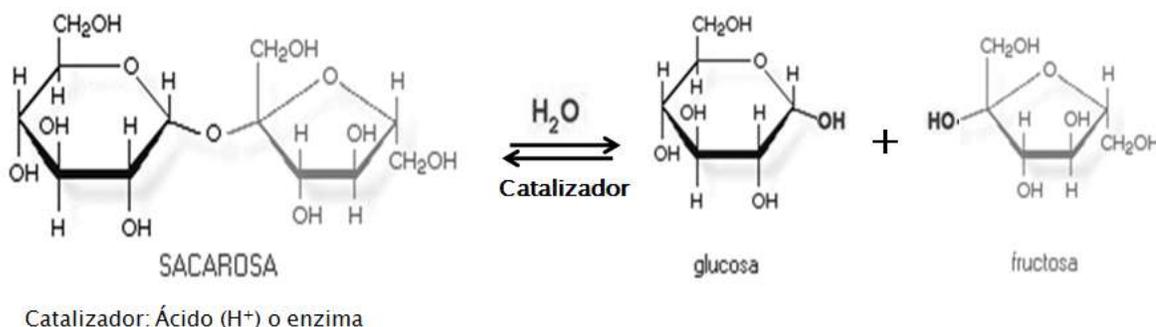
Se denomina miel invertida al producto de la hidrólisis de la sacarosa, la cual libera fructosa y glucosa. La miel invertida recibe su nombre en virtud de la inversión del sentido de la rotación óptica de la sacarosa. La inversión reduce o evita la cristalización de la sacarosa, estabilizando la miel, dada la elevada solubilidad de la fructosa y la baja capacidad de cristalización de la glucosa, baja actividad de agua y pH bajo la hacen poco susceptible al ataque y desarrollo de microorganismos. Además la miel invertida es más dulce, presenta mejor sabor y apariencia, menor viscosidad y mayor capacidad de retención de humedad (Duran, 2010). Esta miel facilita el proceso de asimilación de azúcares por parte del organismo (García *et al.*, 2007) debido al grupo libre reductor que posee la glucosa, el cual se puede unir al sodio y mediante el transporte activo propio de la bomba sodio/potasio ser absorbido por la célula en contra del gradiente; el caso de la fructosa es un poco diferente pues es un transporte mediante difusión facilitada, mientras que el de la sacarosa es un poco más complejo.

La miel invertida por ser básicamente un azúcar invertido, puede ser utilizada al igual que éste en industrias de alimentos en productos como galletas, pasteles, productos de

confitería, en jaleas, conservas de frutas y en helados; también puede usarse en las industrias farmacéuticas.

### 1.3. Hidrólisis de sacarosa

La hidrólisis o rompimiento de la molécula de sacarosa (disacárido) en dos moléculas de cadena más corta: glucosa (dextrosa) y fructosa (levulosa) se conoce como hidrólisis o inversión de la sacarosa (Figura 1-3). La hidrólisis de sacarosa es una reacción que toma lugar entre una molécula de agua y una molécula de azúcar en presencia de un catalizador o agente de hidrólisis (Combes y Monsan, 1981).



**Figura 1-3.** Reacción de hidrólisis \*de la sacarosa

Fuente: Tomado de Aguiar *et al.*, 2014

La magnitud de la hidrólisis o inversión de la sacarosa depende de la naturaleza del catalizador o agente de hidrólisis utilizado que puede ser una enzima o un ácido, la temperatura de reacción, el tiempo de contacto con la sacarosa y el pH. La hidrólisis de la sacarosa se incrementa al aumentar la acidez, la temperatura y el tiempo de retención (Herrera, 2011). La sacarosa es bastante estable en medio neutro, y puede soportar ciertos límites de temperatura sin alteraciones apreciables.

Los métodos empleados en la hidrólisis de sacarosa son: hidrólisis ácida e hidrólisis enzimática.

### 1.3.1. Hidrólisis ácida

En la hidrólisis ácida se utilizan agentes químicos como los ácidos debido a su alto poder de inversión. Hasta el momento es el método más empleado para efectuar la hidrólisis de la sacarosa. Es sencillo pues los ácidos no exigen unas condiciones estrictas de operación, trabajan a diferentes temperaturas, pero su efecto es mayor si se combinan altas temperaturas y tiempos de residencia prolongados. Los ácidos generalmente usados en este proceso y su poder de inversión se muestran en la Tabla 1-2 (Bello y García, 2005).

**Tabla 1-2.** Poder inversor de ácidos inorgánicos y orgánicos

ÁCIDO	PODER DE INVERSIÓN (%)
Bromhídrico	100,00
Clorhídrico	100,00
Nítrico	100,00
Metanosulfónico	100,00
Sulfúrico	53,60
Oxálico	18,57
Fosfórico	6,21
Cítrico	1,72
Fórmico	1,53
Málico	1,27
Láctico	1,07
Acético	0,40

Fuente: Kirk y Thmer, 1961 citado en Bello y García, 2005

Algunos agentes de hidrólisis química muy conocidos y altamente efectivos por su alto poder de inversión son los ácidos clorhídrico, nítrico o bromhídrico que, con el uso de pequeñísimas cantidades, hidrolizan la totalidad de la sacarosa, sin embargo, por seguridad industrial y salud ocupacional, no resultan recomendables para su uso en alimentos. Es por esto que para alimentos se prefiere el uso de orgánicos como el cítrico y otros de síntesis como el fosfórico, ambos de grado alimenticio (Duran, 2010).

La hidrólisis ácida de sacarosa es el método en el que se basa la producción de jarabes de azúcar invertido, sin embargo, este método puede producir caramelización, “*off flavored*” y colores en el azúcar invertido (Catana *et al.*, 2005).

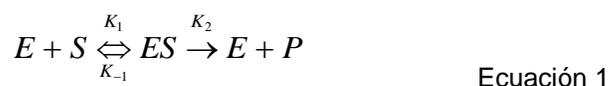
### 1.3.2. Hidrólisis enzimática

La hidrólisis enzimática se emplea frecuentemente para azúcares que contienen gran cantidad de cenizas, pues se necesitaría mucho ácido para vencer el efecto amortiguador de esas sales. Esta inversión se efectúa mediante la acción de las hidrolasas invertasa o invertina, las cuales generalmente son preparados comerciales que se obtienen de levaduras, generalmente a partir de una cepa de *Saccharomyces cerevisiae*.

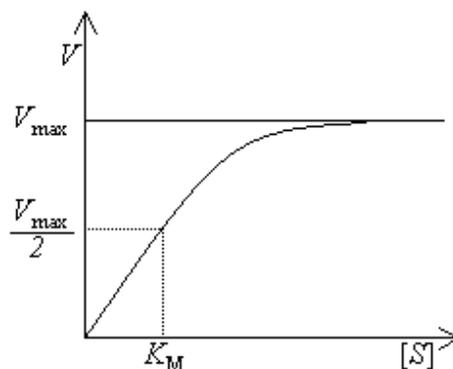
La concentración de enzima necesaria para llevar a cabo la hidrólisis, depende del tiempo disponible para la reacción, del pH, de la temperatura de reacción, concentración de sustrato, concentración de enzima y del grado de conversión deseado. Así pues, los cambios en uno de estos parámetros suelen afectar la respuesta enzimática a los demás factores. Las reacciones enzimáticas suelen llevarse a cabo con valores de pH entre 4,0 a 5,5 y temperaturas entre 30 y 60 °C, pues por encima de esta temperatura la enzima se descompone y pierde su poder de inversión (Duran, 2010). Otro factor a considerar es el contenido de humedad el cual debe estar entre un 50-95 % para que la reacción resulte eficaz.

La hidrólisis enzimática de la sacarosa proporciona una herramienta adecuada para superar los problemas de caramelización, y producción de “*off flavoreds*” y colores en el azúcar invertido, ya que el proceso se realiza en condiciones moderadas de pH (4-5) y temperatura (35-50 °C) en comparación con las utilizadas en la hidrólisis ácida pH de 2 y 75 °C (Catana *et al.*, 2005). En la hidrólisis enzimática de la sacarosa con invertasa se evita la producción de compuestos coloreados generados por la oxidación y no requieren de tratamientos de decoloración (Combes y Monsan, 1983), también se evita la formación de sabores indeseables resultado de la hidrólisis ácida (Kotwal y Shankar, 2009).

En cuanto a la cinética de reacción de la hidrólisis enzimática uno de los modelos más estudiados es el propuesto por Michaelis y Menten (Ecuación 1), en el que se establece que cuando se une el sustrato ( $S$ ) en el sitio activo de una enzima ( $E$ ), se forma un complejo intermediario ( $ES$ ), luego en el estado de transición el sustrato se convierte en producto y tras un breve lapso de tiempo, el producto se disocia de la enzima (McKee y McKee, 2009)



En el modelo de Michaelis-Menten se asume que  $k_{-1}$  es despreciable en comparación con  $k_1$  y que la velocidad de formación de  $ES$  es igual a la velocidad de su degradación durante la mayor parte de la reacción. Si se mantiene la concentración de la enzima constante y se varía la concentración de sustrato se obtiene una curva hiperbólica como la de la Figura 1-4.



**Figura 1-4.** Diagrama de velocidad de reacción y constante de Michaelis-Menten

La actividad de las enzimas puede inhibirse, por moléculas que reducen la actividad enzimática, denominadas inhibidores. Existen dos tipos principales de inhibición: reversible e irreversible. La inhibición reversible ocurre cuando el efecto inhibitorio de un compuesto puede contrarrestarse incrementando la concentración del sustrato o retirando el compuesto inhibidor mientras la enzima permanece intacta. De otro lado la

inhibición irreversible ocurre cuando la unión al inhibidor altera de manera permanente la enzima, por lo común a través de una reacción covalente que la modifica de forma permanente (Nelson y Cox, 2008; McKee y McKee, 2009).

La inhibición reversible a su vez se clasifica en competitiva, no competitiva y acompetitiva. En la inhibición competitiva el inhibidor se une a la enzima libre y compite con el sustrato por la ocupación del sitio activo, lo que significa que la enzima en presencia del inhibidor perdería afinidad por el sustrato. Los inhibidores competitivos suelen tener una estructura semejante a la del sustrato (Nelson y Cox, 2008; McKee y McKee, 2009).

Si el inhibidor se une tanto a la enzima libre como al complejo *ES* se habla de inhibición no competitiva. En este tipo de inhibición, el inhibidor se une en un lugar diferente del sitio activo, ocasionando la modificación de la conformación de la enzima, lo que impide la formación del producto. Al no unirse el inhibidor al sitio activo, no se afecta la afinidad de la enzima por el sustrato. Los inhibidores no competitivos tienen escaso o nulo parecido con el sustrato (Nelson y Cox, 2008; McKee y McKee, 2009).

Finalmente se habla de inhibición acompetitiva, si el inhibidor se une sólo al complejo *ES*. Cuando el inhibidor se une al *ES*, el sustrato no está libre para disociarse de la enzima, lo que da el aspecto de mayor afinidad por el sustrato. En este tipo de inhibición el inhibidor es ineficaz a bajas concentraciones de sustrato porque hay muy poco complejo *ES* presente, mientras que a altas concentraciones de *S* el inhibidor es más eficaz. La inhibición acompetitiva se observa más a menudo en el caso de enzimas que se unen a más de un sustrato (Nelson y Cox, 2008; McKee y McKee, 2009).

En la hidrólisis enzimática de la sacarosa algunas de las enzimas que más han sido estudiadas son las invertasas y las inulinasas; aunque también se han estudiado las enzimas amilolíticas las cuales son empleadas principalmente en la hidrólisis de almidón.

Las invertasas son unas de las más simples carbohidrasas comerciales y catalizan la hidrólisis de la sacarosa y glucósidos relacionados. A pesar de que está muy extendida su distribución, las enzimas comerciales de interés se originan a partir de cepas de

*Saccharomyces sp.* Una de las aplicaciones más importantes de las invertasas se encuentra en la producción de jarabes de sacarosa. Las invertasas también se utilizan para la producción de bebidas alcohólicas, ácido láctico, glicerol, etc. (Kotwal y Shankar, 2009).

Las inulinasas son fructanohidrolasas que hidrolizan la sacarosa, pero, además también son capaces de hidrolizar inulina, un polímero de la fructosa que se encuentra en algunos tubérculos y raíces. Las inulinasas son termoestables, por lo general disponibles comercialmente para aplicaciones industriales y son producidas por muchos microorganismos, incluyendo bacterias, levaduras, y hongos como *Aspergillus* que ha sido reportado como uno de los más utilizados para la producción de inulinasas (Ettalibi y Baratti, 2001)

## 1.4. Hidrólisis de jugos y mieles de caña de azúcar

La sacarosa se sintetiza en la caña de abajo hacia arriba y su contenido aumenta con el tiempo hasta alcanzar su óptimo de madurez. Una vez la caña madura, se inicia la inversión de la sacarosa a glucosa y fructosa debido a las enzimas presentes en la planta misma y se acelera después del corte por efectos de temperatura y pH (García *et al.*, 2007). Varios autores han estudiado el mecanismo de almacenamiento de la sacarosa en la caña y su interacción con las enzimas presentes en la misma, Hussain *et al.* (2009) estudiaron la cinética y propiedades termodinámicas de la invertasa ácida soluble proveniente de la caña de azúcar.

La caña presenta un alto contenido de azúcares reductores, cuando es demasiado joven, cuando es sobre madura o transcurren varios días de haber sido cortada, en este último caso se debe tener cuidado que no haya fermentación o avinagramiento, ni que se encuentre seca con el fin de garantizar la calidad del producto final (Duran, 2010).

En el proceso de elaboración de la panela, la hidrólisis de la sacarosa se inicia el durante la clarificación, ya que en esta etapa hay un aumento de la acidez, la temperatura y el tiempo de retención. La inversión de la sacarosa aumenta a medida que la temperatura y

el tiempo de contacto se incrementan. Las altas temperaturas en jugos, superiores a 120 °C, producirán un aumento en la destrucción de azúcares reductores, afectando la calidad de la miel virgen de caña (Herrera, 2011). En cuanto al pH, la hidrólisis química de la sacarosa se cataliza a pH menores de 5 debido a que los ácidos orgánicos de cadena corta presentes en el jugo de caña favorecen las reacciones de caramelización y de Maillard, las cuales a su vez incrementan la concentración de iones hidronio, creando así un círculo autocatalítico, favorecido por la temperatura (García, 2007 citado por Prada Forero *et al.*, 2014).

En el proceso de elaboración de azúcar, para evitar la hidrólisis de la sacarosa se trabaja con pH cercanos a 7, sin embargo, si se realiza una adición excesiva de cal (pH mayor a 8) a los jugos de caña, además de un oscurecimiento de los jugos ocurre la destrucción de azúcares reductores, ya que el exceso de cal descompone la glucosa presente en el jugo, formando ácidos orgánicos que destruirán la sacarosa y en consecuencia habrá un desdoblamiento de esta para alcanzar de nuevo su equilibrio con la fructosa y glucosa (Herrera, 2011). Es importante mencionar que, durante la evaporación y concentración de los jugos de caña, la composición de todos los azúcares varía dependiendo del pH del jugo y de la temperatura de operación (Larrahondo, 1995 citado por Prada-Forero *et al.*, 2015b).

En general, mieles hidrolizadas o invertidas con un porcentaje promedio de sólidos solubles de 77 °Brix y pH superior a 3,0 no presentan indicios de cristalización en los cuatro meses siguientes a su inversión y tampoco hay cambios de sabor ni de color, aunque cuando el agente de inversión es una enzima el color de la miel es más claro. Para una mayor estabilidad e las mieles invertidas se recomienda el uso de cañas con altos contenidos de azúcares reductores (Duran, 2010)

En Colombia, el Centro de Investigación para el Mejoramiento de la Agroindustria Panelera - CIMPA, ha realizado estudios relacionados con la hidrólisis de mieles y jugos de caña con el fin de obtener mieles invertidas de buena calidad. En un primer estudio, Beltrán y Pacheco (1994) realizaron la inversión por vía enzimática y ácida. Las enzimas utilizadas fueron invertasa e invertina y los ácidos usados fueron el cítrico y el fosfórico. La inversión por vía enzimática se llevó a cabo en mieles a temperatura ambiente y a 55

°C, esta última con tiempos de residencia de 3, 6 y 9 horas. Mientras que la inversión por vía ácida se efectuó directamente en los jugos, y se tomaron como tiempos de residencia 80, 90 y 120 minutos. En este estudio se concluyó que el mayor grado de inversión se obtuvo empleando invertasa y ácido fosfórico.

En un segundo estudio se obtuvieron mieles invertidas a partir de jugo de caña crudo y clarificado, evaluando la efectividad de la enzima invertasa 488 a diferentes concentraciones, tiempo y temperaturas. Según los resultados obtenidos las condiciones óptimas de aplicación de la enzima sobre el jugo crudo fueron: pH de 4,5 al inicio del proceso, tiempo de reacción de 4 horas y temperatura de 55 °C; bajo estos parámetros se obtuvieron mieles invertidas con un porcentaje de azúcares reductores de 75% y una concentración de sólidos solubles de 78 °Brix (Bello y García, 2005).

Por otra parte, el Cimpa ha establecido protocolos para realizar la obtención de mieles de caña invertidas por vía ácida y enzimática a partir de jugos y mieles. A partir de jugos crudos, el protocolo del Cimpa establece que se agreguen entre 0,6 y 0,7 ml de ácido fosfórico o 0,75 a 1 g de ácido cítrico por litro de jugo, posteriormente se clarifiquen y se de el punto de miel hasta obtener entre 70 y 75 °Brix. Si se emplea enzima, al jugo crudo se le adiciona una solución de ácido cítrico al 10% hasta obtener un pH entre 4,5 y 4,8, se calienta el jugo hasta 55 °C y se le adiciona invertasa entre 0,3 y 0,6 g / litro de jugo, se debe mantener la temperatura por 3 horas al cabo de las cuales los jugos se clarifican y se les da punto de miel hasta obtener entre 70 y 75 °Brix. Si la miel invertida se obtiene a partir de mieles virgenes el protocolo del Cimpa establece que al jugo crudo se le agrega ácido cítrico al 10% hasta obtener un pH entre 4,5 y 4,8, posteriormente los jugos se clarifican y se calientan hasta obtener mieles entre 60 y 55 °Brix (miel delgada), luego se dejan enfriar las mieles hasta 55 °C y se adicionan 1,8 g de invertasa por litro de miel, manteniendo la temperatura por 6 horas, al cabo de las cuales se concentran hasta obtener entre 70 y 75 °Brix.

A nivel mundial se ha reportado hidrólisis a partir de mieles de purga o melaza y de los jugos de caña o guarapo. En Malasia, en el estudio realizado por Najafpour y Shan (2003) se emplearon enzimas amilolíticas para realizar la hidrólisis de mieles de purga, con el fin producir alcohol carburante. En este estudio las mieles de purga tenían un

contenido de azúcares (sacarosa, glucosa, fructosa) entre el 45 y 50%, de polisacáridos (pentosanas, dextrinas) entre el 2 y 5% y de agua entre el 17%-25%. La hidrólisis se realizó con glucoamilasa con una concentración entre 500 y 1000 mg/L, a 67 °C. La constante de cinética de reacción ( $K_m$ ) fue de 100 mmol/L (18 g/L) y la velocidad máxima de reacción ( $V_{max}$ ) fue de 5 mmol/L.min (0,9 g/L.min).

En México, Hernández *et al.* (2003) estudiaron la separación de la fructosa presente en melaza de 72,5 °Brix con una composición de 31,9% de sacarosa, 7,9% de fructosa y 6,2% de glucosa, la cual fue hidrolizada con invertasa obteniéndose una composición de 0,48% de sacarosa, 23,69% de fructosa y 21,93% de glucosa. Posteriormente se realizó la separación de la fructosa mediante precipitación con hidróxido de calcio, seguido de la separación del complejo obtenido y la resolubilización de la fructosa con ácido fosfórico.

Por otra parte, Amaya *et al.* (2003) realizaron la hidrólisis de jugos de caña con 15% de sacarosa empleando invertasa libre e inmovilizada en microesferas de nylon, obteniendo un buen desempeño entre 55 y 65 °C, con un pH óptimo de 5,5, los parámetros cinéticos establecidos para la invertasa libre fueron:  $V_{max}$  de 1059 mmol min<sup>-1</sup> mg<sup>-1</sup> y  $K_m$  de 24,5 mM, mientras que para la invertasa inmovilizada encontraron un  $V_{max}$  de 2244 mmol min<sup>-1</sup> mg<sup>-1</sup> y  $K_m$  de 29,3 mM.

## 1.5. Jarabes

Los jarabes son soluciones acuosas con alta concentración de carbohidratos, los más conocidos son los jarabes de alta fructosa (HFS) los cuales se obtienen principalmente a partir de materias primas amiláceas. Otro tipo de jarabes son los jarabes invertidos, los cuales se obtienen mediante hidrólisis de sacarosa a partir de materias primas ricas en este azúcar.

En la hidrólisis de la sacarosa se obtiene una mezcla equimolar de glucosa y de fructosa (jarabe invertido) la cual es más dulce que la sacarosa, dado el alto poder edulcorante de la fructosa, debido al equilibrio que se establece durante la hidrólisis, el contenido de

sacarosa puede ser aumentado considerablemente sin que se cristalice (Kotwal y Shankar, 2009).

A diferencia de los jarabes invertidos, los jarabes de alta fructosa no son una mezcla equimolar y están compuestos de glucosa, fructosa y en menor cantidad de oligosacáridos, los jarabes típicos contienen entre 42% y 55% fructosa (Borges da Silva *et al.*, 2006). La forma antigua de obtener estos jarabes es por hidrólisis ácida, la cual ha sido prácticamente desplazada en los últimos años por la hidrólisis enzimática que permite obtener jarabe a un costo muy competitivo (Montes y Magaña, 2002) además el procesamiento enzimático produce un producto de mayor calidad (Tester *et al.*, 2006).

La industria de los jarabes de fructosa 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 (Salcedo *et al.*, 2009). Los HFS son una alternativa al uso sacarosa, ya que su poder edulcorante es comparable a esta, 0,9-0,99 (Rubio-Huacuz *et al.*, 2011), y se usan ampliamente como endulzante de bebidas refrescantes, conservas de frutas, postres, mermeladas, productos lácteos, etc., como sustituto del azúcar de caña contribuyendo a realzar el sabor, mejorar el color y sabor, disminuir el punto de congelación, y dar estabilidad osmótica (Borges da Silva *et al.*, 2006). Aunque hay estudios que confirman que excesos en el consumo HFS pueden provocar síndrome metabólico por lo que deberá usarse en forma controlada, especialmente por personas que padecen de diabetes mellitus y no pueden metabolizar la glucosa (Elliot *et al.*, 2002; Sánchez-Lozada *et al.*, 2007 citado por Solís-Fuentes *et al.*, 2010),

En un proceso típico para la producción de los jarabes de alta fructosa se usan  $\alpha$ -amilasas para licuar el almidón y posteriormente se usan glucoamilasas para la sacarificación del almidón hidrolizado hasta un contenido de 94% de dextrosa. El producto resultante se trata por isomerización enzimática con glucosa-isomerasa, lo cual produce una mezcla de glucosa y fructosa (Borges da Silva *et al.*, 2006, y Aiyer, 2005).

La hidrólisis para producir jarabe de glucosa (ED<sup>3</sup> 96-97) se realiza a una temperatura moderada (55-60 °C) y un pH de 4,5, lo que requiere el intercambio de calor y la mezcla para ajustar el pH. La conversión se realiza en grandes tanques agitados con tiempos de permanencia largos (24-72 h). Los rendimientos de los jarabes de glucosa están en el rango de 96-97%, los subproductos son 2-3% de disacáridos (maltosa y la isomaltosa) y 1-2% de oligosacáridos (Buchholz y Seibel, 2008).

A pesar de que el 85% de la producción de los HFS se obtiene a partir de maíz, el aumento de la demanda de alimentos ha obligado a la búsqueda de sustratos alternativos para la producción de HFS, buscando hacer el proceso más simplificado y económico mediante el empleo de materias primas más baratas y accesibles, por ejemplo, raíces u otros materiales amiláceos (Johnson *et al.*, 2009). En cuanto al proceso de hidrólisis enzimática del almidón, la perspectiva futura es acortar las etapas del proceso, que actualmente se realiza en dos etapas (licuefacción y sacarificación) a una sola etapa. Para cada una de las etapas de hidrólisis del almidón se emplean dos enzimas amilolíticas diferentes, provenientes de microorganismos distintos, por lo se busca evaluar el uso de un solo microorganismo que sea capaz de producir las dos enzimas amilolíticas, el empleo conjunto de dos microorganismos con sus respectivas enzimas, o el uso de una sola enzima que tenga capacidad de romper todo tipo de enlace de las moléculas de almidón como lo hace la glucoamilasa (Sánchez *et al.*, 2005)

En México, se estudiaron las condiciones básicas para la elaboración de jarabes fructosados a partir de guarapo o jugo de caña de primera extracción que se obtiene en los ingenios azucareros (Solís-Fuentes *et al.*, 2010) y purificado mediante adsorción con carbón activado y posterior ultrafiltración en membrana polimérica. Se realizó hidrólisis enzimática empleando invertasa de *S. cerevisiae* y posterior concentración mediante liofilización hasta niveles de sólidos solubles propios de la consistencia de los jarabes. El jarabe obtenido tuvo 75,3% de sólidos secos, un contenido de 36,2% de sacarosa; 30,2% de glucosa y 30,2% de fructosa, y un valor de pH de 3,9.

---

<sup>3</sup> ED: Equivalente de Dextrosa, unidad en que se mide la conversión del almidón en D-glucosa (Dextrosa)

Por otra parte, Amaya-Delgado *et al.* (2006) realizaron el estudio de la cinética de hidrólisis de azúcar empleando invertasa proveniente *Saccharomyces cerevisiae* inmovilizada en microesferas de nylon. El sistema mostró una buena productividad a una concentración de 2,0 M de azúcar, 60 °C y un pH de 5, con factores de conversión entre 0,95 y 0,97, y  $V_{max}$  de 1,37 y 1,06  $\text{mmol min}^{-1} \text{mg}^{-1}$  para invertasa inmovilizada e invertasa libre, respectivamente y una  $K_m$  entre 0,029 y 0,71 M para invertasa inmovilizada, y entre 0,024 y 0,69 para invertasa libre. Se concluyó que esta es una técnica sencilla que puede ser una opción para la hidrólisis de la sacarosa en continuo en un reactor de lecho fijo para la obtención de jarabes ricos en fructosa.

En Brasil, Tomotani y Vitolo (2007) evaluaron la producción de HFS de un 70% empleando invertasa inmovilizada en un proceso continuo en un reactor de membrana obteniéndose un rendimiento de 100% (0,88  $\text{mmol} / \text{h} \cdot \text{mg}_{\text{Enzima}}$ ) y de 99% (1,02  $\text{mmol} / \text{h} \cdot \text{mg}_{\text{Enzima}}$ ).

Además, también en Brasil se estudió la aplicación de espuma adhesiva de poliuretano rígido en un bioreactor enzimático, lo cual mostró una buena producción de jarabe de azúcar invertido a partir de jugo de caña de azúcar utilizando una velocidad de flujo de 0,48 L / h, con una conversión promedio de  $10,64 \pm 1,5\% \text{ h}^{-1}$  (Cadena *et al.*, 2011).

## 2. Materiales y Métodos

Teniendo como referencia los requerimientos de las centrales de mieles para la recepción de mieles de caña: Sólidos Solubles Totales (SST) entre 65 - 75 °Brix y pH entre 4,8 y 5,8<sup>4</sup>, en las instalaciones de Corpoica sede CIMPA ubicada en el municipio de Barbosa, Santander, se elaboraron mieles de caña a partir de las variedades RD-7511 y CC-93-7711. Estas mieles fueron elaboradas sin adición de cal y llevadas hasta una concentración de  $66,89 \pm 0,26$  °Brix. Una vez obtenidas las mieles se dejaron enfriar a temperatura ambiente a las condiciones de Barbosa, Santander ( $28 \pm 2,5$  °C) antes de la realización de los ensayos de hidrólisis.

### 2.1. Hidrólisis de mieles de caña

Las pruebas de hidrólisis se llevaron a cabo utilizando un diseño factorial incompleto con dos métodos de hidrólisis (ácida y enzimática) y un control, dos temperaturas ( $60,2 \pm 3,5$  y ambiente de  $28 \pm 2,5$  °C), con y sin agitación y tres repeticiones. Para cada ensayo se emplearon 0,5 litros de mieles como unidad experimental. En la Figura 2-1 se presenta el diagrama del diseño experimental empleado.

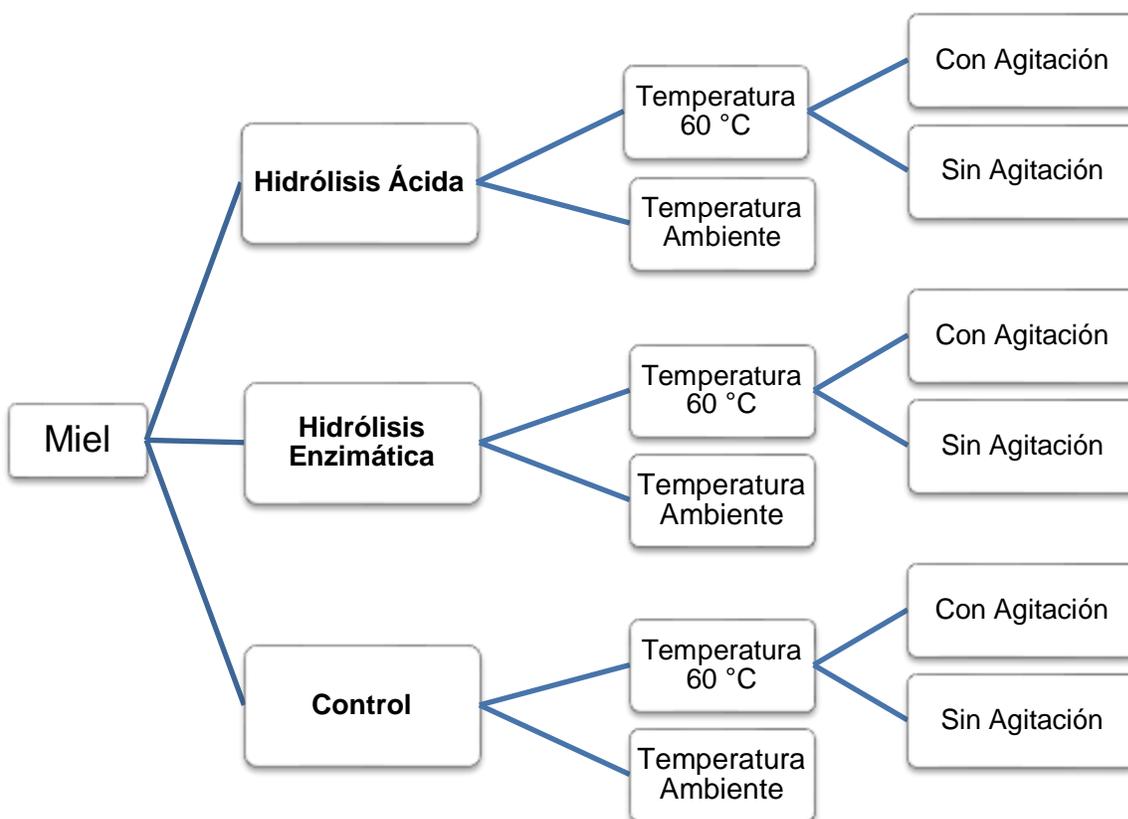
Para los ensayos de hidrólisis ácida y enzimática se ajustó el pH con ácido cítrico en una concentración de  $1,092 \pm 0,005$  g por litro de miel, alcanzando un pH de  $4,61 \pm 0,05$ . Se escogió trabajar con ácido cítrico ya que es un ácido grado alimenticio.

---

<sup>4</sup> Información suministrada por Ángela Martínez de Fedepanela

En la hidrólisis enzimática se empleó una invertasa comercial de Proenzimas, Inverzime 488, usando una concentración de  $1,093 \pm 0,005$  g por litro de miel.

Cada muestra fue colocada en recipientes metálicos abiertos y mantenidas a la temperatura de reacción establecida para los ensayos. Para las muestras con agitación se empleó un agitador de pala a 42,5 rpm, agitando las mieles durante cinco minutos cada media hora.



**Figura 2-1.** Diseño experimental utilizado

El tiempo de reacción para los ensayos a temperatura de 60 °C fue de 3 horas y para la temperatura ambiente el tiempo fue de 6 horas. El seguimiento se realizó midiendo la concentración de sacarosa en el tiempo cero, y cada hora para los ensayos de tres horas, y cada 2 horas para los ensayos de seis horas. También se realizó la

determinación de azúcares reductores en el tiempo cero y al finalizar la reacción con el fin de determinar el grado de hidrólisis.

El pH se determinó por principio potenciométrico según el método de la Norma de la Comisión Internacional para la Unificación de Métodos de Análisis del Azúcar (ICUMSA) GS 1/2/3-1 de 1994, con un potenciómetro marca Scott (Figura 2-2).



**Figura 2-2.** Potenciómetro marca Scott

Los sólidos solubles totales (SST), expresados como °Brix, de las mieles se establecieron por el principio refractrométrico según el método de la Organización Internacional de Normalización (ISO) 1741 de 1980 mediante un refractómetro marca Anton Paar Abbemat 300 (Figura 2-3).



**Figura 2-3.** Refractómetro marca Anton Para Abbemat 300

El contenido de sacarosa se determinó por el principio polarimétrico según el método ICUMSA GS 1/2/3-5 de 1994, usando un polarímetro ATAGO SAC i (Figura 2-4). La lectura del porcentaje en peso de sacarosa se realizó a  $\lambda=589$  nm



**Figura 2-4.** Polarímetro ATAGO SAC i para la determinación de sacarosa

El porcentaje en peso de los azúcares reductores se determinó por medio del método volumétrico de Lane y Eynon según Norma Técnica Colombiana NTC 1779 (Figura 2-5).



**Figura 2-5.** Montaje para la determinación de azúcares reductores por el método de Lane y Eynon

Los datos obtenidos se analizaron estadísticamente mediante Stata con una significancia de 95%.

## **2.2. Diseño del reactor**

A partir de los datos obtenidos en las pruebas de laboratorio se determinó el mejor método de hidrólisis y se determinaron las condiciones de operación del reactor a emplear en el proceso de hidrólisis de mieles de caña para la obtención de jarabes de caña considerando que el reactor se empleará en las centrales de mieles como una alternativa de diversificación de productos. El reactor dimensionó teniendo en cuenta las características de las mieles y criterios constructivos como la relación entre el diámetro y la altura del reactor.

## **2.3. Análisis del proceso**

Una vez realizado el diseño del reactor y teniendo en cuenta los resultados de los ensayos de hidrólisis de las mieles de caña se realizó un análisis técnico conceptual de la inclusión de la etapa de hidrólisis, basado en la descripción del proceso actual de elaboración de panela, los equipos requeridos y la elaboración de los diagramas de flujo de proceso.

### **2.3.1. Análisis financiero**

Además del análisis técnico conceptual, se realizó un análisis financiero con el fin de establecer la factibilidad financiera del proyecto propuesto, para lo cual se usaron dos índices de rentabilidad financiera como lo son el valor presente neto y la tasa interna de retorno (Dirección del Centro de Inversiones FAO, 2007). Para esto se calcularon los gastos anuales, las ventas anuales, el valor anual neto, el valor de salvamento, el valor presente neto y por último la tasa interna de retorno.



## 3. Resultados y Análisis

### 3.1. Hidrólisis de mieles de caña

Para evitar conclusiones erróneas sobre el comportamiento de la concentración de sacarosa o de los azúcares reductores debido al incremento de la concentración de las mieles, presentada principalmente en los ensayos de control e hidrólisis ácida, y a la posibilidad de registros erróneos de sacarosa, ocasionados por azúcares reductores que presentan rotación química, se calcularon las purezas de sacarosa o PurezaPol (Ecuación 2) y de reductores o GlucoBrix (Ecuación 3). Para estos cálculos se asumió que la lectura de los grados Brix (contenido de sólidos solubles, básicamente azúcares, expresados como sacarosa) eran igual al total de sólidos solubles contenidos en la miel, es decir, igual a todos los azúcares presentes en las mieles (Prada Forero *et al*, 2014; Prada-Forero *et al*, 2015a).

$$\text{Pureza de Sacarosa (PurezaPol \%)} = \frac{\text{Sacarosa (\%)}}{\text{Sólidos Solubles Totales (°Brix)}} \times 100 \quad \text{Ecuación 2}$$

$$\text{Pureza de Reductores (GlucoBrix \%)} = \frac{\text{Azúcares Reductores (\%)}}{\text{Sólidos Solubles Totales (°Brix)}} \times 100 \quad \text{Ecuación 3}$$

En la Tabla 3-1 se presentan los resultados promedio de la variación de la concentración de sacarosa expresada como PurezaPol, el análisis estadístico indicó que se presentaron diferencias significativas entre los métodos y tiempo de reacción, al realizar el análisis tanto del efecto de la temperatura como de la agitación. Al mirar el efecto de la agitación se encontraron diferencias significativas, más no fue así con el efecto de la temperatura. Los datos de la experimentación y del análisis estadístico se presentan en el Anexo A y Anexo B, respectivamente.

Tabla 3-1. Variación de la concentración de sacarosa expresada como PurezaPol

Tiempo (h)	Método de hidrólisis	PurezaPol (%)	Método de hidrólisis	PurezaPol (%)	Método de hidrólisis	PurezaPol (%)
0	Control 60-CA	91,08 ± 1,64	Ácido 60-CA	91,08 ± 1,64	Enzima 60-CA	91,08 ± 1,64
1	Control 60-CA	90,46 ± 1,93	Ácido 60-CA	89,79 ± 1,15	Enzima 60-CA	39,46 ± 4,69
2	Control 60-CA	89,93 ± 1,79	Ácido 60-CA	88,92 ± 0,82	Enzima 60-CA	33,58 ± 4,38
3	Control 60-CA	89,43 ± 2,09	Ácido 60-CA	88,23 ± 0,40	Enzima 60-CA	26,52 ± 3,42
0	Control 60-SA	91,08 ± 1,64	Ácido 60-SA	91,08 ± 1,64	Enzima 60-SA	91,08 ± 1,64
1	Control 60-SA	90,40 ± 1,16	Ácido 60-SA	90,39 ± 1,56	Enzima 60-SA	52,59 ± 4,66
2	Control 60-SA	90,13 ± 1,31	Ácido 60-SA	90,14 ± 1,75	Enzima 60-SA	48,12 ± 5,30
3	Control 60-SA	90,02 ± 1,29	Ácido 60-SA	89,41 ± 1,81	Enzima 60-SA	33,53 ± 2,77
0	Control AMB	91,08 ± 1,64	Ácido AMB	91,08 ± 1,64	Enzima AMB	91,08 ± 1,64
2	Control AMB	90,71 ± 1,54	Ácido AMB	90,69 ± 1,39	Enzima AMB	72,46 ± 6,70
4	Control AMB	90,49 ± 1,54	Ácido AMB	90,52 ± 1,43	Enzima AMB	46,60 ± 5,37
6	Control AMB	90,13 ± 1,76	Ácido AMB	90,20 ± 1,72	Enzima AMB	36,06 ± 2,53

AMB = Ambiente

60-CA = 60 °C con agitación

60-SA = 60 °C sin agitación

El grado de hidrólisis de la sacarosa se determinó a partir de concentración de azúcares reductores y la concentración inicial de sacarosa (Ecuación 4).

$$\text{Grado de Hidrólisis (\%)} = \frac{\text{Azúcares Reductores (\%)}}{\text{Sacarosa}_{\text{Inicial}} (\%)} \times 100 \quad \text{Ecuación 4}$$

En la Tabla 3-2 se presentan los resultados promedio del grado de hidrólisis, calculado al inicio y final de la reacción, observándose que el mayor grado de hidrólisis o conversión se presentó en la hidrólisis enzimática, ya que al final de la reacción el porcentaje de conversión fue mayor al 90% para todas las condiciones.

En los ensayos con ácido y para el control el grado de hidrólisis fue menor al 8%, observándose que los valores del grado de hidrólisis son comparables para estos dos métodos. Sin embargo, se encontró que a 60 °C, tanto para el control como para la hidrólisis ácida, la agitación favorece la conversión, ya que el grado de hidrólisis fue

mayor (6,23% y 7,85%) comparada con las muestras sin agitar (6,19% y 5,49%). El mayor grado de conversión puede deberse a que la agitación favorece la transferencia de calor, logrando así un incremento en la hidrólisis.

**Tabla 3-2.** Grado de hidrólisis

Tiempo (h)	Método de hidrólisis	Grado de hidrólisis (%)	Método de hidrólisis	Grado de hidrólisis (%)	Método de hidrólisis	Grado de hidrólisis (%)
0	Control 60-CA	4,68 ± 0,46	Ácido 60-CA	4,68 ± 0,46	Enzima 60-CA	4,68 ± 0,46
3	Control 60-CA	6,23 ± 0,08	Ácido 60-CA	7,85 ± 0,79	Enzima 60-CA	90,15 ± 6,17
0	Control 60-SA	4,68 ± 0,46	Ácido 60-SA	4,68 ± 0,46	Enzima 60-SA	4,68 ± 0,46
3	Control 60-SA	6,19 ± 0,11	Ácido 60-SA	5,49 ± 0,63	Enzima 60-SA	91,66 ± 5,81
0	Control AMB	4,68 ± 0,46	Ácido AMB	4,68 ± 0,46	Enzima AMB	4,68 ± 0,46
6	Control AMB	5,45 ± 0,65	Ácido AMB	5,89 ± 0,75	Enzima AMB	90,65 ± 2,60

AMB = Ambiente

60-CA = 60 °C con agitación

60-SA = 60 °C sin agitación

Dados los mayores grados de hidrólisis obtenidos en los ensayos con enzima, se decidió únicamente trabajar con la hidrólisis enzimática para realizar el diseño del reactor y el posterior análisis del proceso.

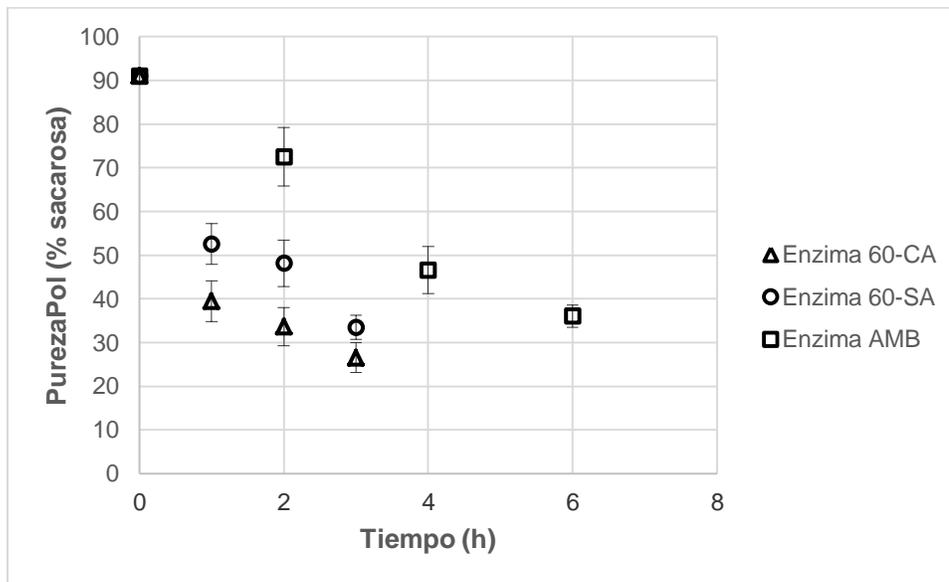
Al realizar el análisis estadístico tanto del efecto de la temperatura como de la agitación para la hidrólisis enzimática, se encontraron diferencias significativas debidas al efecto de la agitación, más no fue así con el efecto de la temperatura, pero si para la interacción temperatura y tiempo.

### 3.2. Diseño del reactor

En la Figura 3-1 se muestra la variación de la sacarosa en la hidrólisis enzimática expresada como PurezaPol en función del tiempo, en donde se observa que a medida que avanza la reacción se disminuye concentración de la sacarosa. Al comparar las condiciones de ensayo evaluadas se ve que la enzima a temperatura ambiente presenta una hidrólisis más lenta con respecto a los ensayos a 60 °C, pero al cabo de las 6 horas de reacción los valores de sacarosa son comparables a los obtenidos a 60 °C, ya que

con 3 horas de reacción y 60 °C se obtuvieron concentraciones de sacarosa de  $26,52 \pm 3,42\%$  con agitación y  $33,53 \pm 2,77\%$  sin agitación, mientras que a temperatura ambiente se logró una concentración de  $36,06 \pm 2,53\%$  de sacarosa, alcanzándose conversiones de mayores al 90% (Tabla 3-2), lo muestra que el efecto de la temperatura reduce el tiempo de reacción, lo cual se corrobora con los datos estadísticos, lo cuales muestran que existen diferencias significativas para la interacción temperatura-tiempo.

Al mirar el efecto de la agitación se aprecia que la agitación favorece la reacción de hidrólisis, puesto que se observa una mayor tasa para esta reacción. Los datos estadísticos indican que existen diferencias significativas del efecto de la agitación sobre la concentración de sacarosa.



**Figura 3-1.** Variación de la concentración de sacarosa durante la hidrólisis enzimática de mieles de caña

Asumiendo que la concentración de sacarosa expresada como PurezaPol durante la hidrólisis enzimática de mieles de caña tiene un comportamiento del tipo:

$$PurezaPol(\%) \cong K \left( \frac{1}{t} \right)$$

Y que la velocidad de reacción corresponde a:

$$V = \left[ \frac{d\text{PurezaPol}}{dt} \right]_i$$

La velocidad de reacción se calculó a partir de la derivada de la regresión polinómica de exponentes negativos que se ajustó a partir de los datos experimentales, esto con el fin que la curva de regresión fuera de pendiente negativa dentro del rango de los datos experimentales.

La regresión polinómica de la concentración de sacarosa en función del tiempo con base en los datos experimentales que se empleó fue:

$$\text{PurezaPol}(\%) = \frac{K_1}{K_2 + t}$$

Donde  $K_1$  y  $K_2$  son constantes que se determinaron a partir de los datos experimentales.

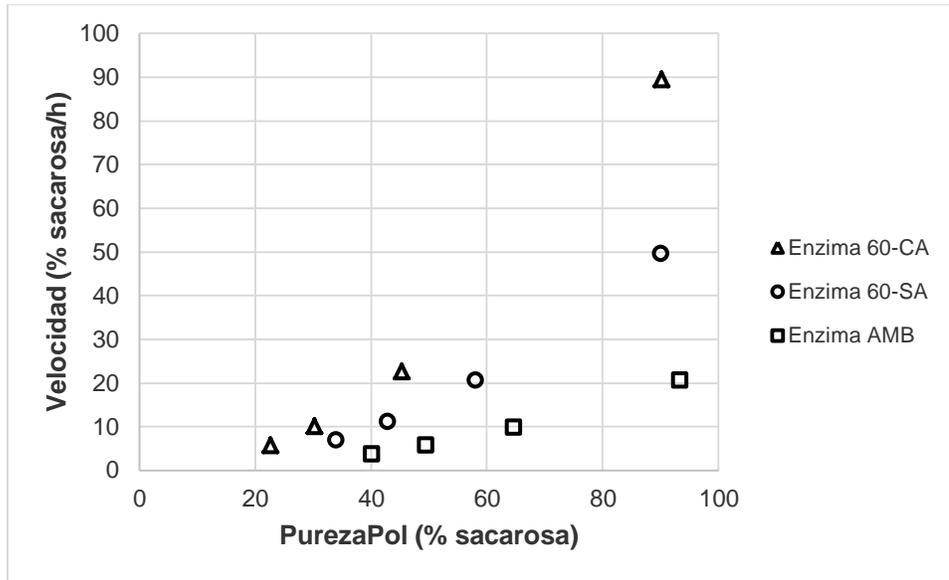
Por lo tanto la velocidad corresponde a:

$$V = \left[ d \left( \frac{K_1}{K_2 + t} \right) / dt \right]_i = - \frac{K_1}{(K_2 + t)^2}$$

El signo negativo de la derivada indica la reducción de la velocidad a medida que avanza la reacción. En la Figura 3-2 se presenta la velocidad de reacción en función de la PurezaPol, en donde se observa que a medida se reduce la concentración de sacarosa disminuye la velocidad de reacción de hidrólisis, en esta gráfica se observa que los datos no presentan una tendencia típica según el modelo cinético de Michaelis-Menten.

Es posible que este comportamiento se deba a la presencia en las mieles de caña de proteínas, grasas, fibra y minerales que aumentan su concentración por efecto del calentamiento, actuando como inhibidores de la reacción de hidrólisis, lo que no permite hacer un modelamiento cinético característico de las reacciones enzimáticas. Esta hipótesis es confirmada por algunos autores que indican que, al realizar la hidrólisis de jugos de caña con invertasa, la enzima perdió entre un 10 y 15% de su actividad, posiblemente debido a la presencia de sales en los jugos de caña (Amaya *et al.*, 2003). Así mismo, Honig (1982) citado por Prada Forero *et al.* (2015a) establece que se han observado efectos inhibidores de algunos iones metálicos presentes en la caña de

azúcar. Por su parte García (2007) citado por Prada Forero *et al.* (2015a) indica que la presencia de iones de hidrogeno, sales y ciertos fermentos con estructuras moleculares de glucosa y fructosa, pueden influir en la hidrólisis de la sacarosa disuelta.



**Figura 3-2.** Velocidad de reacción estimada para la hidrólisis enzimática de mieles de caña

Solís-Fuentes *et al.* (2013) indican que hay un efecto inhibitorio por exceso de sustrato, cuando al inicio de la reacción de hidrólisis si se tienen concentraciones de sacarosa mayores a 400 mM en jugos clarificados y purificados de caña, este puede ser un factor que puede influir en la inhibición de la reacción de hidrólisis en los ensayos realizados, lo que no permite hacer un modelamiento cinético característico de las reacciones enzimáticas, ya que la concentración de sacarosa al inicio de la reacción tenía en promedio un valor promedio de  $60,92 \pm 0,86\%$ , es decir, 1.779,74 mM.

Solís-Fuentes *et al.* (2010) y Amaya *et al.* (2003) realizaron la hidrólisis enzimática, empleando invertasa, de jugo de caña o guarapo con concentraciones iniciales de sacarosa de 18,41% y 15% respectivamente, logrando obtener jarabes de caña y ajustar los datos experimentales al modelo de Michaelis-Menten.

Teniendo en cuenta que el mayor grado de hidrólisis se obtuvo con el método de hidrólisis enzimática a 60 °C con agitación, se escogió realizar el diseño de un tanque agitado enchaquetado por lotes, pensando en la obtención de jarabe de caña como una alternativa en las centrales de mieles.

Teniendo en cuenta los datos promedio iniciales de las mieles con las que se trabajó (SST de  $66,89 \pm 0,26\%$ ,  $60,92 \pm 0,86\%$  de sacarosa y  $2,85 \pm 0,32\%$  de azúcares reductores), los requerimientos de las centrales de mieles para la recepción de mieles de caña (SST entre 65 - 75 °Brix y pH entre 4,8 y 5,8)<sup>5</sup>, y resultados promedio obtenidos en la hidrólisis enzimática a 60 °C con agitación y tres horas de:  $61,60 \pm 3,22\%$  de azúcares reductores,  $19,91 \pm 2,58\%$  de sacarosa y unos SST de  $75,09 \pm 0,37\%$  y tomando como base de cálculo una producción diaria de 800 kg<sup>6</sup> de jarabe de caña, a continuación se presentan los cálculos realizados para el diseño del reactor.

En la Tabla 3-3 se presentan los datos de usados para el cálculo del reactor.

**Tabla 3-3.** Datos usados para el cálculo del reactor

Producción diaria de jarabe (kg/día)	800
Tiempo de reacción (h)	3
Tiempo de limpieza y carga del reactor (h)	1
Tiempo total de operación (h)	4
Cantidad de reactores	1
Número de lotes/día (24h/tiempo total de operación)	6
Temperatura de reacción (°C)	60
SST de las mieles(°Brix)	70
Concentración. Sacarosa en las mieles (%)	61
Concentración. Sacarosa en el jarabe (%)	25

<sup>5</sup> Información suministrada por Ángela Martínez de Fedepanela

<sup>6</sup> Capacidad de recepción de mieles para la central de mieles de Caparrapí, dato suministrado por Fedepanela

El volumen de mieles a procesar por día se calculó a partir de la ecuación para la densidad establecida por Peña H. (2009), en función de los SST.

$$V_{Día} = \frac{Producción\ diaria}{\rho_{Miel}} = \frac{800\ kg / día}{0,956 + (0,005 \times SST)} = \frac{800\ kg / día}{0,956 + (0,005 \times 70\ ^\circ Brix)}$$

$$V_{Día} = 612,6\ L/día$$

El volumen efectivo del reactor corresponde a:

$$V_{Efectivo} = \frac{V_{Día}}{(\#Lotes/día) \times \# Reactores} = \frac{612,6\ L/día}{6 \times 1} = 102,1\ L / Reactor * Lote$$

Estableciendo un 20% de cabeza libre, el volumen real del reactor:

$$V_{Real} = V_{Efectivo} \times 1,2 = 123\ L / Reactor * Lote = 0,123\ m^3 / Reactor * Lote$$

A partir del volumen real se calcula el diámetro del reactor:

$$V_{Real} = \frac{h * \pi * D^2}{4}$$

Asumiendo que la altura ( $h$ ) es 1,3 veces el diámetro ( $D$ ), se tiene que:

$$V_{Real} = \frac{\pi * 1,3D^3}{4}$$

Por lo tanto el diámetro del reactor por lote es:

$$D = \sqrt[3]{\frac{4 * V_{Real}}{1,3 * \pi}} = \sqrt[3]{\frac{4 * 0,123\ m^3}{1,3 * \pi}} = 0,5\ m$$

Por lo tanto la altura será:

$$h = 1,3 * D = 1,3 * 0,5\ m = 0,65\ m$$

Como es un reactor agitado se estableció el uso de un agitador tipo turbina de seis palas, donde como proporciones típicas se tiene que el diámetro del agitador corresponde a un 1/3 del diámetro del reactor, por lo que el diámetro de las palas ( $D_p$ ) es de 0,17 m (McCabe *et al.*, 1991).

Finalmente se debe establecer la potencia del motor:

$$P = \frac{N_p * n^3 * D_p^5 * \rho}{g}$$

El número de potencia  $N_p$ , se determinó gráficamente a partir del  $N_{Re}$  (McCabe *et al.*, 1991). La viscosidad se determinó usando la ecuación establecida por Peña H. (2009), en función de los SST y la temperatura, tomando unos SST de 70 °Brix y la temperatura de reacción de 60 °C.

Los agitadores de palas giran a velocidades comprendidas entre 20 y 150 revoluciones por minuto (rpm), por lo que se estimó que la frecuencia  $n$  del motor fuese de 90 rpm, lo que equivale a 1,5 revoluciones por segundo (rps) que son las unidades empleadas para el cálculo del  $N_{Re}$ .

$$N_{Re} = \frac{D_p^2 * n * \rho}{\mu} = \frac{D_p^2 * n * (0,956 + 0,005 * SST)}{10^{(-0,218 + 0,044 * SST - 0,019 * T)}}$$

Se calculó el  $N_{Re}$  a 70 °Brix y 60 °C, y dado que la gráfica para la determinación de  $N_p$  está en unidades inglesas (McCabe *et al.*, 1991), se hicieron las conversiones correspondientes encontrando que para el  $N_{Re}$  calculado de 1.032 le corresponde un  $N_p$  de 3.

Por lo tanto la potencia del motor es:

$$P = \frac{3 * (1,5 \text{ rps})^3 * (0,55 \text{ ft})^5 * 81,53 \text{ lb/ft}^3}{32,17 \text{ ft/s}^2} 0, \text{ft lbf/s} = 0,0021 \text{ HP}$$

Dado que la potencia calculada es baja se decidió usar un motor comercial de 1/8 HP.

Una vez establecidas las dimensiones del reactor se realizó del cálculo de la chaqueta a partir del máximo calor requerido para calentar las mieles de cada lote desde 25 hasta 60 °C.

$$Q = m \times \Delta H = (V_{Efectivo} \times \rho) \times \int_{25}^{60} C_P dT$$

La masa se calculó tomando el volumen efectivo del reactor y la ecuación de densidad determinada por Peña H. (2009), en función de los SST, tomando los SST de la miel como 70 °Brix.

$$m = V_{Efectivo} \times (0,956 + 0,005 * SST) = 102,1 L \times (0,956 + 0,005 * 70) = 133,3 kg$$

Para el cálculo del delta de entalpía se empleó la ecuación para la capacidad calorífica establecida por Peña H. (2009), en función de los SST y la temperatura en grados Celcius.

$$\Delta H = \int_{25}^{60} [3,228 - 0,03 * SST + 0,226 * LN(T)] dT$$

Resolviendo la integral se tiene que:

$$\Delta H = (3,002 - 0,03 * SST) \times (60 - 25) + 0,226 \times [60 * \ln(60) - 25 * \ln(25)]$$

Entonces el calor de las mieles será:

$$Q = 9187,02 kJ$$

Tomando un tiempo de 5 minutos de calentamiento el flujo de calor es:

$$\dot{Q} = \frac{9187,02 kJ}{5 \text{ min} * 1 \text{ h}/60 \text{ min}} = 110.244,26 kJ/h$$

A partir del flujo de calor requerido para las mieles y suponiendo una presión manométrica de vapor de 10 psi<sup>7</sup>, se determinó el volumen de la chaqueta, para lo cual en tablas de vapor se estableció el calor latente y la densidad

$$\dot{Q}_{Miel} = \dot{Q}_{vapor}$$

$$110.244,26 kJ/h = (\dot{m} * \lambda)_{vapor}$$

---

<sup>7</sup> Valor con base en el manejo de tanques enchaquetados

$$\dot{m}_{Vapor} = \frac{110.244,26 \text{ kJ/h}}{2.215,66 \text{ kJ/kg}} = 49,76 \text{ kg/h}$$

$$\dot{V}_{Vapor} = \frac{49,76 \text{ kg/h}}{0,97 \text{ kg/m}^3} = 51,24 \text{ m}^3/\text{h} = 0,014 \text{ m}^3/\text{s}$$

Asumiendo un tiempo de residencia ( $\tau$ ) para el vapor de 2 segundos<sup>8</sup>, se establece el volumen del vapor que será el mismo requerido para la chaqueta:

$$V_{Vapor} = \dot{V}_{Vapor} * \tau = 0,014 \text{ m}^3/\text{s} * 2 \text{ s} = 0,2847 \text{ m}^3 = 28,47 \text{ L}$$

Para verificar el volumen de la chaqueta, se realizó el cálculo del empleando las dimensiones del reactor.

Con el diámetro interno ( $D_i$ ) del reactor es 0,50 m y tomando que el espacio mínimo de la chaqueta es de 1 pulgada, se tiene que el diámetro externo es de 0,55 m. La altura del enchaquetado es de 0,68 m por lo que aplicando la fórmula para el cálculo del volumen se tiene que:

$$V_i = \frac{h * \pi * D_i^2}{4} = \frac{0,68 \text{ m} * \pi * (0,50 \text{ m})^2}{4} = 0,133 \text{ m}^3$$

$$V_e = \frac{h * \pi * D_e^2}{4} = \frac{0,68 \text{ m} * \pi * (0,55 \text{ m})^2}{4} = 0,161 \text{ m}^3$$

$$V_{Chaqueta} = V_e - V_i = 0,16 \text{ m}^3 - 0,13 \text{ m}^3 = 0,028 \text{ m}^3 = 28,32 \text{ L}$$

Con este valor se verifica que el volumen de la chaqueta es de 0,028 m<sup>3</sup>.

En la Figura 3-3 se presenta el diseño del reactor definido.

---

<sup>8</sup> Dato tomado con base en el manejo de tanques enchaquetados

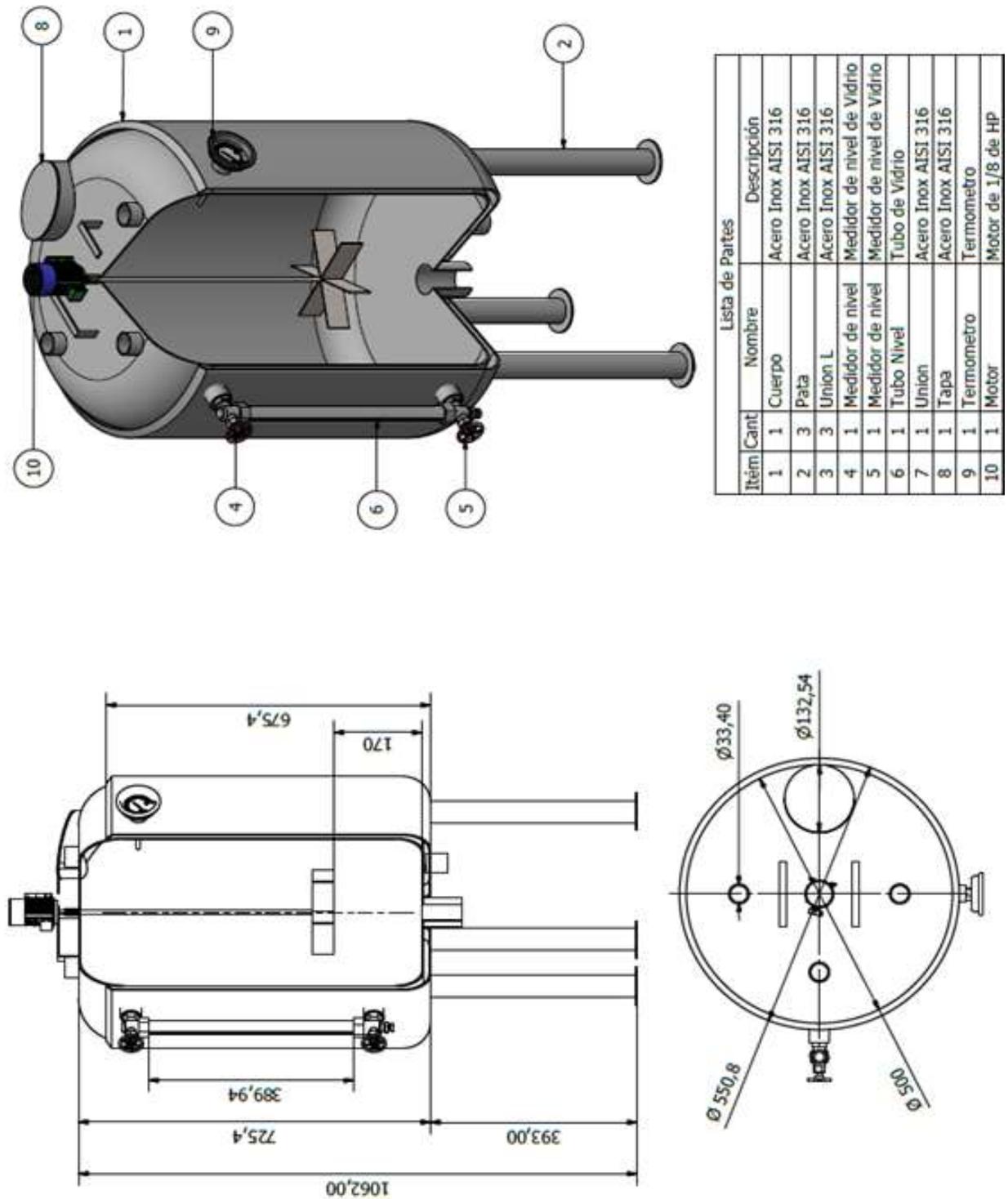
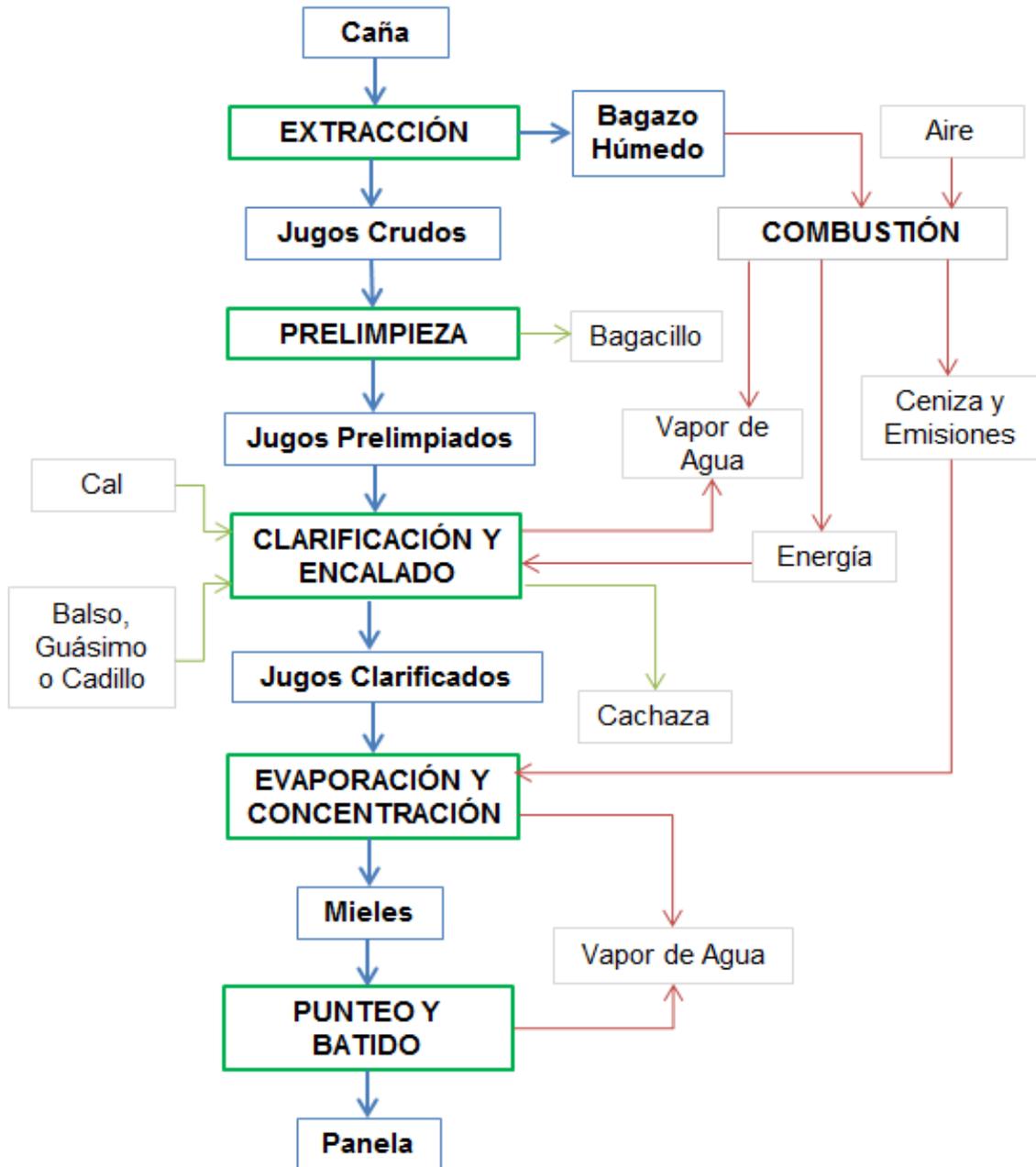


Figura 3-3. Diseño del reactor

### 3.3. Análisis del proceso

En la Figura 3-4 se presenta un esquema del proceso tradicional de elaboración de panela en un trapiche.



**Figura 3-4.** Diagrama de flujo del proceso de producción de panela

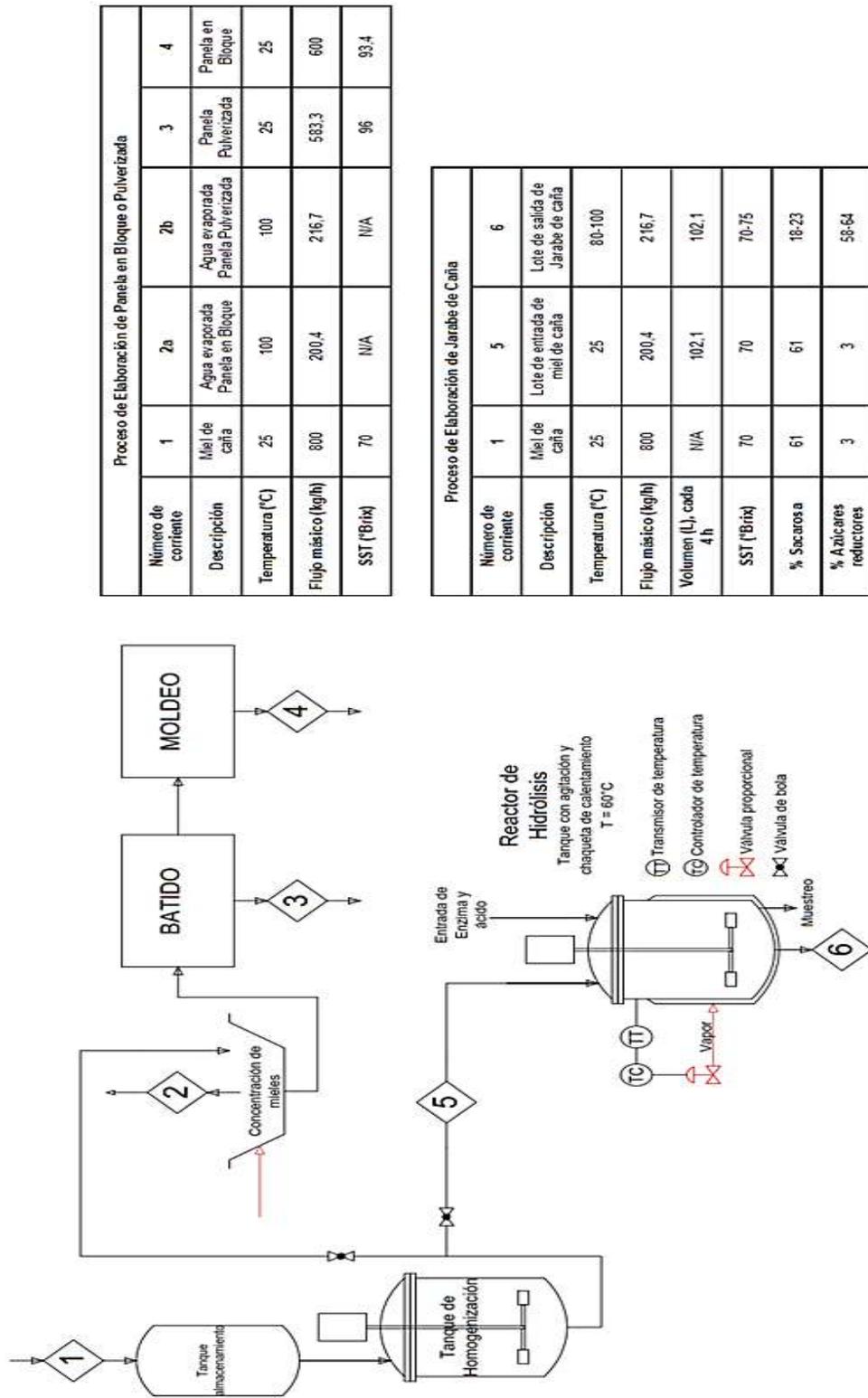
Fuente: García *et al.*, 2007

En un trapiche convencional es difícil el uso de enzima como agente hidrolizante, pues es indispensable tener un control de temperatura para garantizar que esta tenga la actividad enzimática adecuada para la reacción; por otra parte, una vez clarificados los jugos los cuales tienen una temperatura de entre 94 - 97 °C, sería indispensable bajar la temperatura de la hornilla para garantizar que se tenga la temperatura adecuada para la acción de la enzima, y dado que el calor se suministra mediante quema de bagazo se tendría que disminuir la alimentación de este para bajar la temperatura lo cual sería un proceso muy lento dada la dinámica de los gases de combustión.

Por lo anterior, una opción más conveniente es realizar el proceso de hidrólisis enzimática para la obtención de jarabes en plantas que trabajen con vapor de caldera como las centrales de mieles, que son centros de acopio de mieles producidas en trapiches convencionales con la finalidad de producir panela empleando vapor de caldera como medio de calentamiento lo que facilita el control de la temperatura del proceso. Las mieles que se reciben en las centrales deben tener entre 65 – 75 °Brix, un pH entre 4,8 y 5,8 y no estar fermentadas ni cristalizadas. Una vez son recibidas en las centrales las mieles son homogenizadas con el fin de obtener panela de calidad uniforme, sin importar la procedencia de las mieles, y se procede a su concentración hasta el punto de panela.

Al trabajar con vapor de caldera, y por lo tanto tener un control de la temperatura, es factible realizar la hidrólisis enzimática en estas plantas. La realización de este proceso de hidrólisis no implica mayores cambios en los equipos disponibles en las centrales, simplemente se debe realizar la instalación del tanque agitado diseñado para trabajar por lotes y aprovechar los equipos disponibles en las plantas.

Teniendo en cuenta los equipos disponibles en las centrales de mieles es posible tener dos líneas de elaboración de productos, una para panela, puede ser en bloque o pulverizada, y otra para elaboración de jarabes. En la Figura 3-5 se presentan los diagramas de flujo y los balances de masa correspondientes para las dos posibles líneas de productos a elaborar en las centrales de mieles: la del proceso de producción de panela empleado y la del proceso de producción de jarabes de caña propuesto.



**Figura 3-5.** Diagrama de flujo y balance de masa para el proceso de producción de panela y el proceso de producción de jarabes a implementar en las centrales de mieles

Los balances de masa se realizaron para a partir de 800 kg/hora de miel para una producción de 600 kg/hora de panela en bloque con unos SST de 93,4 °Brix y de 583,3 kg/hora de panela pulverizada con unos SST de 96 °Brix. En la elaboración de la panela pulverizada, la modificación del proceso consiste en que a la etapa de batido deben ingresar unas mieles más concentradas (96 °Brix) y no se pasa a la etapa de moldeo, sino que se hace un batido intenso hasta conseguir la pulverización de las mieles concentradas.

En el proceso de producción de jarabes de caña propuesto para ser implementado en las centrales de mieles, se partió de 800 kg/hora de miel con el fin de obtener una producción de 6 lotes diarios de jarabe, cada uno de 102 litros, a partir de 612,6 L<sub>miel</sub>/día.

Se asumió que a las mieles empleadas para la obtención del jarabe no se les adicionará cal durante su elaboración por lo que se espera que el pH sea cercano a 5,0. Las condiciones del proceso de la hidrólisis serán: temperatura de 60 °C, tiempo de reacción 3 horas, cantidad de enzima empleada  $1,093 \pm 0,005$  g <sub>invertasa</sub> /L <sub>miel</sub>, cantidad de ácido cítrico  $1,092 \pm 0,005$  g <sub>ácido cítrico</sub> /L <sub>miel</sub>. Al final de la reacción la temperatura se elevará por encima de los 80 °C para garantizar la inactivación de la enzima.

De acuerdo a las condiciones de reacción evaluadas y los resultados obtenidos en la Tabla 3-4 se presenta una propuesta de ficha técnica del jarabe de caña. Una característica importante a tener en cuenta en los jarabes de caña es su estabilidad, pensando en esto las muestras de los jarabes obtenidos durante las pruebas fueron almacenadas a temperatura ambiente de Bogotá (13,5 °C) durante seis meses y medio, al cabo de los cuales fueron destapadas encontrando que aún conservaban las características iniciales.

Por otra parte en la Tabla 3-5 se presentan las características de jarabes de sacarosa comerciales, que serían competidores en el mercado del jarabe propuesto.

**Tabla 3-4.** Propuesta de ficha técnica de jarabe de caña

<b>Descripción del producto:</b> Jarabe de caña obtenido mediante la hidrólisis de miel de caña	
<b>Características químicas</b>	
SST (°Brix)	70-75
pH	4,6 ± 0,05
Azúcares reductores o invertidos (%)	58 – 64
Sacarosa (%)	18 – 23
<b>Apariencia:</b>	Líquido denso marrón brillante
<b>Sabor:</b>	Dulce intenso característico del producto
<b>Olor:</b>	Típico del producto
<b>Almacenamiento:</b> Se debe almacenar el producto en un ambiente fresco y seco a temperatura ambiente evitando la exposición directa al sol. Bajo estas condiciones el producto tiene una vida útil de 6 meses si no es abierto.	

**Tabla 3-5.** Características de jarabes sacarosa comerciales

	<b>JARABE DE AZÚCAR INVERTIDO ORO 66/73</b> Comercial Javier Casado, España	<b>SIROPE DE AZÚCAR INVERTIDO - 72,7/67</b> Agrudispa, España
<b>Descripción del producto:</b>	Solución acuosa purificada y concentrada de sacáridos nutritivos obtenidos mediante un proceso parcial de hidrólisis	El sirope de azúcar invertido es un azúcar líquido de pureza absoluta, conteniendo el 72,7% de materia seca
<b>Características químicas</b>		
SST (°Brix):	70,5-73,5	71,6
pH:	3-6	5 ± 1,5
Azúcares reductores o invertidos (%):	60-70	67,0 ± 7
<b>Apariencia:</b>	Líquido denso marrón brillante	Solución de cristal, incolora, transparente y sin espuma
<b>Sabor:</b>	Dulce intenso	Suave, dulce, neutro
<b>Olor:</b>	Neutro	Inodoro, típico del producto
<b>Almacenamiento:</b>	La caducidad del producto en recipiente “no abierto” es de 12 meses desde la fecha de fabricación. Almacenar en ambientes limpios y secos evitando la exposición directa al sol, a productos químicos y materiales olorosos	Se recomienda almacenar el producto en un lugar fresco y seco a una temperatura de 25 ± 5 °C.

Comparando las características de los productos comerciales contra las obtenidas en las pruebas para la elaboración de el jarabe de caña, se observa que son similares por lo que el producto tendría un mercado para ser comercializado lo que sería importante y daría un valor agregado a los productores ya que en el mercado los jarabes de sacarosa.

### **3.3.1. Análisis financiero**

Para el análisis se tomó para una producción diaria de jarabe de 612,6 L, y se consideró un día de operación semanal, ya que la obtención de jarabe de caña sería una alternativa de producción en las centrales de mieles, por lo que se tendrían 48 días de operación al año.

- Costos de Mano de Obra

Lo primero que se estableció fueron los costos anuales de la materia prima, tales como miel, enzima, ácido cítrico y envases (Tabla 3-6).

Para la obtención de 612,6 L diarios de jarabe se requieren 800 kg diarios de miel y se tomó como precio de compra el valor promedio de los últimos diez años del kilo de panela<sup>9</sup>, que corresponde a \$1.612 / kg.

Las cantidades de enzima (invertasa) y ácido cítrico se tomaron como el mayor valor a utilizar de acuerdo a las cantidades requeridas en los ensayos experimentales.

Para determinar la cantidad de envases requeridos, se tomó como referencia las presentaciones de jarabes disponibles en el mercado y se estableció para el producto una presentación de 300 ml.

---

<sup>9</sup> Datos suministrados por Fedepanela

**Tabla 3-6.** Costos anuales de materia prima

	<b>Cantidad diaria</b>	<b>Cantidad Anual</b>	<b>Precio unitario</b>	<b>Valor Total Anual</b>
<b>Mieles</b>	800 kg	38.400 kg	\$1.612/kg	\$61.900.800
<b>Enzima</b>	672,6 g	32,3 kg	\$37.500/kg	\$1.211.250
<b>Ácido Cítrico</b>	672,0 g	32,3 kg	\$26.000/kg	\$839.800
<b>Envases</b>	2.042	98.016	\$700	\$68.611.200
			<b>TOTAL</b>	<b>\$132.563.050</b>

Nota: Los precios unitarios de la enzima, el ácido cítrico y los envases fueron consultados en internet

- Costos de Mano de Obra

Para determinar los costos de mano de obra anuales se tomó como referencia una planta de producción de panela que emplea vapor (Tabla 3-7).

**Tabla 3-7.** Costos anuales de mano de obra

	<b>Número de operarios</b>	<b>Salario Operario</b>	<b>Nomina semanal</b>	<b>Salario mes</b>	<b>Año</b>
<b>Calderista</b>	3	\$300.000	\$900.000	\$3.600.000	\$43.200.000
<b>Operario Concentración</b>	3	\$300.000	\$900.000	\$3.600.000	\$43.200.000
<b>Operario Moldeo</b>	3	\$200.000	\$600.000	\$2.400.000	\$28.800.000
<b>Operario Empaque</b>	6	\$200.000	\$1.200.000	\$4.800.000	\$57.600.000
<b>Supervisor</b>	3	\$250.000	\$750.000	\$3.000.000	\$36.000.000
				<b>TOTAL</b>	<b>\$208.800.000</b>

- Cálculo del Valor Anual Neto (VAN)

El Valor Anual Neto (VAN) es el resultado aritmético de los ingresos y los gastos en cada año de producción.

Los gastos anuales de producción corresponden a los costos de la materia prima, de la mano de obra, de operación y mantenimientos, estos últimos se estimaron cada uno como el 5% del valor de la inversión. Según datos suministrados por Fedepanela la

inversión de una central de mieles está entre los \$400.000.000 y los \$500.000.000. Considerando la inclusión de la elaboración de jarabes para el análisis se tomó el valor de \$500.000.000 como la inversión.

$$\begin{aligned} \text{Gastos}_{\text{Anuales}} &= \sum \text{Costos} \\ &= \text{Mano de Obra} + \text{Materia Prima} + \text{Operación} + \text{Mantenimiento} \end{aligned}$$

$$\text{Gastos}_{\text{Anuales}} = \$208.800.000 + \$132.563.050 + (\$500.000.000 \times 0,05) + (\$500.000.000 \times 0,05)$$

$$\text{Gastos}_{\text{Anuales}} = \$391.363.050$$

Para determinar las ventas anuales se buscaron precios de jarabes comerciales, los cuales están entre los \$4.000 y los \$19.600, según la marca y presentación (250 - 355 ml). Para la presentación de jarabe definida se tomó como referencia el precio de venta más bajo del mercado que correspondía a una presentación de 250 ml, por lo para el análisis estableció que el precio de venta fuera de \$5.000 por unidad.

$$\text{Ventas}_{\text{Anuales}} = \text{Unidades producidas Anualmente} \times \text{Precio de Venta}$$

$$\text{Ventas}_{\text{Anuales}} = 98.016 \text{ unidades} \times \$5.000 / \text{unidad} = \$490.080.000$$

Por lo tanto, el VAN es:

$$\text{VAN} = \text{Ventas} - \text{Gastos} = \$490.080.000 - \$391.363.050 = \$98.716.950$$

- Cálculo del Valor de Salvamento ( $V_s$ )

El Valor de Salvamento ( $V_s$ ) se calcula con base en la inversión del proyecto, la cual equivale principalmente a la compra de equipos e infraestructura, y la depreciación.

Para la depreciación se tomó un tiempo de vida útil ( $n$ ) del proyecto de 10 años, ya que este es un estimado hecho por Fedepanela para los proyectos de las centrales de mieles, y se asumió que el proyecto se deprecia de forma lineal durante los 10 años. Por lo tanto, al final de la vida útil del proyecto, el valor de salvamento es del 10% de la inversión inicial en el año cero.

$$V_s = I \times \text{Depreciación} = \$500.000.000 \times 0,1 = \$50.000.000$$

- Cálculo del Valor Presente Neto (VPN)

Para el cálculo del VPN se deben traer el VAN y el  $V_s$  a valor presente, para lo cual se estimó una Tasa Interna de Oportunidad ( $TIO$ ) del 5%.

El valor presente para el VAN es:

$$\begin{aligned} P_{VAN} &= VAN \times \frac{(1 + TIO)^n - 1}{TIO \times (1 + TIO)^n} = \$98.716.950 \times \frac{(1 + 0,005)^{10} - 1}{0,005 \times (1 + 0,005)^{10}} \\ &= \$762.266.121 \end{aligned}$$

El valor presente para el  $V_s$  es:

$$P_{V_s} = \frac{V_s}{(1 + TIO)^n} = \frac{\$50.000.000}{(1 + 0,005)^{10}} = \$30.695.663$$

El VPN es igual a:

$$\begin{aligned} VPN &= -I + P_{VAN} + P_{V_s} = -\$500.000.000 + \$762.266.121 + \$30.695.663 \\ &= \$292.961.784 \end{aligned}$$

Al obtener un valor presente neto positivo, el retorno de la inversión es mayor que la  $TIO$  del 5%, por lo tanto, se define que la inversión del proyecto es una buena alternativa en términos financieros.

- Cálculo de la Tasa Interna de Retorno (*TIR*)

La Tasa Interna de Retorno (*TIR*), proporciona el rendimiento de la inversión con el fin de compararla con la *TIO*, pues si la *TIR* es mayor que la *TIO*, se define que el proyecto es viable financieramente.

A partir de los datos financieros calculados previamente y usando la siguiente ecuación se determinó la *TIR*:

$$I = VAN \times \left( \frac{(1 + TIR)^n - 1}{TIR \times (1 + TIR)^n} \right) + \frac{V_s}{(1 + TIR)^n}$$

$$\$50.000.000 = \$98.716.950 \times \left( \frac{(1 + TIR)^{10} - 1}{TIR \times (1 + TIR)^{10}} \right) + \frac{\$50.000.000}{(1 + TIR)^{10}}$$

$$TIR = 14\%$$

Con una *TIR* del 14% y un *VPN* positivo de \$292.961.784, se concluye que la producción de jarabes de caña en centrales de mieles es financieramente viable.

## 4. Conclusiones y Recomendaciones

### 4.1. Conclusiones

- Se estableció que es posible la obtención de jarabes a partir de mieles de caña panelera mediante hidrólisis enzimática y la inclusión de esta operación en las centrales de mieles como alternativa para diversificación de productos con valor agregado obtenidos a partir de caña.
- La alternativa propuesta para la obtención de jarabes no implica modificaciones en distribuciones de planta de las centrales de mieles y permite emplear la infraestructura actualmente utilizada para la elaboración de panela.
- Se establecieron como condiciones de reacción para la obtención de jarabes mediante hidrólisis enzimática de mieles de caña panelera: temperatura de  $60,2 \pm 3,5$  °C, pH de  $4,61 \pm 0,05$ , tiempo de reacción 3 horas. Para la cual se recomienda el empleo de  $1,093 \pm 0,005$  g invertasa / L miel y  $1,092 \pm 0,005$  g ácido cítrico / L miel.
- Las características de la propuesta de ficha técnica para el jarabe de caña, establecidas a partir de las pruebas realizadas, son comparables a las de jarabes de comerciales por lo que el producto propuesto puede tener un mercado.
- Se concluyó que la producción de jarabes de mieles caña en las centrales de mieles es viable financieramente.

## 4.2. Recomendaciones

- Dado que el trabajo se realizó a nivel de laboratorio, es necesario validar las condiciones a nivel de planta piloto y de ser posible en las centrales de mieles o plantas que empleen vapor de caldera.
- Se recomienda evaluar la vida útil de los jarabes de miel de caña obtenidos bajo las condiciones evaluadas.
- Se debe establecer el tamaño mínimo de producción de jarabes de mieles de caña que sea económicamente viable de acuerdo a las condiciones de proceso establecidas.

## A. Anexo: Datos experimentales

Método	Tiempo (h)	SST (°Brix)	Sacarosa (%)	PurezaPol (%)
Control 60-CA	0	66,89 ± 0,26	60,92 ± 0,86	91,08 ± 1,64
Control 60-CA	1	70,02 ± 1,00	63,33 ± 0,70	90,46 ± 1,93
Control 60-CA	2	71,27 ± 0,50	64,10 ± 1,70	89,93 ± 1,79
Control 60-CA	3	72,14 ± 0,19	64,51 ± 1,67	89,43 ± 2,09
Control 60-SA	0	66,89 ± 0,26	60,92 ± 0,86	91,08 ± 1,64
Control 60-SA	1	70,00 ± 0,51	63,28 ± 0,55	90,40 ± 1,16
Control 60-SA	2	71,25 ± 0,61	64,22 ± 0,61	90,13 ± 1,31
Control 60-SA	3	72,61 ± 1,00	65,35 ± 0,68	90,02 ± 1,29
Control AMB	0	66,89 ± 0,26	60,92 ± 0,86	91,08 ± 1,64
Control AMB	2	67,59 ± 0,53	61,31 ± 0,56	90,71 ± 1,54
Control AMB	4	68,41 ± 0,51	61,89 ± 0,59	90,49 ± 1,54
Control AMB	6	69,12 ± 0,82	62,29 ± 0,61	90,13 ± 1,76
Ácido 60-CA	0	66,89 ± 0,26	60,92 ± 0,86	91,08 ± 1,64
Ácido 60-CA	1	70,84 ± 0,25	63,61 ± 0,71	89,79 ± 1,15
Ácido 60-CA	2	72,47 ± 0,52	64,43 ± 0,34	88,92 ± 0,82
Ácido 60-CA	3	72,94 ± 0,64	64,35 ± 0,28	88,23 ± 0,40
Ácido 60-SA	0	66,89 ± 0,26	60,92 ± 0,86	91,08 ± 1,64
Ácido 60-SA	1	70,25 ± 1,66	63,49 ± 1,21	90,39 ± 1,56
Ácido 60-SA	2	71,59 ± 1,36	64,52 ± 0,57	90,14 ± 1,75
Ácido 60-SA	3	72,71 ± 1,45	65,00 ± 1,08	89,41 ± 1,81
Ácido AMB	0	66,89 ± 0,26	60,92 ± 0,86	91,08 ± 1,64
Ácido AMB	2	67,70 ± 0,41	61,39 ± 0,57	90,69 ± 1,39
Ácido AMB	4	68,33 ± 0,27	61,85 ± 0,75	90,52 ± 1,43
Ácido AMB	6	69,20 ± 0,38	62,42 ± 1,48	90,20 ± 1,72
Enzima 60-CA	0	66,89 ± 0,26	60,92 ± 0,86	91,08 ± 1,64
Enzima 60-CA	1	71,48 ± 0,53	28,22 ± 3,53	39,46 ± 4,69
Enzima 60-CA	2	73,24 ± 0,31	24,58 ± 3,10	33,58 ± 4,38

Método	Tiempo (h)	SST (°Brix)	Sacarosa (%)	PurezaPol (%)
Enzima 60-CA	3	75,09 ± 0,37	19,91 ± 2,58	26,52 ± 3,42
Enzima 60-SA	0	66,89 ± 0,26	60,92 ± 0,86	91,08 ± 1,64
Enzima 60-SA	1	71,01 ± 1,44	37,39 ± 4,08	52,59 ± 4,66
Enzima 60-SA	2	71,92 ± 0,74	34,63 ± 4,03	48,12 ± 5,30
Enzima 60-SA	3	73,63 ± 0,63	24,68 ± 1,93	33,53 ± 2,77
Enzima AMB	0	66,89 ± 0,26	60,92 ± 0,86	91,08 ± 1,64
Enzima AMB	2	69,59 ± 0,65	50,44 ± 4,93	72,46 ± 6,70
Enzima AMB	4	70,10 ± 0,28	32,67 ± 3,89	46,60 ± 5,37
Enzima AMB	6	70,77 ± 0,37	25,53 ± 1,92	36,06 ± 2,53

Método	Tiempo (h)	Azúcares Reductores (%)	BlucoBrix (%)	Grado de hidrólisis (%)
Control 60-CA	0	2,85 ± 0,32	4,26 ± 0,49	4,68 ± 0,46
Control 60-CA	3	4,09 ± 0,04	5,67 ± 0,04	6,23 ± 0,08
Control 60-SA	0	2,85 ± 0,32	4,26 ± 0,49	4,68 ± 0,46
Control 60-SA	3	4,09 ± 0,04	5,64 ± 0,03	6,19 ± 0,11
Control AMB	0	2,85 ± 0,32	4,26 ± 0,49	4,68 ± 0,46
Control AMB	6	3,43 ± 0,37	4,96 ± 0,53	5,45 ± 0,65
Ácido 60-CA	0	2,85 ± 0,32	4,26 ± 0,49	4,68 ± 0,46
Ácido 60-CA	3	5,21 ± 0,55	7,15 ± 0,82	7,85 ± 0,79
Ácido 60-SA	0	2,85 ± 0,32	4,26 ± 0,49	4,68 ± 0,46
Ácido 60-SA	3	3,63 ± 0,38	4,99 ± 0,49	5,49 ± 0,63
Ácido AMB	0	2,85 ± 0,32	4,26 ± 0,49	4,68 ± 0,46
Ácido AMB	6	3,70 ± 0,40	5,36 ± 0,60	5,89 ± 0,75
Enzima 60-CA	0	2,85 ± 0,32	4,26 ± 0,49	4,68 ± 0,46
Enzima 60-CA	3	61,60 ± 3,22	82,04 ± 4,27	90,15 ± 6,17
Enzima 60-SA	0	2,85 ± 0,32	4,26 ± 0,49	4,68 ± 0,46
Enzima 60-SA	3	61,45 ± 3,32	83,47 ± 5,13	91,66 ± 5,81
Enzima AMB	0	2,85 ± 0,32	4,26 ± 0,49	4,68 ± 0,46
Enzima AMB	6	58,41 ± 0,45	82,54 ± 0,98	90,65 ± 2,60

## B. Anexo: Resultados del análisis estadístico

Efecto agitación

Anova purezapol metodo##agitacion##tiempo metodo agitacion tiempo

ANOVA:

Number of obs =	72	R-squared	=	0.9918	
Root MSE		=	2.52683	Adj R-squared =	0.9878

Source	Partial SS	df	MS	F	Prob > F
Model	36932.3424	23	1605.75402	251.49	0.0000
metodo	23233.019	2	11616.5095	1819.38	0.0000
agitacion	184.635335	1	184.635335	28.92	0.0000
metodo#agitacion	270.280453	2	135.140227	21.17	0.0000
tiempo	4827.39498	3	1609.13166	252.02	0.0000
metodo#tiempo	8216.56663	6	1369.42777	214.48	0.0000
agitacion#tiempo	75.0393115	3	25.0131038	3.92	0.0140
metodo#agitacion#tiempo	125.406668	6	20.9011114	3.27	0.0088
Residual	306.473567	48	6.38486598		
Total	37238.816	71	524.490366		

## EFECTO TEMPERATURA

anova purezapol metodo## temperatura ##tiempo metodo temperatura tiempo

ANOVA:

	Number of obs =	72	R-squared =	0.9885
	Root MSE =	2.75461	Adj R-squared =	0.9830

Source	Partial SS	df	MS	F	Prob > F
Model	31396.9747	23	1365.08586	179.90	0.0000
metodo	17740.3912	2	8870.19559	1168.99	0.0000
temperatura	10.1000672	1	10.1000672	1.33	0.2543
metodo#temperatura	7.9994033	2	3.99970165	0.53	0.5937
tiempo	4593.96469	3	1531.32156	201.81	0.0000
metodo#tiempo	8263.26035	6	1377.21006	181.50	0.0000
temperatura#tiempo	257.17452	3	85.7248399	11.30	0.0000
metodo#temperatura# tiempo	524.084468	6	87.3474113	11.51	0.0000
Residual	364.219194	48	7.58789987		
Total	31761.1939	71	447.340759		

## Enzima (PUREZAPOL) EFECTO TEMPERATURA

Anova purezapol temperatura##tiempo temperatura tiempo

	Number of obs =	24	R-squared =	0.9795
	Root MSE =	4.23019	Adj R-squared =	0.9705

Source	Partial SS	df	MS	F	Prob > F
Model	13646.5878	7	1949.51254	108.94	0.0000
temperatura	17.0692046	1	17.0692046	0.95	0.3433
tiempo	12848.8691	3	4282.95638	239.35	0.0000
temperatura#tiempo	780.649471	3	260.21649	14.54	0.0001
Residual	286.311548	16	17.8944718		
Total	13932.8994	23	605.778233		

## ENZIMA EFECTO AGITACIÓN (PUREZAPOL)

Anova purezapol agitacion##tiempo agitacion tiempo

	Number of obs =	24	R-squared =	0.9834	
	Root MSE =	3.80108	Adj R-squared =	0.9761	
Source	Partial SS	df	MS	F	Prob > F
Model	13671.2877	7	1953.04111	135.17	0.0000
agitacion	451.322433	1	451.322433	31.24	0.0000
tiempo	13021.4022	3	4340.46741	300.41	0.0000
agitacion#tiempo	198.563097	3	66.1876989	4.58	0.0169
Residual	231.171893	16	14.4482433		
Total	13902.4596	23	604.454767		



## Bibliografía

- Aguiar, C., Carrillo, F., Díaz, S., Parreño, J. y Vallejo, L. (2014). Prueba de hidrólisis de la sacarosa. Azúcares reductores. Catedra de bioquímica I. Escuela superior politécnica de Chimborazo. Facultad de Ciencias. Escuela de bioquímica y farmacia. Riobamba-Ecuador.
- Aiyer, P.V. (2005). Amylases and their applications (Review), *African Journal of Biotechnology*, 4(13): 1525-1529.
- Amaya, L., Flores, L.B., Ortega, J. y Montes, M. (2003). Hidrólisis de sacarosa presente en jugo de caña utilizando invertasa de *S. cerevisiae* inmovilizada sobre microesferas de nylon-6. En: X Congreso Nacional de Biotecnología y Bioingeniería.; 2003 Sep. 8-12; Puerto Vallarta, Jalisco.
- Amaya-Delgado, L., Hidalgo-Lara, M.E. and Montes-Horcasitas, M.C. (2006). Hydrolysis of sucrose by invertase immobilized on nylon-6 microbeads. *Food Chemistry*. 99: 299–304.
- Badui, S. (1999). Química de los alimentos. México: Pearson educación.
- Bello, N. y García, H. (2005). Estudio del comportamiento de la invertasa en la hidrólisis de la sacarosa presente en los jugos de caña crudo y clarificado, para la obtención de mieles invertidas. Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia.
- Beltrán, M.J. y Pacheco, M.M. (1994). Estudio de factibilidad técnico – económico para la obtención de mieles invertidas a partir de la caña de azúcar en la Hoya del Río Suárez. Universidad Jorge Tadeo Lozano Bogotá 1994.

- Borges da Silva, E.A., Ulson de Souza, A.A., Ulson de Souza, S.G. and Rodrigues, A.E. (2006). Analysis of the high-fructose syrup production using reactive SMB technology. *Chemical Engineering Journal*, 118: 167–181.
- Buchholz, K. and Seibel, J. (2008). Industrial carbohydrate biotransformations, *Carbohydrate Research*, 343: 1966–1979.
- Cadena, P.G., Wiggers, F.N., Silva, R.A., Lima Filho, J.L. and Pimentel, M.C.B. (2011). Kinetics and bioreactor studies of immobilized invertase on polyurethane rigid adhesive foam, *Bioresource Technology*, 102(2011): 513–51.
- Catana, R., Ferreira, B.S., Cabral, J.M.S. and Fernandes, P. (2005). Immobilization of inulinase for sucrose hydrolysis. *Food Chemistry*. 91: 517–520.
- Castellanos, O.F., Torres, L.M. y Flórez, D.H. (2010). Agenda prospectiva de investigación y desarrollo tecnológico para la cadena productiva de la panela y su agroindustria en Colombia. Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural y Universidad Nacional de Colombia. Bogotá, Colombia.
- Combes, D., Monsan, P. and Mathlouthi, M. (1981). Enzymic hydrolysis of sucrose. *Carbohydrate Research*. 93: 312-316.
- Combes, D. and Monsan, P. (1983). Sucrose hydrolysis by invertase. Characterization of products and substrate inhibition. *Carbohydrate Research*. 117: 215-228.
- Contexto ganadero. (2016, 27 de abril). Fedepanela le apuesta al mejoramiento de infraestructura. Contexto ganadero. Disponible en: <http://www.contextoganadero.com/agricultura/fedepanela-le-apuesta-al-mejoramiento-de-infraestructura>. Diciembre, 2017
- Durán Castro N. 2010. Reingeniería Panelera. Produmedios.
- Espinal, C.F., Martínez, H.J., Ortiz, L. y Acevedo, X. (2005). La cadena agroindustrial de la panela en Colombia. Una mirada global de su estructura y dinámica, 1991-2005. Documento de trabajo No. 57. Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural, Bogotá, Colombia.

- Ettalibi, M. and Baratti, J.C. (2001). Sucrose hydrolysis by thermostable immobilized inulinases from *Aspergillus ficuum*. *Enzyme and Microbial Technology*. 28: 596–601.
- FAO. (2007). Producción de panela como estrategia de diversificación en la generación de ingresos en áreas rurales de América Latina. Roma, Italia.
- Dirección del Centro de Inversiones FAO. (2007). RurallInvest. Un enfoque participativo para la identificación y preparación de inversiones rurales a pequeña escala. Módulo 3. Formulación y análisis detallado de proyectos. FAO. Roma, Italia.
- García, H.R. (2008). Desarrollo de un sistema de evaporación y concentración de jugos de múltiple efecto para mejorar la eficiencia térmica y la productividad y disminuir el impacto ambiental en la producción de panela. CORPOICA. Proyecto Convocatoria Investigación, Desarrollo Tecnológico e Innovación 2008. Mosquera, Cundinamarca.
- García, H.R., Albarracín, L.C., Toscano, A., Santana, N.J. y Insuasty, O. (2007). Guía tecnológica para el manejo integral del sistema productivo de la caña panelera. CORPOICA – Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural. Bogotá Colombia.
- Hernández Domínguez, J., Solís-Fuentes, J.A. y Duran de Bazúa, C. (2003). Separación de fructosa de melaza de caña por acomplejamiento con hidróxido de calcio, *Tecnología, Ciencia y Educación*, 18(1): 16-24.
- Herrera, A. (2011). Estudio comparativo de métodos para la determinación de sacarosa y azúcares reductores en miel virgen de caña utilizados en el ingenio Pichichí S.A. Pereira. Universidad tecnológica de Pereira.
- Hussain, A., Rashid, M.H., Perveen, R. and Ashraf, M. (2009). Purification, kinetic and thermodynamic characterization of soluble acid invertase from sugarcane (*Saccharum officinarum* L.), *Plant Physiology and Biochemistry*, 47: 188–194.
- Johnson, R., Padmaja, G. and Moorthy, S.N. (2009). Comparative production of glucose and high fructose syrup from cassava and sweet potato roots by direct conversion techniques. *Innovative Food Science and Emerging Technologies*. 10: 616–620.
- Kotwal, S.M. and Shankar, V. (2009). Immobilized invertase (Research review paper). *Biotechnology Advances*. 27: 311–322.

- McCabe, W., Smith, J.C. y Harriot, P. (1991). Operaciones unitarias en ingeniería química. 4ta edición. Madrid, España: MacGraw-Hill
- McKee, T. and McKee, J.R. (2009). Bioquímica. Las bases moleculares de la vida. 4ta edición. MacGraw-Hill.
- Martínez, H. y Acevedo, X. (2003). Características y estructura de la cadena agroindustrial de la panela en Colombia. Documento de trabajo No. 12. Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural, Bogotá, Colombia.
- Montes, H.M. y Magaña Plaza, I. (2002). Enzimas con aplicación industrial, Avance y Perspectiva, 21: 279-282.
- Najafpour, G.D. and Shan, C.P. (2003). Enzymatic hydrolysis of Molasses. Bioresource Technology. 86: 91-94.
- Nelson, D.L. y Cox, M.M. (2008). Lehninger Principles of Biochemistry. 5<sup>th</sup> edition. New York: W H. Freeman and Company.
- Peña H., A.C. (2009). Determinación de propiedades fisicoquímicas de jugos y mieles de caña panelera. Universidad Nacional. Trabajo final de especialización. Bogotá.
- Perry, R.H. (1992). Manual del ingeniero químico. México, McGraw-Hill.
- Prada-Forero, L.E., Chaves-Guerrero, A. y García-Bernal, H.R. (2015b). Efectos de la presión de evaporación y la variedad de caña en la calidad de la miel y la panela. CORPOICA. Ciencia y Tecnología Agropecuaria. 16(2): 153-165.
- Prada Forero, L.E., García Bernal, H.R. y Chaves Guerrero, A. (2014). Efectos de la presión de evaporación y la concentración de antiespumante y del uso de floculante y coadyuvante en la calidad de la miel y la panela. CORPOICA. Ciencia y Tecnología Agropecuaria. 15(2) 153-172.
- Prada Forero, L.E., García Bernal, H.R. y Chaves Guerrero, A. (2015a). Efecto de las variables de evaporación: presión y flujo calórico en la calidad de la panela. CORPOICA. Ciencia y Tecnología Agropecuaria. 16(1) 7-23
- Rodríguez, G. (Sin Fecha). La agroindustria rural de la panela en Colombia. Roles, problemática y nuevos retos. Disponible en: <http://www.panelamonitor.org/media/docrepro/document/files/la-agroindustria-rural->

- de-la-panela-en-colombia-roles-problematica-y-nuevos-retos.pdf. Diciembre, 2017.
- Rubio-Huacuz, M., Bernal-González, M., Ramírez-Burgos, L.I., García Gómez, R.S. y Durán-de-Bazúa C. (2011). Montaje de técnicas analíticas para medir glucosa, fructosa y sacarosa por cromatografía de líquidos en jugos de caña de azúcar. Informe Final de Proyecto C N I I A A – P I Q A y Q A. México D.F. UNAM
- Salcedo, J., Montes, E. y Pajaro, J. (2009). Producción de jarabes de fructosa por medio de la hidrólisis enzimática del almidón de yuca de las variedades CORPOICA M TAI-8 Y CORPOICA ORENSE, *Dyna*, 76(160): 121-130.
- Sánchez, C.P., Mejía, C.E., Figueroa, C., Esquivia, M., Agudelo, L.M., Zapata, N. y Gómez, M. (2005). Estudio de Cepas Nativas Amilolíticas, *Vitae*, 12(2): 21-28.
- Solís-Fuentes, J.A., Calleja-Zurita, K. y Durán-de-Bazúa, M. (2010). Desarrollo de jarabes fructosados de caña de azúcar a partir del guarapo, *Tecnología, Ciencia, Educación*, 25(1): 53-62.
- Solís-Fuentes, J.A., Guzmán-Flores, L.F. and Durán-de-Bazúa, M.C. (2013). Kinetic behavior of invertase in the hydrolysis of sucrose in complex sugarcane juices. *International Sugar Journal*, 115(1375): 488-494.
- Tester, R.F., Karkalas, X. and Qi, J. (2006). Hydrolysis of native starches with amylases, *Animal Feed Science and Technology*, 130: 39–54.
- Tomotani, J. and Vitolo, M. (2007). Production of high-fructose syrup using immobilized invertase in a membrane reactor. *Journal of Food Engineering*. 80: 662–667.