



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

**DISEÑO DE INVESTIGACIÓN PARA LA EVALUACIÓN DEL GRADO DE HIDRÓLISIS ÁCIDA  
DE TRES BIOMASAS DE CAÑA DE AZÚCAR DISUELTAS EN LÍQUIDO IÓNICO Y  
PRECIPITADAS PARA LA OBTENCIÓN DE AZÚCARES FERMENTABLES**

**David Ortiz Peña**

Asesorado por M.Sc. Hilda Piedad Palma de Martini

Guatemala, abril de 2019

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

**DISEÑO DE INVESTIGACIÓN PARA LA EVALUACIÓN DEL GRADO DE HIDRÓLISIS ÁCIDA  
DE TRES BIOMASAS DE CAÑA DE AZÚCAR DISUELTAS EN LÍQUIDO IÓNICO Y  
PRECIPITADAS PARA LA OBTENCIÓN DE AZÚCARES FERMENTABLES**

TRABAJO DE GRADUACIÓN

PRESENTADO A LA JUNTA DIRECTIVA DE LA  
FACULTAD DE INGENIERÍA

POR

**DAVID ORTIZ PEÑA**

ASESORADO POR LA MSC. HILDA PIEDAD PALMA DE MARTINI

AL CONFERÍRSELE EL TÍTULO DE

**INGENIERO QUÍMICO**

GUATEMALA, ABRIL DE 2019

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA  
FACULTAD DE INGENIERÍA



**NÓMINA DE JUNTA DIRECTIVA**

DECANO	Ing. Pedro Antonio Aguilar Polanco
VOCAL I	Ing. José Francisco Gómez Rivera
VOCAL II	Ing. Mario Renato Escobedo Martínez
VOCAL III	Ing. José Milton de León Bran
VOCAL IV	Br. Luis Diego Aguilar Ralón
VOCAL V	Br. Christian Daniel Estrada Santizo
SECRETARIA	Inga. Lesbia Magalí Herrera López

**TRIBUNAL QUE PRACTICÓ EL EXAMEN GENERAL PRIVADO**

DECANO	Ing. Murphy Olympto Paiz Recinos
EXAMINADOR	Ing. Carlos Salvador Wong Davi
EXAMINADOR	Ing. Manuel Gilberto Galván Estrada
EXAMINADOR	Ing. Zenón Much Santos
SECRETARIA	Inga. Marcia Ivónne Véliz Vargas

## HONORABLE TRIBUNAL EXAMINADOR

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

**DISEÑO DE INVESTIGACIÓN PARA LA EVALUACIÓN DEL GRADO DE HIDRÓLISIS ÁCIDA DE TRES BIOMASAS DE CAÑA DE AZÚCAR DISUELTAS EN LÍQUIDO IÓNICO Y PRECIPITADAS PARA LA OBTENCIÓN DE AZÚCARES FERMENTABLES**

Tema que me fuera asignado por la Dirección de la Escuela de Estudios de Postgrado Facultad de Ingeniería, con fecha de febrero de 2018

A handwritten signature in black ink, appearing to read 'D. Ortiz', enclosed within a large, loopy circular scribble.

**David Ortiz Peña**

Guatemala, 06 de noviembre de 2018.

Director  
Carlos Salvador Wong  
Escuela de Ingeniería Química  
Presente.

Estimado Director:

Reciba un atento y cordial saludo de la Escuela de Estudios de Postgrado. El propósito de la presente es para informarle que se ha revisado los cursos aprobados del primer año y el Diseño de Investigación del estudiante **David Ortiz Peña** carné número **200113144**, quien optó la modalidad del "PROCESO DE GRADUACIÓN DE LOS ESTUDIANTES DE LA FACULTAD DE INGENIERÍA OPCIÓN ESTUDIOS DE POSTGRADO". Previo a culminar sus estudios en la Maestría en Artes en Ciencia y Tecnología de los Alimentos.

Y si habiendo cumplido y aprobado con los requisitos establecidos en el normativo de este Proceso de Graduación en el Punto 6.2, aprobado por la Junta Directiva de la Facultad de Ingeniería en el Punto Decimo, Inciso 10.2, del Acta 28-2011 de fecha 19 de septiembre de 2011, firmo y sello la presente para el trámite correspondiente de graduación de Pregrado.

Sin otro particular, atentamente,

*"Id y Enseñad a Todos"*

Maestra. Inga. Hilda Piedad Palma M.  
Asesor (a)

Maestra. Ing. Hilda Piedad Palma Martínez  
Coordinadora de Área  
Ciencias Aplicadas



Maestro. Ing. Edgar Darío Álvarez  
Director  
Escuela de Estudios de Postgrado  
Facultad de Ingeniería



Cc archivo/L.Z.L.A.

RESOLUCIÓN DE JUNTA DIRECTIVA: Proceso de Graduación aprobado por la Junta Directiva de la Facultad de Ingeniería en el Punto Decimo, Inciso 10.2, del Acta 28-2011 de fecha 19 de septiembre de 2011.





Ref.EIQ.TG.023.2019

El Director de la Escuela de Ingeniería Química de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer el informe de la Dirección de Escuela de Estudios de Postgrado de la Facultad de Ingeniería del estudiante, **DAVID ORTIZ PEÑA**, ha optado por la modalidad de estudios de postgrado para el proceso de graduación de pregrado, que para ello el estudiante ha llenado los requisitos establecidos en el normativo respectivo y luego de conocer el dictamen de los miembros del tribunal nombrado por la Escuela de Ingeniería Química para revisar el **Informe del Diseño de Investigación del Programa de Maestría en ARTES EN CIENCIA Y TECNOLOGÍA DE LOS ALIMENTOS** titulado **"DISEÑO DE INVESTIGACIÓN PARA LA EVALUACIÓN DEL GRADO DE HIDRÓLISIS ÁCIDA DE TRES BIOMASAS DE CAÑA DE AZÚCAR DISUELTAS EN LÍQUIDO IÓNICO Y PRECIPITADAS PARA LA OBTENCIÓN DE AZÚCARES FERMENTABLES"**. Procede a **VALIDAR** el referido informe, ya que reúne la coherencia metodológica requerida por la Escuela.

*"Id y Enseñad a Todos"*

Ing. Carlos Salvador Wong Davi  
DIRECTOR  
Escuela de Ingeniería Química

Guatemala, marzo de 2019

Cc: Archivo  
CSWD/ale



DTG. 176.2019

El Decano de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer la aprobación por parte del Director de la Escuela de Ingeniería Química, al Trabajo de Graduación titulado: **DISEÑO DE INVESTIGACIÓN PARA LA EVALUACIÓN DEL GRADO DE HIDRÓLISIS ÁCIDA DE TRES BIOMASAS DE LA CAÑA DE AZÚCAR DISUELTAS EN LÍQUIDO IÓNICO Y PRECIPITADAS PARA LA OBTENCIÓN DE AZÚCARES FERMENTABLES**, presentado el estudiante universitario: **David Ortiz Peña**, y después de haber culminado las revisiones previas bajo la responsabilidad de las instancias correspondientes, autoriza la impresión del mismo.

IMPRÍMASE:

  
Ing. Pedro Antonio Aguilar Polanco  
Decano

Guatemala, abril de 2019

/gdech







## **ACTO QUE DEDICO A:**

### **Mis padres**

Virginia Leonor Peña Ortiz, Julio  
Roberto Cecilio Ortiz Mayorga.  
Gracias por todo su amor.

### **Mi esposa**

Roxana Chiquitó Tomás. Por todo  
su apoyo y amor y paciencia.

### **Mis hijos**

Sarah y Lucca. Por brindar tanta  
felicidad y motivación.



## **AGRADECIMIENTOS A:**

<b>Universidad de San Carlos de Guatemala</b>	Por terminar de formarme y ser un hogar, entre otras cosas.
<b>Facultad de Ingeniería</b>	Por ser una importante influencia en mi carrera, entre otras cosas.
<b>Mis amigos de la Facultad</b>	Paulina Maldonado, Paulo Vendrell, Darío Barraza, por el apoyo y compañerismo.
<b>Asesora</b>	Inga. Hilda Palma, por apoyarme en la realización del presente trabajo de graduación.





## ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES.....	III
LISTA DE SÍMBOLOS .....	V
GLOSARIO .....	VII
1. RESUMEN .....	.1
2. INTRODUCCIÓN .....	.3
3. ANTECEDENTES .....	.7
4. DEFINICIÓN DEL PROBLEMA.....	.15
5. JUSTIFICACIÓN.....	.21
6. OBJETIVOS.....	.25
7. NECESIDADES A CUBRIR Y ESQUEMA DE SOLUCIÓN.....	.27
8. MARCO TEÓRICO Y CONCEPTUAL.....	.29
9. PROPUESTA DE ÍNDICE DE CONTENIDO.....	.41
10. METODOLOGÍAS Y TÉCNICAS.....	.43
11. CRONOGRAMA.....	.53
12. FACTIBILIDAD DEL ESTUDIO.....	.55
13. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	.57
14. APÉNDICES.....	.63



## ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

### FIGURAS

1. Composición de biomasa .....	30
2. Estructura Celulosa.....	31
3. Componentes Hemicelulosa.....	32
4. Componentes Lignina.....	33
5. Esquema de hidrólisis .....	37
6. Formación de 5-Hidroximetil Furfural.....	39
7. Formación de Furfural.....	40
8. Esquema de disolución, precipitación e hidrólisis.....	47
9. Cronograma de trabajo.....	53

### TABLAS

I. Tratamientos previos a hidrólisis.....	34
II. Variables.....	44
III. Costos del estudio.....	55





## LISTA DE SÍMBOLOS

<b>Símbolo</b>	<b>Significado</b>
°C	Grados centígrados de temperatura
%	Porcentaje
g	Gramo
l	Litro
ha	Hectárea
Q	Quetzal



## GLOSARIO

<b>Azúcar Reductor</b>	Azúcares que poseen su grupo carbonilo (grupo funcional) intacto, y que a través del mismo pueden reaccionar como reductores con otras moléculas que actuarán como oxidantes.
<b>Biomasa</b>	Material orgánico degradable y no fosilizado que es originado de plantas, animales y microorganismos.
<b>Celulosa</b>	Polímero natural compuesto por moléculas de glucosa.
<b>Hemicelulosa</b>	Son heteropolisacáridos o polisacáridos compuestos por más de un tipo de monómero Forma parte de las paredes de las células vegetales
<b>Hidrólisis</b>	Proceso por el cual se transforman moléculas de gran tamaño en productos más sencillos y fácilmente degradables.
<b>Lignina</b>	La lignina es una clase de polímeros orgánicos complejos que forman materiales estructurales importantes en los tejidos de soporte de plantas vasculares y de algunas algas.

**Líquido iónico**

Fluido constituido exclusivamente por iones, considerándose como tales a las sales con una temperatura de fusión por debajo del punto de ebullición del agua

**Pretratamiento**

Procesos cuya función es hacer al material más susceptible y accesible para una etapa posterior.



## 1. RESUMEN

En el presente diseño de trabajo de graduación se llevará a cabo la evaluación de la reacción de hidrólisis ácida de 3 biomásas, subproductos resultantes del proceso de la industria azucarera, con el propósito de producir azúcares fermentables a partir de ellas. Se evaluará la conversión a azúcares reductores, glucosa e 5-hidroxi-metil-furfural (5HMF) y el porcentaje de pérdidas debido a un tratamiento previo a la hidrólisis realizado a las biomásas.

Se realizará un tratamiento previo a las biomásas con un líquido iónico que ha demostrado ser muy prometedor, ya que permite obtener altos rendimientos y altas selectividades hacia los productos deseados bajo condiciones de reacción de hidrólisis bastante leves, como baja concentración de ácido y baja temperatura y presión. Este tratamiento permite diseñar procesos más rentables, eficientes y con menor inversión inicial y mejor rendimiento. Y le da competitividad económica al aprovechamiento de estas biomásas para la producción de azúcares reductores versus la utilización de ellas para la producción de energía eléctrica.

El proceso que se pretende utilizar con el líquido iónico es un proceso de disolución y precipitación de la biomasa para separar el líquido iónico de la misma y poder reutilizarlo. Al disolver y precipitar las biomásas cambia su estructura polimérica y facilita el ataque del ácido.

Se llevará a cabo la determinación de azúcares reductores producidos por la hidrólisis para medir el rendimiento y selectividad de la reacción hacia esos productos y también se determinará el rendimiento y selectividad para el

5HMF 5-hidroxi-metil-furfural, que es un subproducto no deseado que se genera en la reacción y es inhibidor del crecimiento de los microorganismos fermentativos.

También se determinará la cantidad de azúcares reductores presentes en el agua utilizada para precipitar las biomásas, para conocer el porcentaje de pérdidas por este proceso de disolución y precipitación.

## 2. INTRODUCCIÓN

Entre los problemas actuales que enfrenta la humanidad están: el agotamiento no lejano de los combustibles fósiles, el cambio climático, la insuficiente producción de alimentos y la crisis energética mundial. La producción azucarera ha demostrado que es capaz de satisfacer parte de la alimentación directa a la humanidad. Muchos de sus derivados constituyen fuentes de alimentación animal, los que a su vez complementan la dieta proteica de los seres humanos. (Martínez; et al., 2013)

El bagazo de caña y otros residuos del proceso azucarero constituyen una fuente renovable de biomasa que es subutilizada, ya que se destina casi en su totalidad como combustible para la generación de energía eléctrica y puede ser utilizado para distintos fines, entre ellos es posible mencionar la alimentación animal con bagazo hidrolizado para mejorar su digestibilidad, producción de hongos comestibles, elaboración de biopolímeros degradables, mezclas con cemento y producción de etanol con fines energéticos y alimenticios.

La producción de etanol a partir de biomasa proveniente de la caña presenta un beneficio sinérgico para la industria azucarera debido a que la producción de alcohol es una parte que se encuentra ya integrada a la mayoría de dichas industrias, reduciendo así la inversión inicial requerida para el aprovechamiento de la materia prima y dando mayor versatilidad a la operación de la industria, por permitir elegir si el bagazo es utilizado para la producción energética o para la producción de etanol. Esta elección le permitiría maximizar sus ganancias a la industria dependiendo de las fluctuaciones de precio de

venta del alcohol y energía eléctrica, y del desarrollo tecnológico en los procesos de transformación de la biomasa.

La conversión de biomasa se realiza actualmente en instalaciones separadas, con capacidad de obtención de escasos productos, en las que no se explota todo el potencial económico que ofrece la biomasa. Sin embargo, las aplicaciones futuras de la biomasa estarán basadas en una única instalación, denominada biorrefinería integrada, donde se aprovecharán todas las fracciones y los subproductos de la biomasa para producir una gran variedad de productos que incluyen energía (electricidad, calor), biocombustibles, sustancias químicas y biomateriales. (Ragauskas; et al, 2006)

En el mundo se han llevado a cabo varios estudios para desarrollar la producción de bioetanol a partir de biomasa lignocelulósica. “Los materiales que más se han investigado son madera y residuos forestales, papel reciclado y residuos de la industria papelera, bagazo de caña, desechos agrícolas, así como residuos sólidos urbanos”. (Sánchez y Cardona, 2005).

Existen muchas dificultades en el desarrollo de tecnología de aprovechamiento de biomasa, “uno de los cuellos de botella más importantes en el aprovechamiento de la biomasa lignocelulósica es la dificultad de realizar de una manera efectiva y económica en la hidrólisis de la celulosa”. (Banerjee; et al., 2010).

Se han desarrollado distintos tratamientos previos de naturaleza física, química y biológica al material lignocelulósico, con el objetivo de modificar la estructura de la biomasa y hacer más efectiva y económica su transformación. Entre estas alternativas de pretratamiento destaca la disolución con líquidos iónicos (LI).



“Los LI o sales fundidas se definen como sales con un punto de fusión por debajo de 100 °C y que están formadas generalmente por un catión orgánico y un anión orgánico o inorgánico “(Pinkert y Marsh, 2009). Su característica más notable es su bajo punto de fusión debido a su estructura cristalina, y que son capaces algunos de disolver la celulosa.

Swatloski, Spear, Holbrey y Rogers (2012) encontraron que los cloruros de 1-alkil-3-metilimidazolio disolvían la celulosa y madera. La disolución de la celulosa o la biomasa lignocelulósica en LI facilita de una forma extraordinaria la hidrólisis de los biopolímeros (celulosa y hemicelulosa), debido a la eliminación de las barreras de protección estructurales, enlaces de Van der Wals y por puentes de hidrógeno de los centros de hidrólisis. Así, “una vez que se disuelve en líquido iónico, la hidrólisis ácida se produce incluso a temperaturas por debajo de 100 °C” (Morales; Campos, Fierro, 2012).

Los líquidos iónicos son solventes en desarrollo que tienen costos elevados, lo que hace imperativo que puedan ser recuperados si se desea diseñar un proceso económicamente viable. “La extracción es difícil porque los azúcares fermentables y los líquidos iónicos usados para disolver la biomasa, como el cloruro de 1-etil-3-metilimidazol ([EMIM]Cl), presentan solubilidades similares en diversos disolventes” (Sievers; et al., 2009). Es por esto por lo que se propone una estrategia diferente: “el tratamiento previo de la biomasa lignocelulósica mediante el uso de líquidos iónicos y posterior precipitación de la biomasa con un antidisolvente” (Morales; García, Fierro, 2015).

El tratamiento de biomasa lignocelulósica mediante el uso de líquidos iónicos puede reducir la cristalinidad de la celulosa presente en la biomasa, y eliminar o al menos reducir el sistema de protección de la lignina, y de esta forma favorecer la hidrólisis química a concentraciones muy bajas de ácido, y

por lo tanto aumentar el rendimiento de los azúcares fermentables. (Morales, 2015).

En el presente trabajo de graduación se evaluará la efectividad de la hidrólisis ácida a concentración baja y presión atmosférica de tres biomásas provenientes del bagazo de caña, disueltas en un líquido iónico y precipitadas. El trabajo se realizará utilizando equipo y biomasa de un ingenio azucarero de Guatemala en la región de Escuintla durante la zafra 2018-2019.

Las biomásas a analizar son bagazo de caña, hoja seca y hoja verde. Se comparará la hoja verde con la seca debido a que existe una disponibilidad de esta biomasa que no está siendo aprovechada. Actualmente alrededor del 50 % de la caña procesada por la industria azucarera se limpia en mesas de limpieza en seco y la tendencia es a aumentar esta cantidad. Dicha limpieza genera un subproducto de basura mineral con un alto contenido de hoja verde y caña (alrededor del 50 %), el cual puede ser tratado para recuperar esta biomasa y aprovecharla en un proceso posterior.

El informe final constará de los siguientes capítulos:

1. Caracterización de biomásas
2. Disolución e hidrólisis de biomásas
3. Medición de subproductos
4. Medición de pérdidas en agua
5. Presentación de resultados
6. Discusión de resultados

### 3. ANTECEDENTES

Con el propósito de aprovechar eficientemente los residuos lignocelulósicos agroindustriales se han hecho esfuerzos para transformarlos y obtener productos bioquímicos alimenticios y energéticos. La biomasa lignocelulósica es muy difícil de hidrolizar debido a la estructura polimérica de la lignina y hemicelulosa que envuelven a la celulosa. Se han estudiado distintos catalizadores y métodos de tratamiento previo de la biomasa para poder hacer efectiva esta hidrólisis. Los líquidos iónicos prometen ser una alternativa económicamente rentable y amigable con el medio ambiente para lograr la escalada a nivel industrial de la conversión del material lignocelulósico en etanol y otros productos.

Ramírez y Fraga (2010) realizaron un estudio en el que generaron modelos cinéticos para dos tratamientos previos a la hidrólisis del bagazo de caña utilizando pretratamiento con agua caliente líquida y con 3 distintos ácidos: ácido clorhídrico HCl, ácido sulfúrico H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> y ácido nítrico HNO<sub>3</sub>. Se generaron modelos cinéticos y se midieron las concentraciones de glucosa y xilosa obtenidas. El H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> diluido presenta menores tiempos de residencia de reacción. El ácido HCl presenta mejor conversión de azúcares, pero un tiempo de residencia muy alto, lo que lo hace poco atractivo.

Dominguez y otros autores (2011) realizaron un estudio de la cinética de la hidrólisis ácida catalizada con H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> del bagazo de caña de azúcar sin ningún tratamiento para la obtención de azúcares reductores. En dicho estudio se observó la influencia que tienen los parámetros de reacción de concentración del ácido, temperatura de reacción y tiempo de residencia a presión constante.

Se evidencia la necesidad de mantener la concentración del ácido, tiempo y temperatura bajos para evitar pérdidas de los productos deseados de la hidrólisis por conversión a otros productos. También se desarrolló un modelo cinético de la reacción. La contribución al presente trabajo radica en la necesidad de emplear condiciones de reacción moderadas para obtener mayor rendimiento y disminuir pérdidas por degradación a otros productos.

Dee y Bell (2011) llevaron a cabo un estudio de la hidrólisis ácida de celulosa disuelta en Líquidos Iónicos LI. En este se analiza la hidrólisis ácida *in situ* de celulosa disuelta en líquidos iónicos con distintos ácidos. Se analizan factores de reacción como el tiempo de reacción y la influencia de la temperatura, distintos tipos de ácido y la producción de productos y subproductos no deseados respecto al tiempo. Se obtuvieron rendimientos de glucosa del 33% aproximadamente para los ácidos con constantes de ionización negativas, tiempos de reacción de 100 minutos y rendimiento a Furfural del 20%. El aporte al presente trabajo de graduación radica en la selección del ácido sulfúrico como agente hidrolizante.

Chandler y otros autores (2012) estudiaron la hidrólisis ácida en dos etapas de bagazo de caña para producción de azúcares fermentables. Llevaron a cabo la hidrólisis ácida de bagazo de caña con ácido sulfúrico diluido a varias temperaturas y se evaluó el efecto que tiene la temperatura sobre la conversión a azúcares reductores y la producción de subproductos dañinos para los organismos fermentativos. Se mide la producción de estos productos en función de las condiciones de temperatura de la reacción y se evidencia que a mayores temperaturas existe mayor producción de subproductos. El aporte principal de este estudio al presente trabajo es la necesidad de llevar a cabo la reacción a la temperatura más baja posible que permita una alta conversión a productos con una baja generación de subproductos.

Albernas y otros autores (2012) realizaron un estudio de la evaluación económica de las alternativas de pretratamiento para la producción de etanol a partir de bagazo. En este estudio se evalúa la factibilidad económica de producir etanol a partir de bagazo de caña utilizando hidrólisis enzimática con dos pretratamientos, el primero hidrólisis ácida con  $H_2SO_4$  y el segundo de organosolvente con hidróxido de sodio NaOH. El artículo concluye que el costo de producción del etanol a partir de materiales lignocelulósicos es altamente sensible con respecto al precio de la enzima, y que se debe seguir investigando cómo hacer más rentables los pretratamientos al material lignocelulósico. La principal contribución al presente trabajo de graduación radica en la selección del método químico versus el método enzimático.

Pânzariu, Măluțan y Mangalagiu (2013) llevaron a cabo un estudio sobre la hidrólisis ácida en líquidos iónicos. En este estudio se evalúan la efectividad de disolver celulosa y residuo de semilla de canola en varios líquidos iónicos y se analiza el efecto pretratamientos, entre ellos el ácido sulfúrico antes de disolver el líquido iónico. El líquido iónico con mejor rendimiento para disolver la celulosa evaluado fue el cloruro de 1-butyl-3-methylimidazol. Se evaluó la estructura por espectroscopía infraroja con transformada de Fourier FTIR y se determinó que la biomasa y la celulosa no sufren degradación estructural por ser disueltas en el líquido iónico. El principal aporte al presente trabajo de graduación es el uso de líquidos iónicos para la disolución de biomasa para su hidrólisis.

Ungurean, Csanádi, Gubicza y Péter (2014) realizaron un estudio sobre la hidrólisis enzimática de celulosa y biomasa proveniente de residuos de algodón con disolución y precipitación previa con líquidos iónicos. Se obtuvieron rendimientos de azúcares en celulosa del 95 % y de la biomasa del 70 %, con tiempos de reacción de 24 horas. Se analizó el efecto de la reutilización del

disolvente y se determinó que su efectividad para disolver disminuyó conforme aumentaban los ciclos de reutilización. Se realizó una comparación entre usar enzima protegida por un gel y enzima sin protección. La enzima protegida por el gel demostró una mayor capacidad de reutilización aunque se obtuvo un rendimiento de azúcares menores. La importancia para el presente trabajo de graduación es comparar los resultados obtenidos por hidrólisis ácida y enzimática en cuanto a rendimiento y tiempos de reacción y el empleo del método de disolución-precipitación con LI.

Zumalacárregui, Pérez, Rodríguez, Zumalacárregui y Lombardi (2015) estudiaron la potencialidad del bagazo para la obtención de etanol frente a la generación de electricidad. Realizaron el cálculo para el balance de energía en la producción de etanol a partir de la hidrólisis del bagazo. Calcularon la pérdida de potencialidades de generación de energía eléctrica que ocasiona utilizar el bagazo para producir etanol en lugar de usarlo para generar electricidad.

Con la eficiencia actual de producción de etanol lignocelulósico se calcula la pérdida en 45-64 %. Se concluye que “la decisión de proceder a producir etanol o electricidad a partir de bagazo dependerá de la eficiencia de la transformación de las celulosas y hemicelulosas contenidas en el bagazo que hasta hoy son bajas, lo que no hace competitiva la producción de bioetanol a partir de materiales lignocelulósicos en comparación con la producción de electricidad en algunos países” (Zumalacárregui, 2015), depende del precio de venta del alcohol y energía eléctrica del país.. Cabe destacar que según el análisis realizado la producción de bioetanol tiene como resultado menores emisiones de CO<sub>2</sub> a la atmósfera. La mayor importancia de este estudio es la necesidad de optimizar el proceso de conversión lignocelulósica para competir con la producción de energía eléctrica por combustión de la misma.

De la Rosa (2015) realizó una tesis doctoral sobre la hidrólisis ácida de la celulosa y biomasa lignocelulósica asistida con líquidos iónicos para optar al grado de Doctora en Ciencias Químicas. En este trabajo se analizan las condiciones para optimizar la producción de azúcares fermentables por hidrólisis ácida de celulosa asistida con líquidos iónicos y aplican estos conocimientos a muestras de biomasa lignocelulósica.

Entre las condiciones que se analizan y optimizan están las condiciones de reacción de hidrólisis de celulosa y biomasa, la correlación entre fuerza del ácido y rendimiento de azúcares fermentables, el análisis de solubilidad de distintos líquidos iónicos, sales de imidazol y selección del más adecuado para hidrolizar celulosa y biomasa. Se caracterizaron fisicoquímicamente las muestras de celulosa y biomasa antes y después de la disolución en líquidos iónicos y se exploró el uso de catalizadores heterogéneos.

En las reacciones de hidrólisis aplicadas a biomasa lignocelulósica se obtuvieron conversiones en el rango de 86 a 95 % de los azúcares presentes en la biomasa y rendimiento a azúcares reductores de alrededor del 70 %. Los principales aportes a este trabajo son la selección del  $\text{H}_2\text{SO}_4$  como catalizador ácido, aportes de temperaturas y tiempos de disolución de la biomasa en el líquido iónico, selección del líquido iónico con mejor selectividad a productos deseados como el (EMIM) Cl cloruro de 1 Etil-3-Metil-Imidazol. También se dio la selección de la hidrólisis de celulosa regenerada tras su disolución en un líquido iónico como método a investigar y la selección de la temperatura de precipitación para obtener la celulosa regenerada.

Se analizaron distintas biomasa: paja de cebada, paja de trigo, ramón de olivo. Se evidencia la necesidad de evaluar el proceso de hidrólisis ácida

diluida de biomasa disuelta y regenerada en líquidos iónicos a distintas biombras provenientes del proceso industrial azucarero.

Widjaja, Agnesty, Sangian y Gunawan (2015) realizaron un estudio sobre un pretratamiento con el líquido iónico dietilfosfato de 1,3-dimetilimidazol e hidróxido de sodio para la hidrólisis ácida del bagazo de caña para producir etanol. Se realizó la regeneración de la celulosa en el bagazo mediante adición de antidisolventes, se concluye que el mejor antidisolvente evaluado es el agua. Se evaluaron parámetros de la disolución y cómo estos afectan la recuperación de azúcares en la precipitación. También se evalúa la efectividad del uso de líquido iónico reciclado y nuevo y se determina que poseen una efectividad similar. Se evaluaron recuperaciones de azúcares en la biomasa regenerada en conjunto con la hidrólisis y se obtuvieron valores de 55 %. El mayor aporte del estudio al presente trabajo es la utilización del antidisolvente agua y los parámetros de disolución de la biomasa en el LI.

Zhu y otros autores (2016) realizaron un estudio sobre la hidrólisis de biomasa lignocelulósica en líquidos iónicos para producción de etanol. En este estudio se describe cómo es llevada a cabo la obtención de azúcares fermentables a partir de la biomasa lignocelulósica actualmente. Se evidencian las desventajas de las dos rutas utilizadas, la hidrólisis ácida (concentrada y diluida) y la hidrólisis enzimática. El alto costo de equipos resistentes a la corrosión y el tratamiento y disposición del ácido y su baja conversión las hacen inviables, y en el caso de la hidrólisis enzimática el alto coste de los pretratamientos y de la enzima.

Por último, se presenta la hidrólisis ácida con líquidos iónicos en una sola etapa como una alternativa muy prometedora aún con ciertos retos tecnológicos como mejorar la selectividad de la reacción hacia los productos deseados,



separar los azúcares reductores obtenidos de los líquidos iónicos efectivamente, la toxicidad de los líquidos iónicos remanentes para los microorganismos y por último disminuir el costo de los líquidos iónicos. El mayor aporte al presente trabajo es la evidencia de la necesidad de realizar el proceso en dos etapas, debido a la dificultad de separación del LI con los productos de hidrólisis.

Liu, Li, Liu y Xu (2017) llevaron a cabo un estudio sobre la sacarificación de celulosa en líquidos iónicos y recuperación de glucosa. En este se llevaron a cabo hidrólisis ácidas diluidas en conjunto con 3 líquidos iónicos distintos. Se agregaron soluciones salinas para formar un sistema de dos fases y recuperar la glucosa de la solución de líquidos iónicos. Se obtuvieron recuperaciones del 90% de la glucosa en la fase rica. La importancia para este estudio radica en la dificultad de separar el producto del líquido iónico utilizado como solvente.

Kuroda y otros autores (2017) realizaron un estudio sobre la hidrólisis de lignocelulosa con líquidos iónicos ácidos bajo condiciones de baja toxicidad para microorganismos. En este se evaluó el efecto de utilizar un líquido iónico con un ión ácido para llevar a cabo la hidrólisis asistida con microondas, sin agregar otro ácido a la mezcla para bagazo de caña y biomasa de eucalipto y cedro japonés. Se determina que el líquido iónico ácido es tóxico para los microorganismos y se evalúan concentraciones distintas. Los autores determinaron a qué concentración podría sobrevivir un microorganismo similar a las levaduras (*Escherichia coli*).

Los tiempos de reacción obtenidos son largos y se requieren temperaturas altas de reacción. El rendimiento de glucosa fue del 48 % para el bagazo. La mayor contribución del estudio al presente trabajo es la evidencia de la toxicidad del líquido iónico a los microorganismos

fermentativos, por lo que es conveniente llevar a cabo la reacción en 2 fases separando previamente el LI.

En los estudios anteriores se evidencia la alta efectividad de los líquidos iónicos como un pretratamiento para facilitar la hidrólisis de materiales lignocelulósicos. El procedimiento de disolver la biomasa y luego regenerarla resulta muy atractivo si se quiere diseñar un proceso industrial rentable para llevar a cabo la conversión de la biomasa, ya que permite recuperar el líquido iónico y separarlo de los azúcares reductores finales. Este procedimiento es favorable también porque permite que la hidrólisis ácida se de en condiciones leves de reacción (concentración baja de ácido, temperatura baja, presión atmosférica). Estas condiciones leves de reacción permiten que se pueda diseñar un proceso más rentable. Por ello se evaluará dicho proceso y se obtendrán rendimientos de hidrólisis de biomasa de la industria azucarera y se obtendrán datos de rendimientos que permitirán diseñar procesos y hacer evaluaciones de factibilidad económica.

## **4. DEFINICIÓN DEL PROBLEMA**

### **4.1 Descripción del problema**

El bagazo y la paja u hoja seca de la caña se utilizan como combustible en la industria azucarera, se queman en las calderas para producir vapor y generar energía. El bagazo se obtiene del proceso de extracción del jugo de la caña y la hoja seca se obtiene del campo posterior a la cosecha de la caña. Esta energía hace a la fábrica azucarera autosustentable energéticamente y provee un excedente para la venta. Este destino que se le da a estos residuos del proceso industrial supone un subaprovechamiento de esta materia prima que puede ser utilizada para producción de etanol que ya es una parte integral del proceso azucarero y producción de varios subproductos de valor agregado con un impacto menor en las emisiones de CO<sub>2</sub> al ambiente. Este alcohol se destina a la producción energética y a la elaboración de bebidas, alimentos o procesos industriales.

Existe otra situación actual que genera un residuo subutilizado en la industria azucarera guatemalteca: la hoja o paja de caña verde y seca. El origen de este desecho se explica a continuación: al recibirse la caña en el ingenio se le aplica agua en la mesa donde es descargada. A pesar de los beneficios de la aplicación de agua para limpiar la caña, el contacto del agua de lavado en las superficies expuestas de la caña produce pérdidas de sacarosa. El procedimiento de limpieza por lavado con agua tiene un significativo impacto ambiental, por generar un caudal de agua portadora de materia sólida en

suspensión, lo cual requiere de un sistema de eliminación de dichos sólidos, con un costo significativo.

Por tal razón la tendencia en los últimos años es eliminar el lavado de la caña con agua y se han instalado otros medios y sistemas para la limpieza de esta en seco (vibradores, cortinas de aire, transportadores, disposición de la basura para retornarla a los campos, etcétera). (Melgar, Meneses, Orozco, Pérez y Espinoza, 2012).

Esta basura presente en la caña “representa alrededor del 2 % del peso en caña molido y tiene un contenido significativo de trozos de caña y hojas verdes y secas (30 y 20 % aproximadamente).” (Melgar; et-al, 2012). Cuando se recibe caña que ha sido cosechada mecanizadamente, el porcentaje aumenta a un 40 % de caña en la basura y 25 % de hoja aproximadamente (según el laboratorio de aseguramiento de calidad de un ingenio azucarero). Esto genera la posibilidad de implementar un proceso de separación de la biomasa presente en la basura separada y su utilización en conjunto con las otras biomásas para la producción de etanol y otros productos. Existe una tendencia en el país y en la industria azucarera a aumentar la cantidad de caña cosechada mecanizadamente. Esta tendencia aumentará la disponibilidad de esta biomasa a futuro.

Este tipo de cosecha mecanizada en la zafra 2010/2011 en Guatemala se realizó en 30,080 ha, lo que representó un 14 % de la caña cosechada. La mayoría de esta caña fue cosechada en verde (90 %). (Melgar; et-al, 2012). La caña mecanizada es cosechada en verde, sin quemar, debido a que sufre mayor deterioro microbilógico por tener mayor área de contacto, si además de eso se quema el deterioro es mucho mayor.

Con la perspectiva de producir etanol a partir de bagazo (Galbe y Zacchi, 2002), se produce una competencia por este residuo de la producción de azúcar de caña. Con el desarrollo tecnológico actual alcanzado en la obtención del etanol a partir de materiales lignocelulósicos (Souza y Grandis, 2014) y los niveles de rendimiento que se logran, no es posible todavía utilizar el etanol para generar electricidad en la industria azucarera (Cardona y Sánchez, 2006).

Elevar el rendimiento de conversión de la biomasa a azúcares fermentables es un gran reto para la industria, no solo para producir etanol y utilizarlo como combustible, sino también para maximizar los ingresos al poder destinar biomasa a la producción de etanol de segunda generación, incrementando la producción regular de alcohol de los ingenios, dependiendo de los precios de venta del etanol y la energía eléctrica y de los rendimientos de los procesos. Se han desarrollado métodos de tratamiento previos aplicados a la biomasa con el objetivo de debilitar la estructura formada por la hemicelulosa y la lignina, y tener un mejor acceso a la celulosa para su hidrólisis. Estos incluyen métodos físicos (que son prohibitivos por el costo), químicos y biológicos.

La investigación respecto a la hidrólisis de biomasa se ha incrementado recientemente desde el descubrimiento de que los líquidos iónicos (LI) eran capaces de disolver la celulosa y biomásas. Se han desarrollado varias técnicas para utilizar los LI para hidrolizar eficientemente la biomasa. Uno de estos métodos muy prometedor consiste en precipitar la celulosa disuelta agregando un antidisolvente e hidrolizar posteriormente esta celulosa regenerada. De esta manera el LI ya no se encuentra presente en la reacción de hidrólisis y esto resuelve la dificultad de separar el LI de los azúcares producidos, y la necesidad de recuperar en su totalidad el LI.

## **4.2 Formulación del problema**

Se evaluará la reacción de hidrólisis ácida de bagazo, hoja seca y verde, regeneradas tras ser disueltas en un líquido iónico sobre la conversión a azúcares reductores y glucosa a presión atmosférica y su generación de algunos subproductos no deseados. El hecho de trabajar a presión atmosférica disminuye los costos del equipo, simplifica los procesos y permite minimizar la producción de productos no deseados en la fermentación.

### **4.2.1 Pregunta principal**

¿Cuál es el grado de conversión de biomasa a azúcares reductores y 5HMF en la reacción de hidrólisis para las tres biomásas de caña de azúcar disueltas en líquido iónico y precipitadas?

#### 4.2.2 Preguntas secundarias

- ¿Cuál es la composición inicial de las biomásas de caña de azúcar en cuanto a su contenido de celulosa, hemicelulosa, lignina y azúcares reductores?
- ¿Cuál es la cantidad de azúcares reductores producidos en la hidrólisis que permite calcular el rendimiento y selectividad hacia este producto para las distintas biomásas?
- ¿Cuál es la cantidad de glucosa producida en la hidrólisis que permite calcular el rendimiento y selectividad hacia este producto para las distintas biomásas?
- ¿Cuál es la cantidad de hidroximetil furfural producido en la hidrólisis que permite calcular el rendimiento y selectividad hacia este producto para las distintas biomásas?
- ¿Cuál es la cantidad de azúcares reductores que permite calcular el porcentaje de dicho producto que se pierde durante la disolución y precipitación de la biomasa en el líquido iónico?

### **4.3 Delimitación del problema**

Se evaluará la reacción de hidrólisis ácida diluida con  $H_2SO_4$  durante dos horas a temperatura de ebullición con reflujo y condiciones de presión atmosférica a biomasa de caña de un ingenio azucarero de la región de Escuintla en Guatemala, durante la zafra 2018-2019 a nivel de prueba de laboratorio. La biomasa será disuelta usando el líquido iónico cloruro de 1-Etil-3-metilimidazol y precipitada agregando agua como antidisolvente. Se utilizarán 3 tipos distintos de biomasa: bagazo, hoja seca y hoja verde, se evaluará el rendimiento a azúcares reductores obtenido en la hidrólisis y se cuantificará la generación de hidroximetil-furfural, subproducto que inhibe el crecimiento de los microorganismos fermentativos en etapas posteriores.



## 5. JUSTIFICACIÓN

El presente trabajo de graduación se presenta en la línea de investigación de desarrollo de líneas de producción que utilicen materias primas subutilizadas en la industria de alimentos, de la Maestría en Ciencia y Tecnología de Alimentos.

En Guatemala la disponibilidad de biomasa es alta debido a la alta producción de desechos agropecuarios que se producen de la actividad del país, uno de los desechos con alta disponibilidad en el país es el bagazo de caña de azúcar. Este es un material lignocelulósico constituido principalmente por celulosa (38-50 %), hemicelulosa (17-32 %) y lignina (15-30 %). Se obtiene como subproducto de la molienda de caña de azúcar (*Saccharum Officinarum*) en los centrales azucareros y representa aproximadamente entre el 25 y 40 % del total de materia procesada, dependiendo del contenido de fibra de la caña y la eficiencia en la extracción del jugo. (Pernalet, Piña, Suárez, Ferrer y Aiello, 2008)

La producción nacional de caña alcanzó las 28.67 millones de toneladas métricas en el 2015 (AZASGUA, CENGICAÑA, 2015) lo cual da una disponibilidad anual de entre 7.2 y 11.5 millones de toneladas anuales en el país de bagazo de caña. Adicionalmente se tendrían de 143 mil a 287 mil toneladas de biomasa adicional si se separara la biomasa presente en la basura de la caña de acuerdo a los porcentajes de basura, de caña y hoja presente en dicha basura. Esto es asumiendo que de toda la caña que se procesa en Guatemala el 50 % se procesa con limpieza en seco. Este porcentaje estimado está bastante cercano a la realidad, ya que los ingenios más grandes procesan

el 100 % o el 50 % de su caña de esta manera, y existe tendencia a aumentar (se está montando uno de estos sistemas actualmente en un ingenio).

El cultivo de la caña de azúcar ocupa una superficie de 283,898.85 hectáreas en Guatemala (2015). A nivel de América Latina y El Caribe, Guatemala es el segundo productor y a nivel mundial es el cuarto país exportador y el tercer productor por hectárea (PNUD, 2016).

Según ASAZGUA (Asociación de Azucareros de Guatemala) el cultivo del azúcar crea 425,000 empleos de forma directa e indirecta, de los cuales 32,000 son de cortadores de caña. Además de representar el 3 % del PIB nacional y el 15.36 % de las exportaciones totales de Guatemala (PNUD, 2016).

La industria de la caña de azúcar utiliza el bagazo de la caña para la producción del 25 % de la energía eléctrica en la época de zafra en el Sistema Nacional Interconectado -SNI-. Además, se ha convertido en uno de los principales fabricantes de alcohol originado en Centro América (PNUD, 2016).

En las fábricas de azúcar de caña el bagazo se ha utilizado como combustible, quemándose en los generadores de vapor y evitando el consumo de petróleo. Con la perspectiva de producir etanol a partir de bagazo (Galbe y Zacchi, 2002), se produce una competencia por este residuo de la producción de azúcar de caña.

Si se desea implementar un proceso rentable a nivel industrial para producir etanol a partir del bagazo, es necesario desarrollar y optimizar las tecnologías existentes y emergentes de transformación de biomasa lignocelulósica para que se pueda destinar bagazo a la producción de etanol

para bebidas y alimentos y poder competir con el uso del bagazo para producción energética.

Por otro lado, las emisiones de CO<sub>2</sub> disminuyen si se produce etanol a partir del bagazo, aun cuando se quemó la lignina y el biogás para producir mayor cantidad de energía, de donde la alternativa de producción de etanol a partir del bagazo es beneficiosa desde el punto de vista ambiental. (Zumalacárregui; et al, 2015).

Otro aspecto que no ha sido considerado en investigaciones previas es que el bagazo que se obtiene de la extracción del jugo de la caña todavía posee entre un 0.5 y 2 % de sacarosa que se quema en las calderas y provoca incrustaciones. Si se utiliza este bagazo para producir azúcares fermentables, la sacarosa presente todavía en el bagazo es otra fuente de esos azúcares al ser hidrolizada en glucosa y fructosa.

La justificación de este trabajo radica en poder comparar la hidrólisis de 3 biomásas distintas de residuos de caña: bagazo, hoja seca y hoja verde, para obtener datos de rendimiento de hidrólisis ácida diluida de estas biomásas previamente disueltas en un líquido iónico y precipitadas. Estos datos se utilizan para diseñar procesos y evaluar factibilidad económica de la producción de etanol a partir de bagazo. La versatilidad que da el procedimiento elegido es que se logra separar el líquido iónico en un paso previo a la hidrólisis y de esta manera no se tiene que separar de los azúcares reductores obtenidos en la posterior hidrólisis. La biomasa regenerada se hidrolizará a presión atmosférica, temperatura baja y concentración de ácido igualmente baja. Estas condiciones leves de reacción permiten reducir los costos iniciales del equipo por trabajar a presión atmosférica y soportar menor corrosión. También disminuyen la producción de subproductos que inhiben el proceso de fermentación.



## 6. OBJETIVOS

### 6.1 Objetivo general

Evaluar el grado de conversión de biomasa en azúcares de 5-hidroximetilfurfural en la hidrólisis ácida de tres biomásas de caña de azúcar disueltas en un líquido iónico y precipitadas.

### 6.2 Específicos

1. Evaluar la composición inicial de tres biomásas de caña de azúcar (bagazo, hoja seca y hoja verde) en cuanto a su contenido de celulosa, hemicelulosa, lignina y azúcares reductores presentes.
2. Evaluar el rendimiento y selectividad de la reacción de hidrólisis con base en la cantidad de azúcares reductores producida para las distintas biomásas.
3. Evaluar el rendimiento y selectividad de la reacción de hidrólisis con base en la cantidad de glucosa producida para las distintas biomásas.
4. Evaluar el rendimiento y selectividad de la reacción de hidrólisis con base en la medición de la formación del inhibidor 5-Hidroxi-meti-Furfural.
5. Calcular el porcentaje de pérdidas en el proceso de disolución en función del contenido de azúcares reductores en el agua utilizada para precipitar la biomasa disuelta.



## 7. NECESIDADES A CUBRIR Y ESQUEMA DE SOLUCIÓN

En el presente trabajo se evaluará la reacción de hidrólisis ácida para tres biomásas distintas bagazo de caña, hoja seca y hoja verde. Las biomásas serán homogeneizadas a un tamaño estándar y caracterizadas en cuanto a su contenido de hemicelulosa, celulosa y lignina, mediante el método de fibra ácido detergente neutro detergente y lignina neutrodetergente propuesto por Goering y Van Soest (1970) en el trabajo *Forage fiber analysis*. Departamento de agricultura de Estados Unidos. Manual de agricultura 379,120. Y en cuanto a su contenido inicial de sacarosa que provee azúcares reductores también, el análisis de fibra será realizado mediante análisis proximal por el Laboratorio de Bromatología de la Facultad de Veterinaria de la Universidad de San Carlos de Guatemala. El contenido de sacarosa se determinará mediante polarimetría en el laboratorio de aseguramiento de calidad de un ingenio azucarero. Las biomásas serán disueltas previo a la hidrólisis utilizando el líquido iónico cloruro de 1etil-3-metil imidazol (EMIM)Cl y luego precipitadas utilizando agua como antisolvente.

Se determinará la cantidad de azúcares reductores presentes en las aguas de lavado por el método ICUMSA GS1/3/7-3 (2005) en el laboratorio de aseguramiento de calidad de un ingenio azucarero en Escuintla, para calcular las pérdidas ocasionadas por el proceso de disolución de las biomásas. La hidrólisis será llevada a cabo a presión atmosférica con ácido sulfúrico  $H_2SO_4$  diluido a temperatura de ebullición y con reflujo.

Después de transcurrido el tiempo de la reacción de hidrólisis esta será detenida por enfriamiento súbito mediante inmersión en baño maría de agua y

hielo. Serán determinados los azúcares reductores presentes al final de la reacción por el método ICUMSA GS1/3/7-3 (2005) en el laboratorio de aseguramiento de calidad de un ingenio azucarero en Escuintla.

Se determinará el contenido de glucosa al concluir la reacción por medio de cromatografía líquida de alta precisión HPLC, método ICUMSA GS7/4/8-23 (2011). La determinación se llevará a cabo en el laboratorio de aseguramiento de calidad de un ingenio azucarero en Escuintla. Y también se determinará la cantidad de hidroximetil-furfural producido a partir de la degradación de pentosas. Este subproducto de la reacción hidrolítica inhibe el crecimiento de microorganismos fermentativos y disminuye el rendimiento de azúcares.

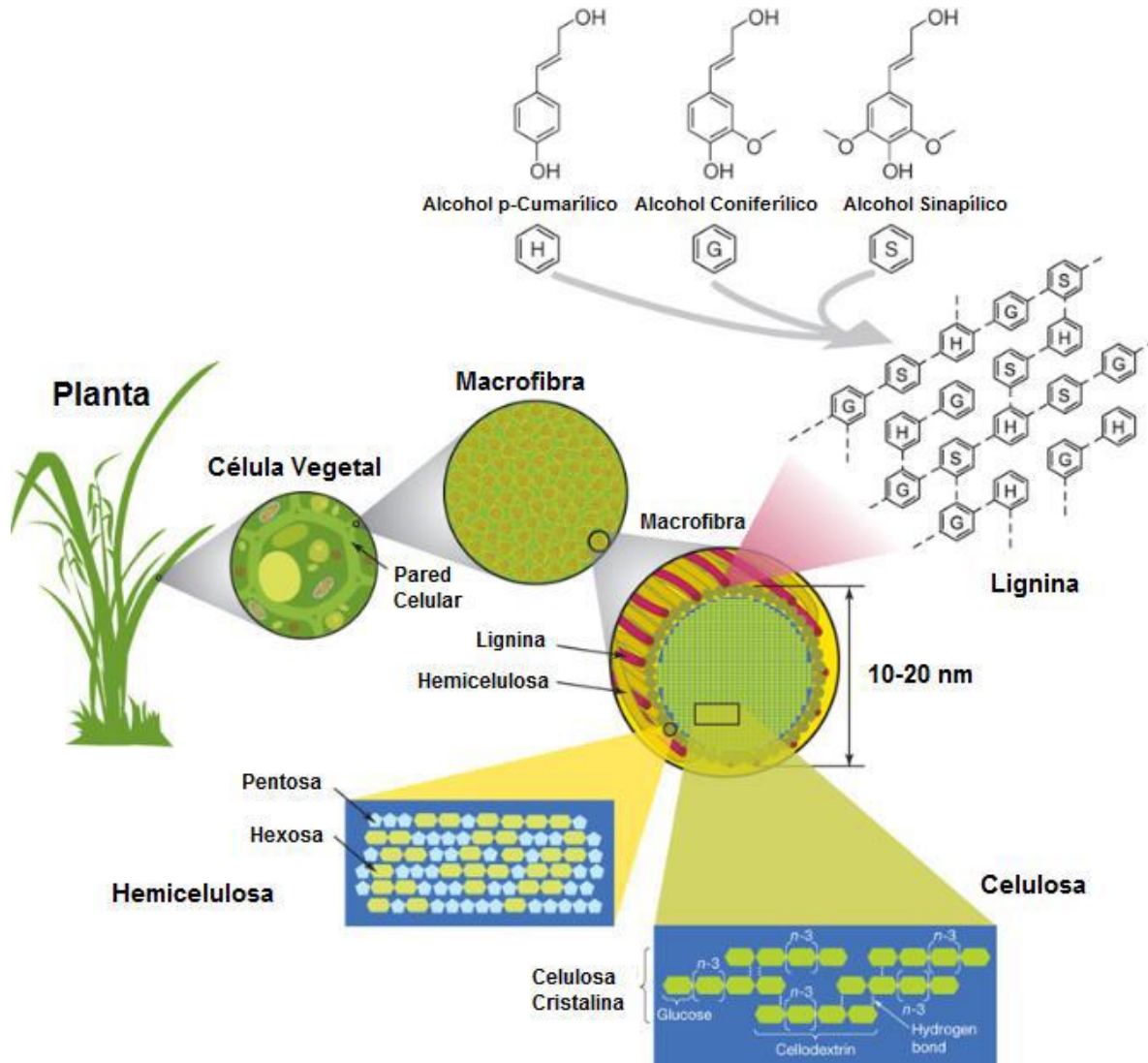


## **8. MARCO TEÓRICO Y CONCEPTUAL**

La caña de azúcar se utiliza en la industria azucarera para producir azúcar y alcohol. El bagazo sobrante se utiliza para la generación de energía eléctrica quemándolo en calderas. Esto constituye un subaprovechamiento de este subproducto, el cual puede ser utilizado para producir alcohol y otros productos. El bagazo de caña es básicamente la fibra de los tallos de la planta y se constituye de material lignocelulósico.

La biomasa lignocelulósica de origen vegetal está constituida por tejidos de los vegetales cuyas células presentan una pared celular constituida a su vez por un entramado de microfibrillas de celulosa, formando capas recubiertas de hemicelulosa y sobre las que se deposita la lignina (Rubin, 2009).

Figura 1. Composición de biomasa

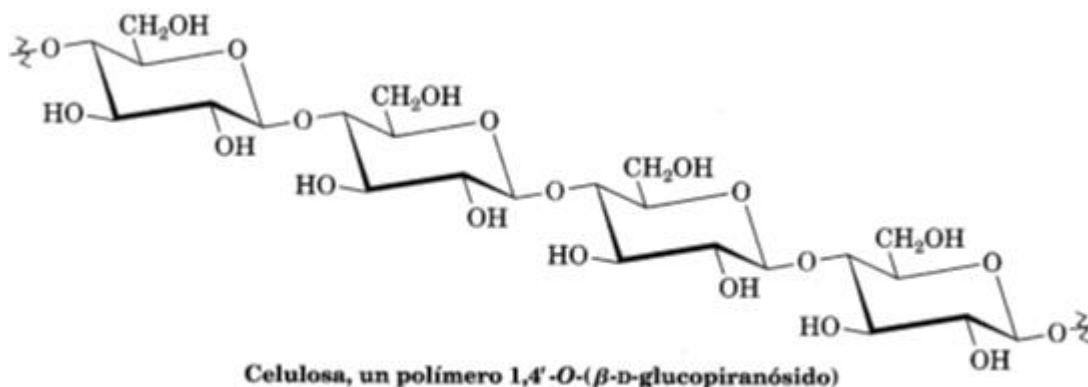


Fuente: adaptado de Rubin, E. (2009). *Genómica de biocombustibles celulósicos*.

- Celulosa

La celulosa “consta de varios millares de unidades de D-glucosa enlazadas por uniones 1,4'- $\beta$ -glicosídicas como las de la celobiosa. Diferentes moléculas de celulosa interactúan y forman una gran estructura agregada mantenida por enlaces de hidrógeno.” (Laboratorio de Ciencias Altazor, 2012)

Figura 2. **Estructura Celulosa**



Fuente: McMurry, J. (2012). *Química Orgánica*.

- Hemicelulosa

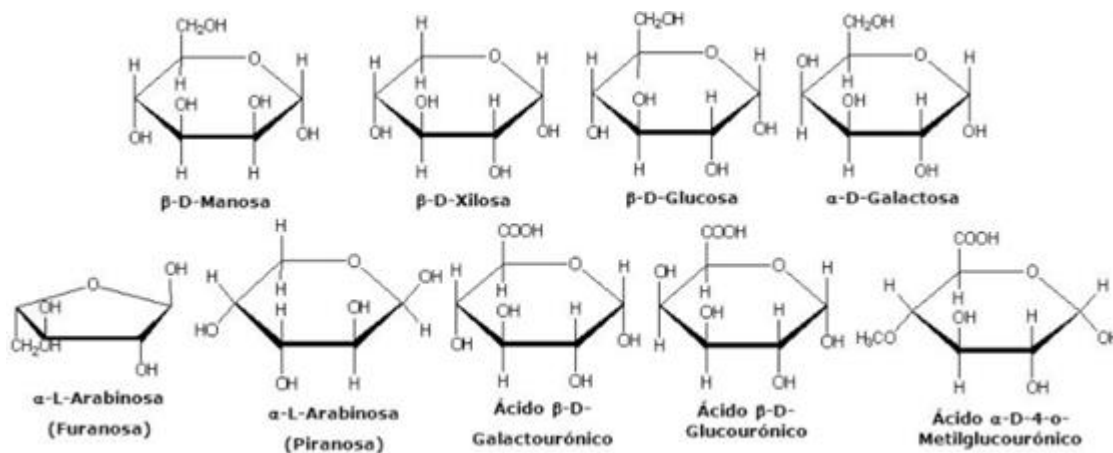
A diferencia de la celulosa, la hemicelulosa o poliosa está compuesta por diferentes azúcares formando cadenas más cortas y ramificadas.

Estos azúcares se pueden dividir en diferentes grupos como las pentosas (xilosa, arabinosa), hexosas (glucosa, manosa, galactosa), ácidos hexurónicos (ácido glucurónico, metil-glucurónico y galacturónico) y deoxihexosas (ramnosa y fucosa). La cadena principal de una poliosa puede consistir en una sola unidad (homopolímero), como por ejemplo los glucomananos. El contenido de

hemicelulosa, tanto por cantidad como por variedad difiere mucho en función de las especies. (Miguélez, 2016).

La naturaleza ramificada de la hemicelulosa implica que tiene una estructura menos cristalina y más fácil de hidrolizar que la celulosa.

Figura 3. Componentes Hemicelulosa

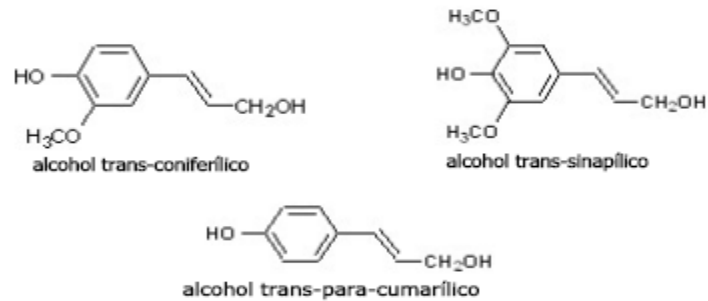


Fuente: McMurry, J. (2012). *Química Orgánica*.

- Lignina

Después de la celulosa, la lignina es el polímero más abundante en el mundo vegetal y su función es proporcionar rigidez a la pared celular, asegurar protección contra la humedad, los agentes atmosféricos y el ataque de microorganismos, además de actuar como elemento de unión de las fibras de celulosa. La lignina es un compuesto formado por un tipo de moléculas distintas de los azúcares. Químicamente, es un polímero tridimensional amorfo constituido a partir de unidades de fenilpropano que se unen entre sí por enlaces tipo alquil-aril-éter o carbono-carbono. (Miguélez, 2016). La lignina “es derivada de la polimerización deshidrogenativa de tres alcoholes.” (Nogués, 2010)

Figura 4. Componentes Lignina



Fuente: Nogués, F. (2010). *Energía de la biomasa*.

El aprovechamiento de la biomasa lignocelulósica está limitado por la dificultad de hidrólisis de la misma para obtener diversos productos, por lo que se han diseñado distintos tratamientos previos a la hidrólisis para facilitar la misma. A continuación se detallan los tratamientos más prometedores y sus ventajas y desventajas:

Tabla I. Tratamientos previos a hidrólisis

Método de Pretratamiento	Rendimiento de azúcares	Formación de inhibidores	Formación de Subproductos	Rehusos de químicos	Aplicabilidad a distintas materias primas	Costo de Equipo	Éxito en plantas piloto	Ventajas	Limitaciones y desventajas
Mecánico	B	Cero	No	No	Si	A	Si	Reduce Cristalinidad de Celulosa	Alto consumo de potencia
Ácidos								celulosa y hemicelulosa altera estructura de Lignina	Peligroso, toxico y corrosivo
Minerales	A	A	A	Si	Si	A	Si	Remoción de Lignina y hemicelulosa incrementa Area superficial	residencia, sales irre recuperables formadas
Álcalis	A	B	A	Si	Si	Cero	Si	Hemicelulosa haciendo accesible la celulosa a enzimas	residencia, menor remoción de lignina
Agua caliente líquida	A	A	B	No	-	-	Si		Separación de solventes y rehusos
Organosolventes	A	A	A	Si	Si	A	Si	Hidroliza hemicelulosa disuelve hemicelulosa y des cristaliza celulosa	
Oxidación Húmeda	A o B	Cero	B	No	-	A	-		Se requieren cantidades grandes de ozono
Ozonólisis	A	B	A	No	-	A	No	Reduce contenido de lignina, sin residuos tóxicos	
Explosión de CO2	A	B	B	No	-	A	-	Remoción de hemicelulosa y des cristalización bajo costo	No modifica lignina Incompleta destrucción de matriz de carbohidratos de la lignina.
Explosión de Vapor	A	A	B	-	Si	A	Si	Remoción de Hemicelulosa y alteración de estructura lignina	
Explosión con Amoníaco	A	B	-	Si	-	A	-	Remoción de Lignina y hemicelulosa incrementa Area superficial	para biomasa con alto contenido lignina
Líquidos lónicos	A o B	B	-	Si	Si	-	-	Disolución de celulosa, disponibilidad aumentada a celulasas	Etapas iniciales de desarrollo

A= Alto , B= Bajo

Fuente: Menon, V.; Rao, M. (2012). *Trends in bioconversion of lignocellulose: biofuels, platform chemicals & biorefinery concept.*

- Líquidos iónicos (LI)

Cuando un compuesto iónico se encuentra en fase líquida se dispone de un líquido que está constituido exclusivamente por iones. El cloruro sódico disuelto en agua no es un líquido iónico porque el agua es el disolvente molecular de los iones que forman la disolución. Sin embargo, el cloruro sódico fundido es un líquido iónico porque es un líquido formado únicamente por iones. La temperatura a la que este compuesto se encuentra en fase líquida es de unos 800 °C, demasiado elevada para efectuar la mayor parte de las reacciones químicas. Además es excesivamente reactivo para que se comporte como mero disolvente. Por ello, a pesar de ser un líquido iónico, sus propiedades impiden que pueda emplearse como un medio líquido para efectuar transformaciones químicas. (Bustos, 2016)

Las sales fundidas son líquidos que están constituidos por iones, pero debido a su elevada temperatura de fusión, gran poder de corrosión y alta viscosidad, no pueden utilizarse como fase líquida para efectuar reacciones químicas. Por esta razón el término de líquido iónico no se utiliza, a pesar de que formalmente lo son, para designar a las sales fundidas. Con este término, se designa a otros compuestos que también son líquidos formados exclusivamente por iones pero sus propiedades son muy diferentes a las que tienen los líquidos procedentes de sales fundidas. (Salvador, 2008)

Recientemente ha surgido una nueva clase de solventes conocidos como líquidos iónicos (LI). Respecto a su composición química puede decirse, en general, que “están constituidos por cationes orgánicos y aniones poliatómicos, muy asimétricos y voluminosos, unidos por fuerzas atractivas más débiles que las sales iónicas convencionales” (Bustos, 2016), lo cual proporciona sus bajos puntos de fusión y les permite ser líquidos a temperaturas menores que las

sales iónicas convencionales. “La mayor parte de los cationes tienen naturaleza aromática con átomos de nitrógeno en el anillo y heterociclos nitrogenados.” (Bustos, 2016)

La ionización de dichos líquidos se presenta en la siguiente reacción donde R es el catión aromático y A el anión normalmente poliatómico:



En el caso ideal los líquidos iónicos son no-volátiles, no inflamables, tienen alta estabilidad térmica y son baratos y fáciles de fabricar. Muchos LI cumplen estos requerimientos y son líquidos en un rango amplio de temperatura (algunos pueden exceder los 300 °C). (Huddleston; et al, 2001)

“En 2002 se informó que los LI son eficaces solventes para la disolución de la celulosa. Este trabajo es uno de los más citados en la literatura” (Dopico-Ramírez, 2013). Desde entonces, se han logrado avances significativos en la separación de los componentes del material lignocelulósico.

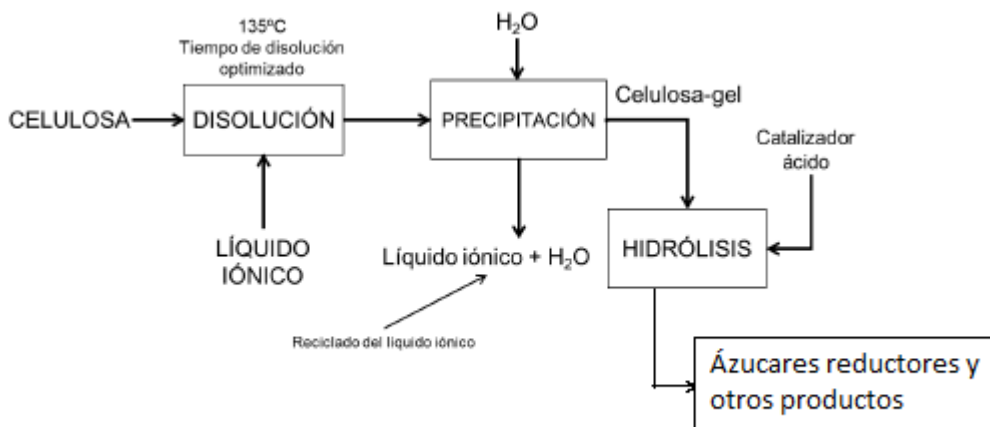
Es muy difícil la separación de los azúcares producidos de los LI, además la recuperación cuantitativa del LI es un punto muy importante para la rentabilidad del proceso debido a su elevado precio, y la presencia de pequeñas cantidades LI en las disoluciones de azúcares pueden afectar a procesos aguas abajo como la fermentación. Por esta razón, se decidió adoptar una estrategia diferente: por una parte se produce el tratamiento de la celulosa o biomasa lignocelulósica y por otra la hidrólisis de la celulosa. (De la Rosa, 2015)

Se ha estudiado la mejora del rendimiento de la glucosa tanto en la celulosa microgranular como fibrosa y biomasas mediante un proceso en tres



pasos: 1) disolución de celulosa en un LI, 2) la precipitación de la celulosa con un antidisolvente (agua), y 3) la hidrólisis de la celulosa resultante. (De la Rosa, 2015). De acuerdo a la siguiente figura:

Figura 5. Esquema de hidrólisis



Fuente: adaptado de De la Rosa, S. (2015). *Hidrólisis ácida de celulosa y biomasa lignocelulósica asistida con líquidos iónicos*.

Este procedimiento de disolución, precipitación presenta una ventaja sobre hacer la hidrólisis en el solvente "La ventaja de precipitar la celulosa es que el LI puede ser recuperado completamente y por lo tanto no está presente durante la etapa de hidrólisis" (De la Rosa, 2015).

Al disolver y precipitar la biomasa, cambiamos su morfología, lo que la hace más susceptible del ataque del ácido "La morfología de la celulosa reconstruida ofrece una textura altamente porosa con una mayor área de superficie expuesta, siendo así más propensa al ataque por ácidos minerales u orgánicos y haciendo más fácil la hidrólisis ácida" (De la Rosa, 2015).

El objetivo de la hidrólisis del material lignocelulósico es romper el mismo en sus constituyentes monoméricos para poder ser aprovechados posteriormente en otros procesos. La hidrólisis total de la celulosa produce

unidades de glucosa que se aprovechan para producir alcohol con vía fermentativa, la hidrólisis de la hemicelulosa produce sus azúcares monoméricos constituyentes que también se aprovechan para producir alcohol por vía fermentativa. Los productos de estas reacciones se pueden medir como azúcares reductores totales.

- Azúcar reductor

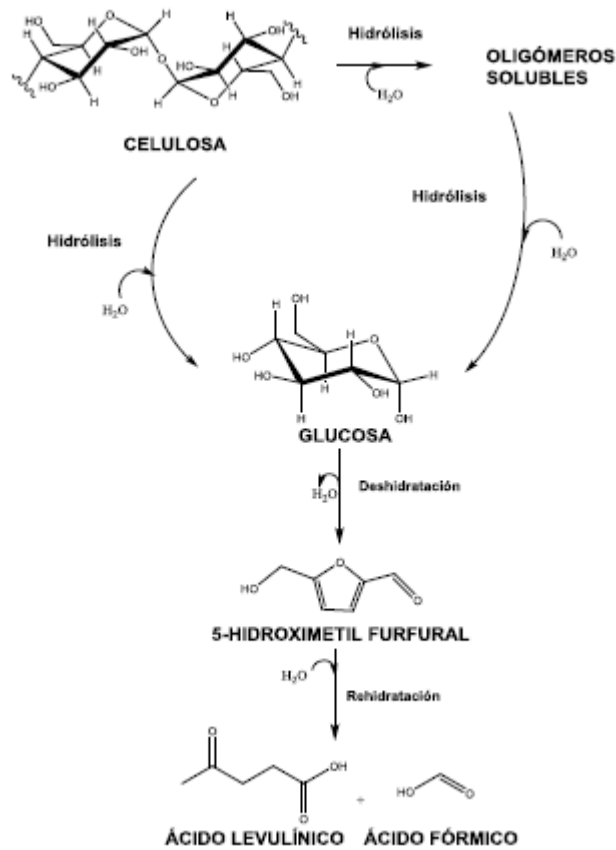
Como otros aldehídos, las aldosas se oxidan con facilidad y producen los ácidos carboxílicos correspondientes, que se denominan ácidos aldónicos. Las aldosas reaccionan con el reactivo de Tollens ( $\text{Ag}^+$  en  $\text{NH}_3$  acuoso), con el reactivo de Fehling ( $\text{Cu}^{2+}$  en tartrato de sodio acuoso) o con el reactivo de Benedict ( $\text{Cu}^{2+}$  en citrato de sodio acuoso) y producen azúcar oxidada y el ión metálico reducido. Las tres reacciones sirven como pruebas químicas sencillas de los azúcares reductores (reductor porque el azúcar reduce al agente oxidante). Si se utiliza el reactivo de Tollens, se produce plata metálica como un espejo brillante sobre las paredes del matraz de reacción o el tubo de ensayo. Si se emplea el reactivo de Fehling o el de Benedict, un precipitado rojizo de óxido cuproso  $\text{Cu}_2\text{O}$  es la señal de un resultado positivo. (McMurry, 2012).

Los azúcares reductores son aquellos azúcares que poseen su grupo carbonilo (grupo funcional) intacto, y que a través del mismo pueden reaccionar como reductores (dadores de electrones) con otras moléculas que actuarán como oxidantes (aceptando electrones). Esta propiedad permite determinar la concentración de una disolución de azúcar midiendo la cantidad de agente oxidante que es reducido. (Lehninger, 1988).

En las reacciones de hidrólisis del material lignocelulósico se pueden formar subproductos que son dañinos para los organismos fermentativos y son

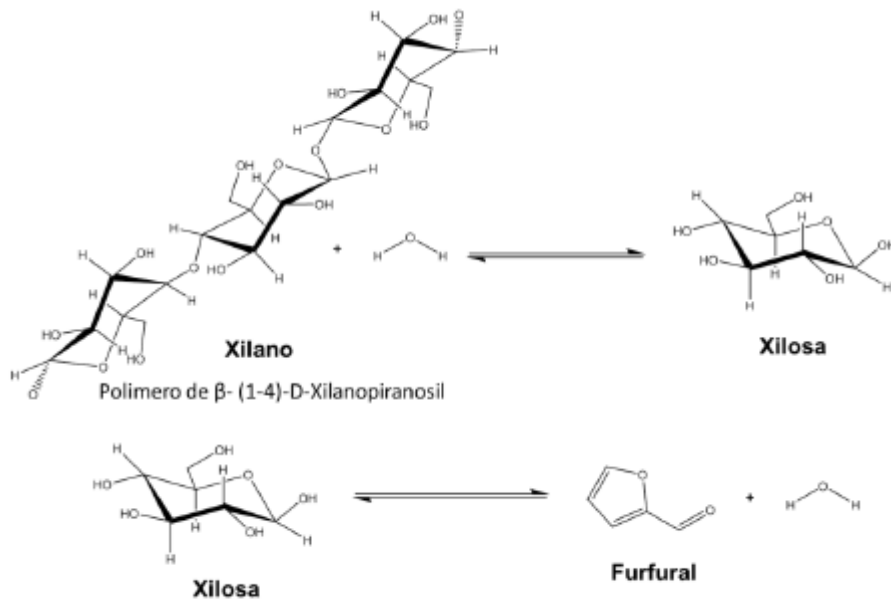
no deseados en procesos posteriores, la degradación de las pentosas produce furfural y la de las hexoxas 5-hidroximetil furfural, cuya formación se da por las siguientes vías:

Figura 6. Formación de 5-Hidroximetil Furfural



Fuente: De la Rosa, S. (2015). *Hidrólisis ácida de celulosa y biomasa lignocelulósica asistida con líquidos iónicos.*

Figura 7. **Formación de Furfural**



Fuente: De la Rosa, S. (2015). *Hidrólisis ácida de celulosa y biomasa lignocelulósica asistida con líquidos iónicos.*

Esta generación de subproductos debe mantenerse al mínimo para mantener el proceso eficiente y económicamente viable, por lo que es importante el control de parámetros de reacción como concentración del catalizador ácido, tiempos y temperaturas de reacción.

## 9. PROPUESTA DE ÍNDICE DE CONTENIDO

1. ÍNDICE GENERAL.....	I
2. ÍNDICE DE ILUSTRACIONES.....	II
3. LISTA DE SÍMBOLOS.....	III
4. GLOSARIO.....	IV
5. RESUMEN.....	V
6. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA Y FORMULACIÓN DE PREGUNTAS ORIENTADORAS.....	VI
7. OBJETIVOS.....	VII
8. RESUMEN DE MARCO METODOLÓGICO.....	VIII
9. INTRODUCCIÓN.....	IX
10. ANTECEDENTES.....	X
11. MARCO TEÓRICO.....	XI
12. RESULTADOS.....	XII
12.1 Caracterización de biomásas	
12.2 Disolución e hidrólisis de biomásas	
12.3 Medición de subproductos	
12.4 Medición de pérdidas en agua	
12.5 Presentación de resultados	
12.6 Discusión de resultados	
13. CONCLUSIONES.....	XIII
14. RECOMENDACIONES.....	XIV
15. BIBLIOGRAFÍA.....	XV
16. ANEXOS.....	XVI



## **10. METODOLOGÍA Y TÉCNICAS**

### **10.1 Diseño**

Se optó por un estudio no experimental, ya que el método experimental de hidrólisis de biomásas disueltas en líquido iónico y regeneradas ya existe y ha sido aplicado a algunas biomásas, y lo que se pretende es determinar el rendimiento de dicho método para las biomásas propuestas derivadas de la caña de azúcar.

### **10.2 Tipo de estudio**

Según el tiempo de ocurrencia de los hechos y registro de la información se realizará un estudio prospectivo, ya que no se analizarán hechos con ocurrencia en el pasado sino que se registrará la información conforme sucede.

Según el período y la secuencia del estudio se realizará un estudio transversal, ya que los cambios en las variables se registrarán en un momento determinado del tiempo en el que se llevará a cabo la reacción.

### **10.3 Alcance**

Según el análisis y el alcance de los resultados se realizará un estudio descriptivo, ya que se requiere determinar la situación de las variables bajo las condiciones del estudio. El estudio comprende la caracterización de la composición inicial de las biomásas, la transformación en productos y

subproductos de la reacción de hidrólisis y la medición de pérdidas por la disolución y precipitación de las biomásas.

#### 10.4 Variables e indicadores

A continuación, se muestran las variables definidas para el diseño  
Definición de variables:

Tabla II. **Variables**

Nombre de la variable	Definición conceptual	Definición Operacional	Indicador
Caracterización de biomásas	Determinación de componentes de la pared celular de la biomasa.	Mediante los valores de fibra neutro detergente, fibra ácido detergente y lignina ácido detergente; se calculan los % de celulosa hemicelulosa y lignina presentes así como los azúcares solubles y azúcares reductores	% Celulosa Bagazo 32-44 % % Lignina Bagazo 19-24 % % Hemicelulosa Bagazo 59-76 % % azúcares Solubles Bagazo 0.3 % ART Bagazo (g/l) % Celulosa Hoja Seca 32-44 % % Lignina hoja seca 19-24 % % Hemicelulosa hoja seca 59-76 %



Continuación tabla II

---

			% Azúcares Solubles hoja seca 0.3 %
			ART Hoja seca (g/l) % Celulosa hoja verde 32-44 % % Lignina hoja verde 19-24 % % Hemicelulosa hoja Verde 59-76 % % Azúcares Solubles hoja verde 0.3 % ART hoja verde (g/l)
Medición de azúcares reductores totales de hidrólisis	Medición de concentración de azúcares producidos por hidrólisis que poseen su grupo carbonilo intacto, y que pueden reaccionar como reductores con otras moléculas que actuarán como oxidantes	Medición espectrofotométrica por medio de método ICUMSA GS1/3/7-3 (2005*)	ART hidrólisis de Bagazo (g/l)  ART hidrólisis de Hoja Seca (g/l)  ART hidrólisis de Hoja Verde (g/l)
Medición de Glucosa de hidrólisis	Medición de concentración del azúcar glucosa producida por hidrólisis de la biomasa	Medición por cromatografía líquida de alta precisión, método ICUMSA GS7/4/8-23 (2011)	Glucosa hidrólisis de Bagazo (g/l)  Glucosa hidrólisis de HojaSeca (g/l)  Glucosa hidrólisis de Hoja Verde (g/l)
Medición de Subproducto Hidroximetil-furfural (HMF)	Medición de concentración del subproducto furfural producido por hidrólisis consecutivas de la biomasa	Medición espectrofotométrica por UV-VIS	Hidroximetil-furfural Hidrólisis Bagazo (g/l)  Hidroximetil-furfural Hidrólisis Hoja Seca (g/l)  Hidroximetil-furfural Hidrólisis Hoja Verde (g/l)

---

## Continuación tabla II

Medición de pérdidas en aguas de lavado	Medición de pérdidas de azúcares reductores, presentes en agua utilizada para precipitar biomasa.	Medición espectofotométrica por medio de método ICUMSA GS1/3/7-3 (2005*)	AR agua Bagazo 0.5-4 (g/l)  AR agua Hoja Seca 0.5-4 (g/l)  AR agua Hoja Verde 0.5-4 (g/l)
---	---	--	--

Fuente: elaboración propia.

## 10.5 Fases de recolección de datos

A continuación, se detallan las fases de recolección de datos propuestas para el diseño.

### 10.5.1 Revisión documental

Revisión documental de la información pertinente al estudio, estudios recientes publicados relacionados a la hidrólisis asistida por LI de biomásas.

### 10.5.2 Caracterización de las muestras de biomasa

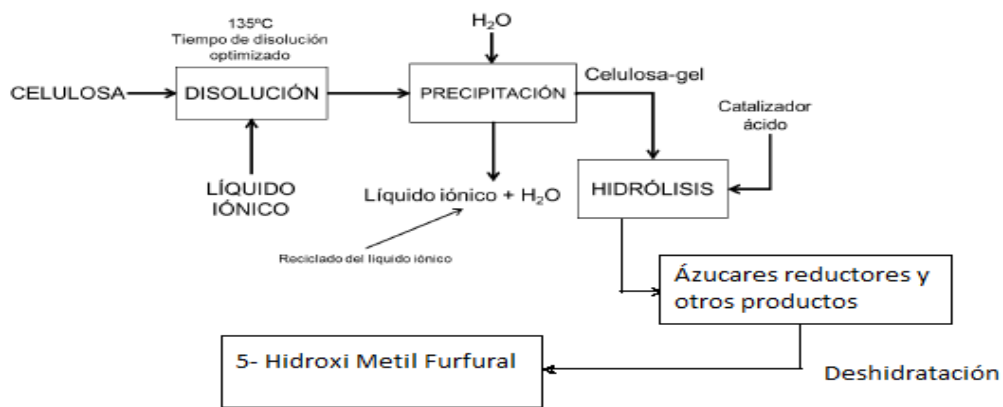
Las muestras de las tres biomásas serán obtenidas en un ingenio de la región, se homogenizarán moliéndolas para reducir su tamaño en un molino de cuchillas, y se tamizarán utilizando el contenido entre bandejas 20 y 80 mesh, serán colocadas en bolsas de polietileno selladas y transportadas bajo refrigeración de acuerdo al método LAB, Preparation of Samples of Biomass Compositional Analysis, según Sluiter y otros autores (2008), para su

caracterización en el Laboratorio de Bromatología de la Facultad de Veterinaria de la Universidad de San Carlos de Guatemala mediante el método de análisis de fibra de Goering y Van Soest (1970).

### 10.5.3 Pretratamiento y reacción de hidrólisis

Se seguirá el siguiente esquema para la reacción de hidrólisis para las tres biomásas:

Figura 8. Esquema de disolución, precipitación e hidrólisis



Fuente: adaptado de De la Rosa, S. (2015). *Hidrólisis ácida de celulosa y biomasa lignocelulósica asistida con líquidos iónicos*.

La reacción de hidrólisis se llevará a cabo en un matraz de tres bocas con reflujo. Será llevada a cabo por el investigador en el laboratorio de un ingenio azucarero. Se realizará una hidrólisis por cada biomasa.

#### **10.5.4 Determinación de los Azúcares Reductores Totales**

La determinación de los azúcares reductores totales (ART) se realizará por medio de método ICUMSA GS1/3/7-3 (2005\*). El análisis será llevado a cabo en el laboratorio de un ingenio azucarero por analistas del laboratorio. Los resultados se calculan después de medir la absorbancia en un espectrofotómetro. Se determinarán los ART una vez por cada biomasa.

#### **10.5.5 Determinación de la concentración de glucosa**

La determinación de la concentración de glucosa producida por la reacción de hidrólisis se realizará por medio de cromatografía líquida de alta precisión con una columna estándar para glucosa. El análisis será llevado a cabo en el laboratorio de un ingenio azucarero mediante el método ICUMSA GS7/4/8-23 (2011) por los analistas del laboratorio. Se determinará la concentración de glucosa una vez por cada biomasa.

#### **10.5.6 Determinación de concentración de hidroximetilfurfural**

La determinación de la concentración de hidroximetilfurfural después de la hidrólisis se llevará a cabo por espectrofotometría UV-VIS realizada en Laboratorio de Análisis Y Servicios, S.A., por analistas de dicho laboratorio una vez por cada biomasa.

### **10.5.7 Determinación de ART en aguas de lavado**

Se realizará la determinación de concentración de ART en las aguas de 4 lavados utilizadas para precipitar la biomasa para conocer la cantidad de ART que se pierden al disolver la biomasa en el LI. La determinación de los ART se realizará por medio del método ICUMSA GS1/3/7-3 (2005\*). El análisis será llevado a cabo en el laboratorio de un ingenio azucarero por los analistas del mismo. Los resultados de la titulación se calculan después de medir la absorbancia en un espectrofotómetro. Se determinará la concentración de ART una vez por cada biomasa disuelta y regenerada.

## **10.6 Plan de muestreo**

A continuación, se presenta el plan de muestreo para el diseño del estudio.

### **10.6.1 Fase de caracterización de biomosas**

Las muestras de las biomosas serán recolectadas de un ingenio azucarero. Se recolectará bagazo del último molino del tándem de molinos. La hoja seca y la hoja verde se recolectará del campo. Se reducirá el tamaño de la muestra utilizando un molino de cuchillas y se homogeneizará la muestra usando un tamiz. Se almacenarán dos kilogramos de las biomosas en bolsas de plástico sellables y serán transportadas en refrigeración al Laboratorio de Bromatología de la Facultad de Veterinaria de la Universidad de San Carlos de Guatemala para su caracterización.

### **10.6.2 Fase de medición de productos**

Las muestras de la hidrólisis serán tomadas por el investigador al finalizar la reacción y serán analizadas por el laboratorio de calidad del ingenio azucarero. Se tomará la mitad de la muestra de reacción y se utilizará para realizar el análisis de ART y glucosa.

### **10.6.3 Fase de medición de subproductos**

Las muestras de la hidrólisis serán tomadas por el investigador al finalizar la reacción y serán transportadas en frascos sellados a un laboratorio externo para su análisis. Se tomará la segunda mitad de la muestra para trasladarla al laboratorio externo.

### **10.6.4 Fase de medición de pérdidas en aguas de lavado**

Las muestras de aguas de lavado serán tomadas por el investigador al finalizar el proceso de disolución-precipitación de la biomasa y serán analizadas en el laboratorio de calidad del ingenio azucarero.

### **10.6.5 Instrumentos de recolección de información**

Ver apéndices 2 y 3.

## **10.7 Resultados esperados**

A continuación, se muestran los resultados esperados del estudio

### **10.7.1 Caracterización de biomasas**

Se espera obtener valores cercanos a los reportados por otras investigaciones con variaciones pequeñas en los porcentajes de celulosa hemicelulosa y lignina para las tres biomasas.

### **10.7.2 Reacción de hidrólisis**

Se espera tener resultados de alta selectividad de hidrólisis hacia glucosa y azúcares reductores y de bajas selectividades hacia subproductos.

### **10.7.3 Azúcares reductores en aguas de lavado**

Se espera tener resultados bajos (del 0.5 al 4 %) de pérdida de ART en aguas de lavado.

## **10.8 Técnicas de análisis de la información**

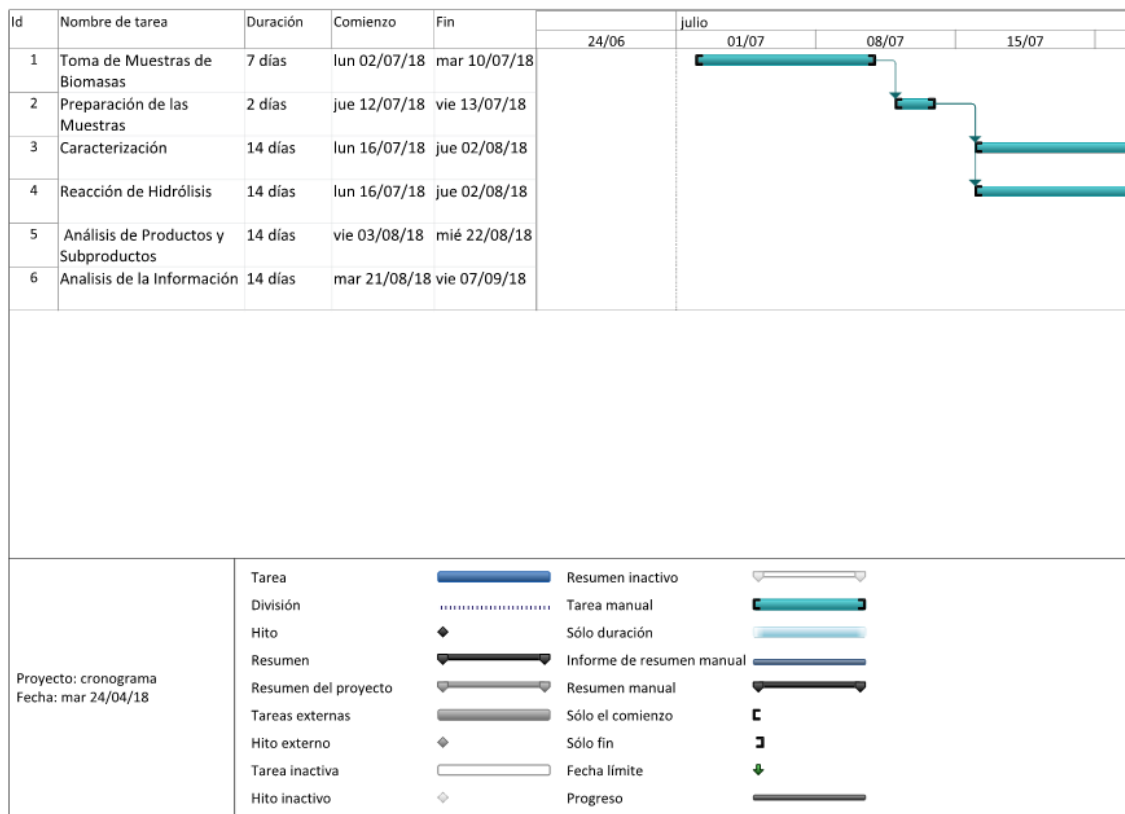
Para el análisis de la información se utilizarán únicamente estadística descriptiva, medias, porcentajes y desviaciones estándar de los datos y gráficos.



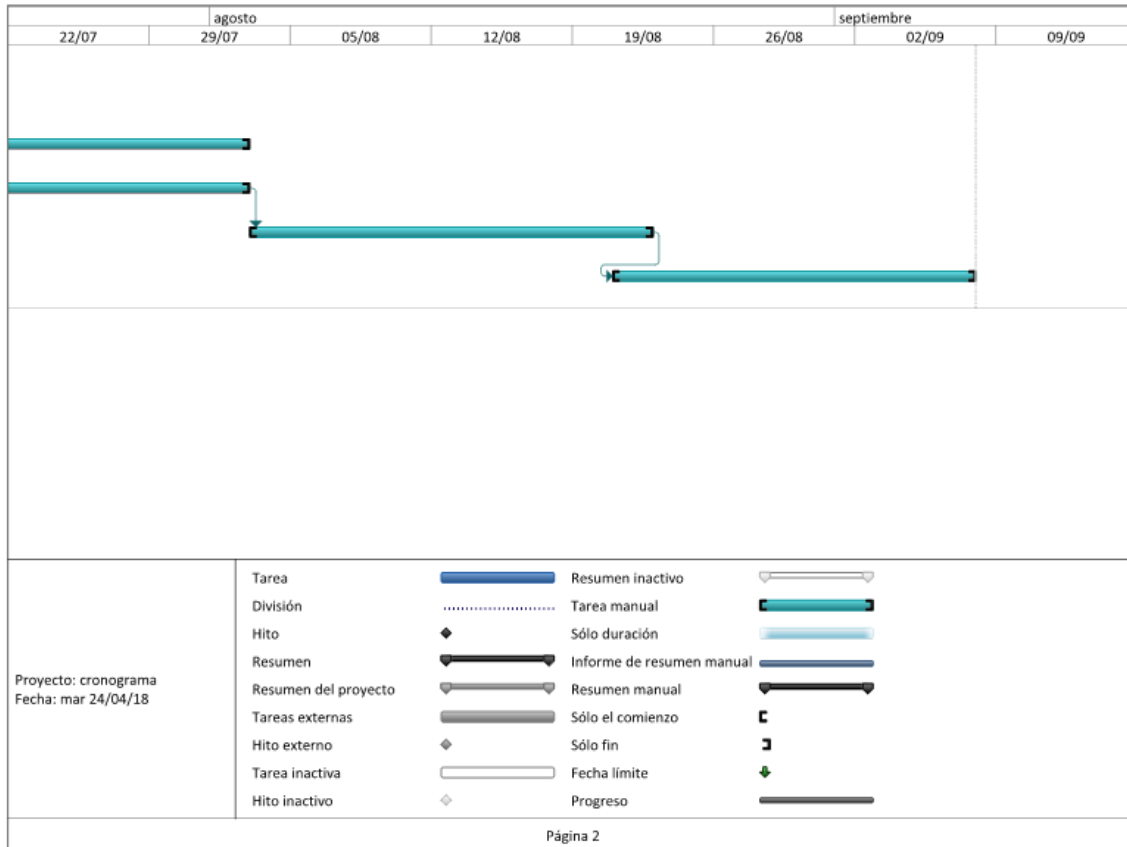


# 11. CRONOGRAMA

Figura 9. Cronograma de trabajo



Continuación figura 9.



Fuente: elaboración propia.

## 12. FACTIBILIDAD DEL ESTUDIO

A continuación, se presenta el detalle de costos para determinar la factibilidad económica del estudio:

Tabla III. **Costos del estudio**

Rubro	Costo		Costo Total	Financiamiento		
	Unitario	Cantidad		Proporcionado	por	
Reactivos	Líquido iónico [EMIM]Cl	21.84Q/g	100 g	Q2,184.34	Ingenio	por
	Ácido Sulfúrico H2SO4			0	Proporcionado	por
	Agua Desmineralizada			0	Ingenio	por
				0	Proporcionado	por
Equipo	Cristalería			0	Ingenio	por
	Espectrofotómetro			0	Proporcionado	por
	Cromatógrafo Líquido			0	Ingenio	por
	Balanza			0	Proporcionado	por
Análisis	Caracterización fibra ácido detergente Bagazo	Q83	1	Q83	Ingenio	por
	Caracterización fibra neutro detergente Bagazo	Q83	1	Q83	Propio	
	Caracterización de Lignina Bagazo	Q111	1	Q111	Propio	
	Caracterización fibra ácido detergente Hoja Seca	Q83	1	Q83	Propio	
	Caracterización fibra neutro detergente Hoja Seca	Q83	1	Q83	Propio	
	Caracterización de Lignina Hoja Seca	Q111	1	Q111	Propio	
	Caracterización fibra ácido detergente Hoja Verde	Q83	1	Q83	Propio	

Continuación tabla III

Caracterización detergente Hoja Verde	fibra neutro	Q83	1	Q83	Propio	
Caracterización Verde	de Lignina Hoja	Q111	1	Q111	Propio	
Aálisis de TSR			6	Q0	Proporcionado Ingenio	por
Análisis de Glucosa			3	Q0	Proporcionado Ingenio	por
Análisis de Furfurales			3	Q0	Proporcionado Laboratorio de Análisis y Servicios S.A.	por
			Total	Q831		

Fuente: elaboración propia.

El costo total del estudio será de Q. 831 y será costado por el investigador, por lo que se considera factible realizar el mismo.

### 13. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. Albernas, Y., et. al. (2012). *Evaluación económica de las alternativas de pretratamiento para la producción de etanol a partir de bagazo*. Cuba: Centro Azúcar.
2. AZASGUA, CENGICAÑA. (2015). *Boletín estadístico 16-1 y Banco de Guatemala*.
3. Banerjee S., et. al. (2006) *Energy consumption analysis of integrated flowsheets for production of fuel ethanol from lignocellulosic biomass*. Países Bajos: Elsevier Energy.
4. Bustos G. (2016) *Líquidos iónicos a temperatura ambiente: un nuevo medio para las reacciones químicas*. Docplayer. Recuperado de <http://docplayer.es/12129881-Liquidos-ionicos-a-temperatura-ambiente-un-nuevo-medio-para-las-reacciones-quimicas.html>.
5. Chandler, C., et. al. (2012). *Hidrólisis ácida diluida en dos etapas de bagazo de caña de azúcar para la producción de azúcares fermentables*. Venezuela: Multiciencias.
6. De la Rosa, S. M. (2015). *Hidrólisis ácida de celulosa y biomasa lignocelulósica asistida con líquidos iónicos*. Tesis Doctoral en Ciencias Químicas, Universidad Autónoma de Madrid, España.

7. De Souza A.P, Grandis A. (2014) *Sugarcane as bioenergy source: History, performance, and perspectives for second-generation bioethanol*. Estados Unidos: Springer Verlag Bioenergy Research.
8. Dee, S. J., & Bell, A. T. (2011). *A study of the acid-catalyzed hydrolysis of cellulose dissolved in ionic liquids and the factors influencing the dehydration of glucose and the formation of humins*. Alemania: Wiley-VCH Verlag GmbH & Co ChemSusChem.
9. Domínguez, M., et. al. (2011). *Estudio de la cinética de la hidrólisis ácida del bagazo de caña de azúcar sin pretratamiento para la obtención de azúcares reductores*. España: Universidad del País Vasco Revista Iberoamericana de Polímeros.
10. Dopico-Ramírez, D., et. al. (2013). *Líquidos iónicos para la transformación de biomasa lignocelulósica*. Cuba: Instituto Cubano Investigadores Caña Azucar.
11. Galbe, M., & Zacchi, G. (2002). *A review of the production of ethanol from softwood*. Alemania: Springer, Applied microbiology and biotechnology
12. Goering, H. K., & Van Soest, P. J. (1970). *Forage fiber analysis*. Estados Unidos: United States Department of Agriculture.
13. Huddleston, J. G., et. al. (2001). *Characterization and comparison of hydrophilic and hydrophobic room temperature ionic liquids incorporating the imidazolium cation*. Reino Unido: Royal Society of Chemistry Green chemistry.

14. Kuroda, K., et. al. (2017). *Efficient hydrolysis of lignocellulose by acidic ionic liquids under low-toxic condition to microorganisms*. Alemania: Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. Catalysts.
15. Laboratorio de Ciencias Altazor. (2012). *Apuntes sobre química de polímeros*. Recuperado de <https://www.scribd.com/document/86590872/Apuntes-sobre-Quimica-de-Polimeros>.
16. Lehninger, A. (1988). *Principios de bioquímica*. Barcelona, España: Omega.
17. León-Martínez, T., et. al. (2013). *Paja de la caña de azúcar. Sus usos en la actualidad*. Cuba: Instituto Cubano Investigadores Caña Azucar.
18. Liu, Z., Li, L., Liu, C., & Xu, A. (2017). *Saccharification of cellulose in the ionic liquids and glucose recovery*. Países Bajos: Elsevier, Renewable energy.
19. Menon, V., & Rao, M. (2012). *Trends in bioconversion of lignocellulose: biofuels, platform chemicals & biorefinery concept*. Países Bajos: Elsevier, Progress in Energy and Combustion Science.
20. Miguélez, E. (2016) Docplayer *Fundamentos 1. Materiales Lignocelulosicos*. Docplayer. Recuperado de <http://docplayer.es/12478329-Fundamentos-1-materiales-lignocelulosicos.html>.
21. Morales-delaRosa, S., Campos-Martin, J. M., & Fierro, J. L. (2012). *High glucose yields from the hydrolysis of cellulose dissolved in ionic liquids*. Países Bajos: Elsevier, Chemical Engineering Journal.

22. Morales-delaRosa, S., Campos-Martin, J. M., & Fierro, J. L. (2015) *Method for the hydrolisis of lignocellulosic biomass*. Países Bajos: Elsevier, Chemical Engineering Journal.
23. McMurry, J. (2012). *Química orgánica*. México: Cengage Learning Editores.
24. Nogués, F. (2010). *Energía de la biomasa*. Universidad de Zaragoza, España
25. Pandey, R. (2010). *Commercializing lignocellulosic bioethanol: technology bottlenecks and possible remedies*, Alemania: Wiley-VCH Verlag GmbH & Co Biofuels, Bioproducts and Biorefining.
26. Pânzariu, A. E., Măluțan, T., & Mangalagiu, I. (2013). *The hydrolysis of cellulosic materials in ionic liquids*. Estados Unidos: North Carolina State University, *Bioresources*.
27. Pernalete, Z., et. al. (2008). *Fraccionamiento del bagazo de caña de azúcar mediante tratamiento amoniacal: efecto de la humedad del bagazo y la carga de amoníaco*. Venezuela: Universidad Centro Occidental Lisandro Alvarado, Bíoagro.
28. Pinkert, A., Marsh, K. N., Pang, S., & Staiger, M. P. (2009). *Ionic liquids and their interaction with cellulose*. Chemical reviews, 109(12), 6712-6728.
29. Piña, M., Sánchez, J. (2007). *Hidrólisis del bagacillo de la caña de azúcar a bajas concentraciones de ácido y diferentes relaciones líquido-sólido*.



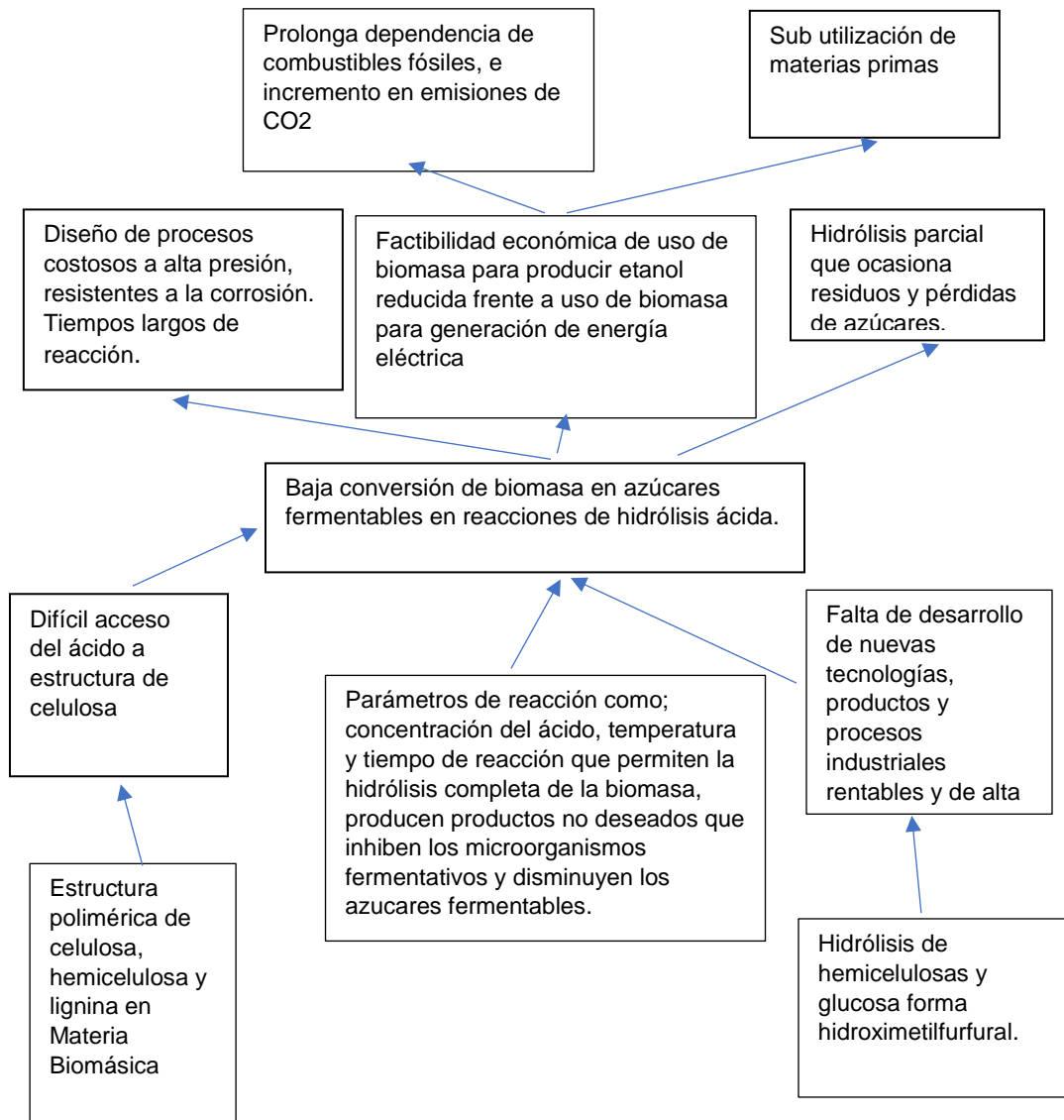
Trabajo especial de grado. Facultad de Ingeniería. Universidad del Zulia.  
Maracaibo, Venezuela.

30. PNUD (2016). *Más allá del conflicto, luchas por el bienestar*. Informe nacional de desarrollo humano, 2016. Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo. Guatemala.
31. Ragauskas, A. J., et. al. (2006). *The path forward for biofuels and biomaterials*. Estados Unidos: American Association for the Advancement of Science, Science.
32. Ramírez, M., & Fraga, E. (2010). *Comparative modelling and optimization of different pretreatment technologies for bioethanol production*. Cuba Universidad Central de Las Villas, Centroazúcar.
33. Rubin, E.M. (2008). *Genomics of cellulosic biofuels*, Estados Unidos: Springer Nature, Nature Research.
34. Salvador, A. R. (2008). *Líquidos iónicos a temperatura ambiente: un nuevo medio para las reacciones químicas*. Real Academia de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales. España.
35. Sánchez, Ó. J., & Cardona, C. A. (2005). *Producción biotecnológica de alcohol carburante I: obtención a partir de diferentes materias primas*. Venezuela: Interciencia.
36. Sievers, C., et. al. (2009). *Ionic-liquid-phase hydrolysis of pine wood*. Estados Unidos: ACS Publications, Industrial & Engineering Chemistry Research.

37. Sluiter, A., et. al. (2008). *Determination of structural carbohydrates and lignin in biomass*. Estados Unidos: U. S. Department of Energy.
38. Swatloski, R. P., Spear, S. K., Holbrey, J. D., & Rogers, R. D. (2002). *Dissolution of cellulose with ionic liquids*. Estados Unidos: ACS Publications, Journal of the American chemical society.
39. Ungurean, M., Csanádi, Z., Gubicza, L., & Péter, F. (2014). *An integrated process of ionic liquid pretreatment and enzymatic hydrolysis of lignocellulosic biomass with immobilised cellulase*. Estados Unidos: North Carolina Estate University, *Bioresources*.
40. Widjaja, A., Agnesty, S.Y., Sangian, H.F., Gunawan, S. (2015). *Application of ionic liquid [DMIM]DMP pretreatment in the hydrolysis of sugarcane bagasse for biofuel production*. Indonesia: Bulletin of Chemical Reaction Engineering & Catalysis, 10 (1): 70-77. (doi:10.9767/bcrec.10.1.7143.70-77).
41. Zhu, S., et. al. (2015). *Acid-catalyzed hydrolysis of lignocellulosic biomass in ionic liquids for ethanol production: Opportunities & challenges*. Estados Unidos: North Carolina Estate University, *Bioresources*.
42. Zumalacárregui, L.M., Pérez, O.O., Rodriguez, P.A., Zumalacárregui, B.M. y Lombardi, G. (2015) *Potencialidades del bagazo para la obtención de etanol frente a la generación de electricidad*. México: Universidad Nacional Autónoma de México, Ingeniería, investigación y tecnología.

# APÉNDICES

## Apéndice 1. Árbol del problema



Fuente: elaboración propia.

- Instrumentos de recolección de la información

Fase de caracterización de las biomásas:

### Apéndice 2. **Caracterización de biomásas**

Corrida	Biomasa	% Azúcares			
		% Solubles	% Celulosa	% Hemicelulosa	% Lignina
	Bagazo				
1					
2					
3					
	Hoja Seca				
1					
2					
3					
	Hoja Verde				
1					
2					
3					



Fuente: elaboración propia.

Fase de disolución de biomasas y reacción:

### Apéndice 3. Datos de reacción

Biomasa	[ART]g/l	[Glu] g/l	[5HMF] g/l	[ART]l g/l
Bagazo				
Hoja Seca				
Hoja				
Verde				



Fuente: elaboración propia.

