

**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA JUAN MISAEL SARACHO**

**FACULTAD DE CIENCIAS Y TECNOLOGÍA**

**CARRERA DE INGENIERÍA QUÍMICA**

**“OBTENCIÓN EXPERIMENTAL DE BIOETANOL DE LOS  
RESIDUOS LIGNOCELULÓSICOS DE LA EXPLOTACIÓN DEL  
BANANO”**

**Por:**

**ISMAEL MONTES FLORES**

**Modalidad de graduación: INVESTIGACIÓN APLICADA. Presentado a  
consideración de la UNIVERSIDAD AUTÓNOMA “JUAN MISAEL  
SARACHO”, como requisito para optar el grado académico de Licenciatura en  
Ingeniería Química.**

**Agosto de 2018**

**TARIJA-BOLIVIA**

## **DEDICATORIA**

A Dios, por darme la oportunidad de vivir y estar conmigo en cada paso que doy, por fortalecer mi corazón e iluminar mi mente. Por haber puesto en mi camino a aquellas personas que han sido mi soporte y compañía durante todo el periodo de estudio.

A mi familia por ser un apoyo constante. Por ser la fuerza interna que me motiva a seguir siempre adelante; por enseñarme que aún estando vencido, nunca darme por vencido.

A los docentes por impartir conocimiento, consejos y su siempre acertada colaboración.

A mis tribunales por su paciencia, colaboración, consejos brindados para la conclusión de este trabajo.

## ÍNDICE GENERAL

Página

### CAPÍTULO I

#### INTRODUCCIÓN

1.1 Antecedentes.....	1
1.2 Biocombustibles.....	1
1.2.1 Bioetanol.....	3
1.2.2 Materia prima para la producción de etanol .....	4
1.2.3 Bioetanol de material lignocelulósico .....	4
1.2.4 Producción de bioetanol de celulosa .....	5
1.2.5 Producción de bioetanol a nivel mundial .....	5
1.2.6 Producción de bioetanol en Bolivia .....	7
1.3 Objetivos.....	8
1.3.1 Objetivo general.....	8
1.3.2 Objetivos específicos.....	8
1.4 Justificación .....	8

### CAPÍTULO II

#### MARCO TEÓRICO

2.1 El Plátano.....	10
2.2 Aspecto botánico del banano .....	10
2.3 Constituyentes de los residuos lignocelulósicos del banano .....	11
2.3.1 Celulosa .....	11
2.3.1.1 Reacciones de la celulosa .....	13
2.3.2 Hemicelulosa .....	13

2.3.3 Lignina.....	14
2.3.4 Otras sustancias.....	15
2.4 Producción de bioetanol a partir de biomasa lignocelulósica.....	16
2.4.1 Pretratamiento de residuos lignocelulósicos.....	16
2.4.1.1 Pretratamientos físicos.....	16
2.4.1.2 Pretratamiento físico-químico.....	17
2.4.1.2.1 Autohidrólisis (explosión de vapor).....	17
2.4.1.2.2 Proceso AFEX.....	17
2.4.1.2.3 Explosión con CO <sub>2</sub> .....	18
2.4.1.3 Pretratamiento químico .....	18
2.4.1.3.1 Ozonólisis .....	18
2.4.1.3.2 Prehidrolisis ácida .....	18
2.4.1.3.3 Prehidrolisis alcalina .....	19
2.4.1.4 Pretratamiento biológico.....	20
2.5 Hidrólisis .....	20
2.5.1 Hidrólisis con ácido concentrado.....	20
2.5.2 Hidrólisis con ácido diluido.....	21
2.5.3 Hidrólisis enzimática.....	23
2.6 Obtención de etanol .....	24
2.6.1 Fermentación .....	24
2.6.1.1 Fermentación de la glucosa: oxidación y producción de ATP .....	25
2.6.1.2 Fermentación de la glucosa: etapa reductora.....	26
2.6.2 Levaduras.....	28
2.6.2.1 Introducción .....	28

2.6.2.2 Saccharomyces cerevisiae .....	28
2.6.2.3 Morfología de la levadura.....	29
2.6.2.3.1 Forma y tamaño.....	29
2.6.2.3.2 Estructura celular.....	29
2.6.2.4 Fisiología de las levaduras.....	29
2.6.2.4.1 Requerimientos nutricionales.....	29
2.6.3 Parámetros a controlar en el proceso de fermentación.....	30
2.6.3.1 Temperatura.....	30
2.6.3.2 Aireación.....	30
2.6.3.3 pH.....	31
2.6.3.4 Nutrientes.....	31
2.6.4 Destilación .....	31
2.6.4.1 Destilación simple.....	32
2.6.4.2 Diferencial o abierta .....	32
2.6.4.3 Cerrada o de equilibrio .....	32
2.6.4.4 Destilación por rectificación.....	33

### **CAPÍTULO III**

#### **PARTE EXPERIMENTAL**

3.1 Descripción y análisis de materias primas .....	35
3.1.2 Recolección de muestras .....	36
3.1.3 Análisis físico-químico de la materia prima.....	37
3.2 Descripción del método de investigación.....	37
3.2.1 Pretratamiento alcalino.....	37
3.2.2 Hidrólisis acida .....	38

3.2.3 Fermentación .....	39
3.2.4 Destilación .....	40
3.3 Diseño factorial.....	43
3.4 Procedimientos empleados para la obtención de bioetanol.....	45
3.4.1 Lavado, troceado y secado.....	45
3.4.2 Pretratamiento alcalino .....	46
3.4.3 Hidrólisis ácida .....	48
3.4.4 Fermentación .....	51
3.4.5 Destilación .....	52

## **CAPÍTULO IV**

### **RESULTADOS Y DISCUSIÓN**

4.1 Resultados lavado, troceado y secado .....	53
4.1.1 % humedad en el material lignocelulósico .....	53
4.2 Resultados pretratamiento alcalino .....	54
4.3 Resultados de la Hidrólisis ácida .....	54
4.3.1 °Brix obtenidos en la hidrólisis ácida.....	54
4.3.2 Azúcares reductores y azúcares totales .....	55
4.3.3 Diseño factorial.....	56
4.3.3.1 Análisis estadístico del diseño factorial del proceso de hidrólisis ácida .....	56
4.3.3.2 Variable respuesta porcentaje de azúcares reductores .....	58
4.3.3.3 Análisis de regresión lineal múltiple .....	59
4.4 Resultados de la fermentación .....	61
4.4.1 Evolución de los °Brix durante la fermentación .....	62
4.4.2 Evolución del pH durante la fermentación .....	63

4.5 Resultados de la destilación.....	64
4.5.1 Destilación del fermento .....	64
4.5.2 Cálculo del rendimiento de alcohol obtenido .....	65
4.6 Balance de materia .....	67
4.6.1 Balance parcial de materia en el proceso de obtención de bioetanol a partir de material lignocelulósico .....	67
4.6.1.1 Balance parcial en la etapa de troceado, secado .....	67
4.6.1.2 Balance parcial en la etapa de pretratamiento alcalino .....	67
4.6.1.3 Balance parcial en la hidrólisis .....	68
4.6.1.4 Balance parcial en la fermentación y destilación.....	70
4.6.2 Balance de masa general en el proceso de obtención bioetanol a partir de material lignocelulósico .....	72
4.6.3 Balance parcial de energía en el proceso de obtención de bioetanol a partir de material lignocelulósico .....	73
4.6.1.1 Balance parcial de energía en la etapa de fermentación.....	73
4.6.1.2 Balance parcial de energía en la etapa de destilación .....	74

## **CAPÍTULO V**

### **CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES**

5.1 Conclusiones.....	76
5.2 Recomendaciones .....	77
Bibliografía.....	79

## **ÍNDICE DE TABLAS**

	Página
Tabla I-1 Principales tipos de biocombustibles.....	2
Tabla I-2 Procesos de obtención de biocombustibles .....	2

Tabla I-3 Propiedades físicas y termodinámicas del etanol .....	3
Tabla I-4 Producción y consumo de bioetanol en latino América (millones de litros) ..	6
Tabla I-5 Exportación alcohol etílico sin desnaturalizar .....	7
Tabla II-1 Contenido de celulosa, hemicelulosa y lignita en diferentes residuos .....	15
Tabla II-2 Fuentes para producir bioetanol.....	23
Tabla II-3 Clasificación taxonómica de <i>Saccharomyces cerevisiae</i> .....	25
Tabla II-4 Clasificación taxonómica de <i>Saccharomyces</i> .....	29
Tabla III-1 Composición proximal de la materia prima .....	37
Tabla III-2 Parámetros para el proceso de hidrólisis .....	43
Tabla III-3 Diseño factorial para el proceso de hidrólisis.....	44
Tabla III-4 Datos para el diseño factorial para el proceso .....	44
Tabla III-5 Relación entre sustrato y volumen ácido.....	48
Tabla III-6 Diseño factorial para determinar % azúcares reductores .....	49
Tabla IV-1 Cantidad de agua presente en el material lignocelulósico .....	53
Tabla IV-2 Masa que se retira en el pretratamiento alcalino .....	54
Tabla IV-3 °Brix obtenidos en el proceso de hidrólisis del material lignocelulósico ..	55
Tabla IV-4 % Azúcares reductores y totales obtenidos en el proceso de hidrólisis del material lignocelulósico .....	56
Tabla IV-5 Datos para el análisis de varianza.....	57
Tabla IV-6 Datos para el análisis de varianza .....	58
Tabla IV-7 Análisis de varianza ANOVA (porcentaje de azúcares reductores .....	58
Tabla IV-8 Variables introducidas/eliminadas.....	60
Tabla IV-9 Variables introducidas/eliminadas <sup>b</sup> .....	60
Tabla IV-10 ANOVA <sup>b</sup> .....	60



Tabla IV-11 Coeficientes <sup>a</sup> .....	61
Tabla IV-12 Característica modelo para la fermentación para muestra 1.....	62
Tabla IV-13 % Reducción de los °Brix a medida que avanza la fermentación .....	62
Tabla IV-14 Evolución del pH durante la fermentación.....	63
Tabla IV-15 Producto obtenido para las diferentes muestras .....	64
Tabla IV-16 Rendimiento de alcohol (%) para las diferentes muestras .....	66

## ÍNDICE DE FIGURAS

	Página
Figura 1.1 Evolución producción biocombustibles a nivel mundial .....	5
Figura 1.2 Volumen de etanol exportado (kg) en los últimos años .....	7
Figura 2-1 Esquema de la planta de banano.....	10

Figura 2-2 Estructura molecular de la celulosa .....	12
Figura 2-3 Enlaces de hidrógeno que permiten al polímero de celulosa un ordenamiento paralelo .....	12
Figura 2-4 Estructura molecular plana de la hemicelulosa .....	13
Figura 2-5 Estructura molecular de la lignina .....	14
Figura 2.6 Efecto del pretratamiento de la biomasa lignocelulósica .....	16
Figura 2.7 Vía de Embden-Meyerhof, secuencia de reacciones enzimáticas en la conversión de la glucosa a piruvato y luego a productos de fermentación .....	27
Figura 3-1 Exportaciones de banana 2004-2013 y octubre 2014 .....	35
Figura 3-2 (arriba) Plantaciones de banano en la zona. (abajo) Desechos que quedan después de la cosecha del banano .....	36
Figura 3-3 Diagrama de flujo para la producción de bioetanol .....	42
Figura 3-4 Reducción de tamaño del material lignocelulósico .....	45
Figura 3-5 Arriba: material lignocelulósico después del pretratamiento. Abajo material lignocelulósico después del pretratamiento seco .....	47
Figura 3-6 Sustrato después de la hidrólisis ácida .....	49
Figura 3-7 Equipo autoclave usado para la hidrólisis ácida .....	50
Figura 3-8 Prueba cualitativa del reactivo de Fehling para la determinación de azúcares reductores .....	50
Figura 3-9 Activación de la levadura, la cual se usará para la fermentación .....	52
Figura 3-10 Equipo usado para la destilación del material lignocelulósico .....	52
Figura 4-1 Evolución de los °Brix versus horas hasta estabilizarse .....	63

**ÍNDICE DE ANEXOS**

Anexo 1 .....	85
Anexo 2 .....	86
Anexo 3 .....	87
Anexo 4 .....	88
Anexo 5 .....	89
Anexo 6 .....	90

