

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA JUAN MISAEL SARACHO

FACULTAD DE CIENCIAS Y TECNOLOGÍA

CARRERA DE INGENIERÍA QUÍMICA

“PROYECTO DE GRADO”



**OBTENCIÓN DE BIOETANOL MEDIANTE HIDRÓLISIS ENZIMÁTICA
DEL CAMOTE (*Ipomoea batatas L.*) A ESCALA LABORATORIO EN EL
DEPARTAMENTO DE TARIJA**

Por:

MILDRED DAYANA CARRIZO ALDANA

**Proyecto de grado, 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.**

Mayo de 2022

TARIJA – BOLIVIA

El tribunal calificador del presente trabajo, no se solidariza con la forma de términos, modos y expresiones vertidas en el mismo, siendo esta responsabilidad del autor.

DEDICATORIA

Al regalo más grande que Dios
me pudo otorgar, mi familia.
Las personas más importantes
de mi vida y las que me dieron
fuerzas para salir adelante.

AGRADECIMIENTO

En primer lugar, quiero agradecer a Dios por la vida, sabiduría, enseñanza y por guiar mi camino.

También quiero agradecer a mi familia y amigas, por apoyarme aun cuando mis ánimos decaían.

En especial quiero agradecer a mis padres, que siempre estuvieron presentes ahí para darme palabras de apoyo y poder renovar energías.

PENSAMIENTO

Tres cosas que se necesitan para saber lo insignificante que llegamos a ser; un reloj, porque no podemos detener el tiempo; un telescopio, para ver lo pequeño que somos comparados ante el mundo y una bacteria, un ser invisible puede causarnos la muerte.

ÍNDICE

Antecedentes	1
Objetivos	4
Objetivo general	4
Objetivos específicos	4
Justificación.....	4
Justificación económica	5
Justificación tecnológica	5
Justificación social	5
Justificación ambiental.....	6

CAPÍTULO I

MARCO TEÓRICO

1.1	Etanol.....	7
1.2	Camote.....	8
1.2.1	Taxonomía.....	8
1.2.2	Descripción morfológica	9
1.2.2.1	Sistema radicular	9
1.2.2.2	Tallo.....	10
1.2.2.3	Hojas.....	10
1.2.2.4	Flores	10
1.2.2.5	Fruto.....	10
1.2.3	Variedades	10
1.2.4	Composición química.....	11

1.3	Almidón	12
1.3.1	Estructura química del almidón	12
1.3.2	Amilosa.....	12
1.3.3	Amilopectina	13
1.3.4	Temperatura de gelatinización de almidones de tubérculos	13
1.4	Hidrólisis del almidón	14
1.4.1	Hidrólisis ácida del almidón	15
1.4.2	Hidrólisis enzimática del almidón	16
1.4.2.1	Gelatinización.....	16
1.4.2.2	Licuefacción	17
1.4.2.3	Sacarificación	17
1.4.3	Enzimas	18
1.4.3.1	α -amilasa	18
1.4.3.2	β -amilasa.....	18
1.4.3.3	Amilogucosidasa (AMG)	19
1.4.4	Factores que influyen en la cinética de la hidrólisis enzimática.....	19
1.4.4.1	Efecto del pH	19
1.4.4.2	Efecto de la temperatura	20
1.4.4.3	Concentración de sustrato.....	20
1.4.5	Cinética de la hidrólisis enzimática.	20
1.4.5.1	Modelo de Michaelis - Menten.....	20
1.4.5.2	Estimación de K_m y V_{max}	24
1.5	Fermentación alcohólica.....	27

1.5.1	Factores que influyen en la fermentación alcohólica	29
1.5.1.1	Concentración de azúcares	29
1.5.1.2	Levadura	29
1.5.1.3	pH	30
1.5.1.4	Temperatura.....	30
1.5.2	Cinética de la fermentación alcohólica.....	30
1.6	Destilación	34
1.6.1	Destilación simple	34
1.6.2	Rectificación.....	34

CAPÍTULO II

PARTE EXPERIMENTAL

2.1	Caracterización de la materia prima	36
2.2	Selección del método en el proceso de hidrólisis para la obtención de bioetanol del camote.....	37
2.3	Diseño experimental para el proceso de obtención de bioetanol.....	39
2.3.1	Diseño factorial para el proceso de hidrólisis enzimática	39
2.3.2	Diseño factorial para el proceso de fermentación alcohólica	41
2.4	Procedimientos y técnicas para la obtención de los resultados	42
2.4.1	Materiales de laboratorio, equipos, utensilios e insumos utilizados para obtener bioetanol de camote	42
2.4.1.1	Materiales de laboratorio	42
2.4.1.2	Equipos utilizados en el proceso de obtención de bioetanol del camote....	43
2.4.1.3	Utensilios e insumos utilizados en proceso de obtención de bioetanol	43

2.4.2	Proceso para la obtención de bioetanol mediante hidrólisis enzimática del camote.....	44
2.4.3	Descripción del proceso para obtener bioetanol mediante hidrólisis enzimática del camote	46
2.4.3.1	Selección de la materia prima.....	46
2.4.3.2	Pelado y lavado.....	47
2.4.3.3	Cortado	47
2.4.3.4	Secado.....	47
2.4.3.5	Molienda.....	48
2.4.3.6	Tamizado	49
2.4.3.7	Dilución	50
2.4.3.8	Gelatinización.....	50
2.4.3.9	Licuefacción	51
2.4.3.10	Sacarificación	51
2.4.3.11	Preparación del mosto	53
2.4.3.12	Fermentación alcohólica del producto de la hidrólisis enzimática.....	53
2.4.3.13	Filtración.....	55
2.4.3.14	Destilación	55
2.4.4	Parte experimental de la cinética de la hidrólisis enzimática	56

CAPÍTULO III

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1	Secado del camote comestible.....	57
3.2	Resultados del proceso de hidrólisis enzimática	60

3.2.1	Análisis estadístico del diseño factorial realizado en el proceso de hidrólisis enzimática.....	60
3.2.2	Análisis de regresión lineal múltiple en la etapa de hidrólisis enzimática .	62
3.2.3	Cinética del proceso de hidrólisis enzimática del camote comestible seco molido.....	63
3.3	Resultados del proceso de fermentación alcohólica y destilación.....	67
3.3.1	Análisis estadístico del diseño factorial en proceso de fermentación	71
3.3.2	Análisis de regresión lineal en el proceso de fermentación alcohólica	73
3.3.3	Cinética de la fermentación alcohólica.....	74
3.4	Balance de materia para la obtención de bioetanol del camote	77
3.4.1	Balance de materia en el acondicionamiento de la materia prima	77
3.4.1.1	Balance de materia en la etapa de pelado	79
3.4.1.2	Balance de materia en la etapa de lavado del camote comestible	80
3.4.1.3	Balance de materia en la etapa de secado del camote comestible	81
3.4.1.4	Balance de materia en la etapa de molienda del camote comestible seco ..	85
3.4.1.5	Balance de materia en la etapa de tamizado del camote comestible seco molido.....	86
3.4.2	Resumen general de balance de materia en el proceso de acondicionamiento de la materia prima	87
3.4.3	Balance de materia en la hidrólisis enzimática.....	88
3.4.3.1	Balance de materia en la etapa de dilución con camote comestible seco en polvo	91
3.4.3.2	Balance de materia en la etapa de gelatinización	92
3.4.3.3	Balance de materia en la etapa de licuefacción	93

3.4.3.4	Balance de materia en la etapa de sacarificación	94
3.4.4	Resumen general del balance de materia en el proceso de hidrólisis enzimática.....	96
3.4.5	Balance de materia en la etapa de fermentación alcohólica	97
3.4.5.1	Balance de materia en la etapa de preparación del mosto	98
3.4.5.2	Balance de materia en la etapa de la fermentación alcohólica del mosto preparado	99
3.4.5.3	Balance de materia en la etapa de filtración del producto fermentado.....	101
3.4.5.4	Balance de materia en la etapa destilación	102
3.4.6	Resumen general del balance de materia en el proceso de fermentación para obtener bioetanol	103
3.5	Balance de energía para la obtención de bioetanol del camote	103
3.5.1	Balance de energía en la etapa de secado del camote comestible	105
3.5.2	Balance de energía en la etapa de gelatinización	111
3.5.3	Balance de energía en el proceso de licuefacción	113
3.5.4	Balance de energía en el proceso de sacarificación.....	116
3.5.5	Balance de energía en el proceso de destilación.....	118
3.5.6	Energía empleada para cada equipo utilizado en el proceso para la obtención de bioetanol.....	123

CAPÍTULO IV

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

4.1	Conclusiones.....	124
4.2	Recomendaciones	125

BIBLIOGRAFÍA

ANEXOS

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla I-1:	Propiedades físicas y químicas del bioetanol	8
Tabla I-2:	Taxonomía del camote	9
Tabla I-3:	Composición química del camote (<i>Ipomoea batatas L.</i>) en su estado fresco	11
Tabla I-4:	Temperatura de gelatinización de almidones de distintos tubérculos .	14
Tabla II-1:	Análisis fisicoquímico del camote.....	37
Tabla II-2:	Escala de calificación Likert en el proceso de hidrólisis.....	37
Tabla II-3:	Valores de ponderación para la selección del método de la hidrólisis	38
Tabla II-4:	Matriz de decisión para el método (proceso tecnológico) de obtención de bioetanol del camote	39
Tabla II-5:	Niveles de variación de los factores en el proceso de hidrólisis enzimática.....	40
Tabla II-6:	Matriz de diseño experimental en el proceso de hidrólisis enzimática	41
Tabla II-7:	Matriz de diseño experimental en el proceso de la fermentación alcohólica.....	42
Tabla II-8:	Materiales de laboratorio	42
Tabla II-9:	Equipos utilizados en el proceso de obtención de bioetanol mediante hidrólisis enzimática del camote	43
Tabla II-10:	Utensilios utilizados en el proceso de obtención de bioetanol	44
Tabla II-11:	Insumos utilizados en el proceso de obtención de bioetanol mediante hidrólisis enzimática del camote	44
Tabla III-1:	Datos de la curva de secado.....	57
Tabla III-2:	Datos de la humedad del camote comestible.....	59

Tabla III-3:	Resultados del porcentaje de azúcares reductores del proceso de hidrólisis enzimática.....	60
Tabla III-4:	Matriz de diseño experimental para el etapa de hidrólisis enzimática	61
Tabla III-5:	Análisis de varianza en la etapa de hidrólisis enzimática.....	61
Tabla III-6:	Coefficiente del modelo.....	62
Tabla III-7:	Porcentaje de azúcares reductores en función del tiempo de hidrólisis enzimática	63
Tabla III-8:	Tratamiento de datos para determinar la cinética de la hidrólisis enzimática.....	64
Tabla III-9:	Datos de la cinética de la hidrólisis enzimática.....	66
Tabla III-10:	Medición de los °Brix y pH en función del tiempo	67
Tabla III-11:	Bioetanol obtenido para el diseño experimental en el proceso de fermentación alcohólica.....	71
Tabla III-12:	Resultados del rendimiento de alcohol obtenido.....	71
Tabla III-13:	Datos introducidos para el análisis de varianza en el proceso de fermentación	72
Tabla III-14:	Análisis de varianza en la etapa de fermentación alcohólica	72
Tabla III-15:	Coefficientes del modelo en el proceso de fermentación alcohólica....	73
Tabla III-16:	Estadísticas de la cinética en el proceso de fermentación alcohólica por el método de los tres puntos	75
Tabla III-17:	Propiedades psicométricas del aire.....	84
Tabla III-18:	Datos de la composición fisicoquímica del camote	110
Tabla III-19:	Potencia y tiempo de operación para cada equipo empleado.	123
Tabla III-20:	Energía consumida para cada equipo utilizado.	123

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1-1	Camote.....	9
Figura 1-2	Estructura química de la amilosa.....	13
Figura 1-3	Estructura química de la amilopectina.	13
Figura 1-4	Cinética de la verificación de la gelatinización del almidón.....	17
Figura 1-5	Efecto del pH en la cinética de la hidrólisis enzimática.....	19
Figura 1-6	Temperatura óptima de la actividad enzimática.....	20
Figura 1-7	Cinética clásica de Michaelis – Menten.	23
Figura 1-8	Gráfica de Lineweaver – Burk	25
Figura 1-9	Evaluación de K_m y V_{max} para la ecuación integrada de Michaelis-Menten.....	26
Figura 1-10	Ruta metabólica para la producción de etanol a partir de glucosa	28
Figura 1-11	Fases de crecimiento celular de microorganismos	31
Figura 2-1	Diagrama de bloques del proceso experimental para obtener bioetanol mediante hidrólisis enzimática del camote.....	45
Figura 2-2	Selección del camote	46
Figura 2-3	Pesado del camote	46
Figura 2-4	Lavado del camote comestible	47
Figura 2-5	Cortado del camote comestible	47
Figura 2-6	Secado del camote comestible.....	48
Figura 2-7	Molido del camote comestible seco en molino de rodillos	48
Figura 2-8	Molido del camote comestible en molino de martillos	49
Figura 2-9	Tamizado del camote comestible seco molido.....	50
Figura 2-10	Gelatinización del camote comestible seco.....	50

Figura 2-11	Etapa de licuefacción.....	51
Figura 2-12	Etapa de sacarificación	52
Figura 2-13	Prueba del yodo a medida que avanza la hidrólisis enzimática.....	53
Figura 2-14	Activación de la levadura	54
Figura 2-15	Fermentación alcohólica del mosto	54
Figura 2-16	Filtración.....	55
Figura 2-17	Destilación.....	55
Figura 2-18	Medición del grado alcohólico	56
Figura 3-1	Pérdida de peso del camote comestible	58
Figura 3-2	Porcentaje de humedad del camote comestible	59
Figura 3-3	Cantidad de porcentaje de azúcares reductores formada en función...	64
Figura 3-4	Velocidad de formación de glucosa vs. concentración de sustrato.	65
Figura 3-5	Cinética de la hidrólisis enzimática determinada mediante la ecuación de Michaelis – Menten.	67
Figura 3-6	Prueba 1, tiempo vs. pH y °Brix.	68
Figura 3-7	Prueba 2, tiempo vs. pH y °Brix.	69
Figura 3-8	Prueba 3, tiempo vs. pH y °Brix	69
Figura 3-9	Prueba 4, tiempo vs. pH y °Brix	70
Figura 3-10	Linealización para determinar la cinética de fermentación.....	76
Figura 3-11	Diagrama de flujo del balance de materia en el proceso de obtención de camote comestible seco molido.....	77
Figura 3-12	Etapa de pelado del camote	79
Figura 3-13	Etapa de lavado del camote comestible.....	80
Figura 3-14	Etapa de secado del camote comestible.....	82

Figura 3-15	Etapa de molienda del camote comestible seco	85
Figura 3-16	Etapa de tamizado del camote comestible seco molido	86
Figura 3-17	Resumen general del balance de materia para el acondicionamiento de la materia prima.....	88
Figura 3-18	Diagrama de flujo del balance de materia en el proceso de hidrólisis enzimática.....	89
Figura 3-19	Etapa de dilución	91
Figura 3-20	Etapa de gelatinización de la dilución	92
Figura 3-21	Etapa de licuefacción.....	93
Figura 3-22	Etapa de sacarificación	95
Figura 3-23	Resumen general del balance de materia para el proceso de hidrólisis enzimática.....	96
Figura 3-24	Diagrama de flujo del balance de materia en el proceso de obtención de bioetanol.	97
Figura 3-25	Etapa de preparación del mosto.....	98
Figura 3-26	Etapa de fermentación del mosto	100
Figura 3-27	Etapa de filtración.....	101
Figura 3-28	Etapa de destilación.....	102
Figura 3-29	Resumen general del balance de materia para obtener bioetanol.....	103
Figura 3-30	Etapa del secado de la porción comestible de camote.....	105
Figura 3-31	Etapa de gelatinización para el balance de energía	111
Figura 3-32	Balance de energía en la etapa de licuefacción	114
Figura 3-33	Balance de energía en la etapa de sacarificación.....	116
Figura 3-34	Balance de energía en el balón del sistema de destilación	119

Figura 3-35 Balance de energía en el sistema de refrigeración..... 121

GLOSARIO DE TÉRMINOS

°C: Grados Celsius.

T: Temperatura (°C).

Kg: Kilogramo.

g: gramo.

°GL: Grados alcohólicos Gay Lussac.

g/cm³: gramo por centímetro cúbico.

°Bx: Grados Brix.

pH: Potencial de iones de hidrógeno.

AMG: Amiloglucosidasa o glucoamilasa.

S: Sustrato.

E: Enzima.

ES*: Complejo enzima – sustrato.

E/S: Relación enzima sustrato.

P: Producto.

C_S: Concentración del sustrato.

C_{S0}: Concentración inicial del sustrato.

C_{S1/2}: Concentración de sustrato a la cual la velocidad de reacción es igual a la mitad de la velocidad máxima.

C_E: Concentración de la enzima.

C_{ET}: Concentración para una cantidad total de enzima.

C_{ES*}: Concentración del complejo enzima – sustrato.

C_{E0}: Concentración inicial de la enzima.

K_I: Constante de velocidad para la formación del complejo.

K₂: Constante de velocidad para la reacción inversa.

K₃: Constante de velocidad para la disociación del complejo dando los productos.

K_m: Constante de Michaelis – Menten.

V: Velocidad de reacción.

r_p: Velocidad de formación del producto.

-r_s: Velocidad de desaparición del reactante.

- r_{so}: Velocidad inicial de desaparición del reactante.

r_{po}: Velocidad inicial de formación del producto.

t: Tiempo de hidrólisis.

dt: Diferencial del tiempo.

V_{max}: Velocidad máxima.

r_x : Velocidad de crecimiento de la célula, g/l*h.

μ_{max}: Rapidez específica de crecimiento máxima, min⁻¹.