



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

**ANÁLISIS DEL BIOETANOL OBTENIDO A PARTIR DE PAPA (*Solanum tuberosum*) POR
MEDIO DE HIDRÓLISIS ENZIMÁTICA Y FERMENTACIÓN A ESCALA LABORATORIO**

Marcela Enid Sotoj López

Asesorado por la Inga. Adela María Marroquín González

Guatemala, noviembre de 2016

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

**ANÁLISIS DEL BIOETANOL OBTENIDO A PARTIR DE PAPA (*Solanum tuberosum*) POR
MEDIO DE HIDRÓLISIS ENZIMÁTICA Y FERMENTACIÓN A ESCALA LABORATORIO**

TRABAJO DE GRADUACIÓN

PRESENTADO A LA JUNTA DIRECTIVA DE LA
FACULTAD DE INGENIERÍA
POR

MARCELA ENID SOTOJ LÓPEZ

ASESORADO POR LA INGA. ADELA MARÍA MARROQUÍN GONZÁLEZ

AL CONFERÍRSELE EL TÍTULO DE

INGENIERA QUÍMICA

GUATEMALA, NOVIEMBRE DE 2016

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA
FACULTAD DE INGENIERÍA



NÓMINA DE JUNTA DIRECTIVA

DECANO	Ing. Pedro Antonio Aguilar Polanco
VOCAL I	Ing. Angel Roberto Sic García
VOCAL II	Ing. Pablo Christian de León Rodríguez
VOCAL III	Inga. Elvia Miriam Ruballos Samayoa
VOCAL IV	Br. Raúl Eduardo Ticún Córdova
VOCAL V	Br. Henry Fernando Duarte García
SECRETARIA	Inga. Lesbia Magalí Herrera López

TRIBUNAL QUE PRACTICÓ EL EXAMEN GENERAL PRIVADO

DECANO	Ing. Pedro Antonio Aguilar Polanco
EXAMINADORA	Inga. Hilda Piedad Palma Ramos
EXAMINADOR	Ing. Jaime Domingo Carranza González
EXAMINADOR	Ing. Manuel Gilberto Galván Estrada
SECRETARIA	Inga. Lesbia Magalí Herrera López

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:

ANÁLISIS DEL BIOETANOL OBTENIDO A PARTIR DE PAPA (*Solanum tuberosum*) POR MEDIO DE HIDRÓLISIS ENZIMÁTICA Y FERMENTACIÓN A ESCALA LABORATORIO

Tema que me fuera asignado por la Dirección de la Escuela de Ingeniería Química, con fecha 31 de mayo de 2015.


Marcela Enid Sotoj López



Guatemala 05 de septiembre de 2016

Ingeniero
Carlos Salvador Wong Davi
Director
Escuela de Ingeniería Química
Facultad de Ingeniería - USAC

Respetable Ingeniero Wong Davi

Esperando que tenga éxitos en sus actividades laborales, por este medio hago de su conocimiento que, en mi calidad de asesora del trabajo de graduación de la estudiante **MARCELA ENID SOTOJ LÓPEZ**, quien se identifica con carné No. 2010-20244 he revisado el Informe Final de trabajo de graduación titulado **"ANÁLISIS DEL BIOETANOL OBTENIDO A PARTIR DE PAPA (*Solanum tuberosum*) POR MEDIO DE HIDRÓLISIS ENZIMÁTICA Y FERMENTACIÓN A ESCALA LABORATORIO**. Por lo que considero que el presente informe cumple con los requisitos necesarios para ser presentado ante las autoridades de la Escuela de Ingeniería Química y lo doy por aprobado.

Por lo tanto dejo a su consideración que la estudiante SOTOJ LÓPEZ continúe con los trámites pertinentes para la defensa y aprobación del mismo ante la terna evaluadora y su persona.
Sin otro particular le agradezco su amable deferencia a la presente y me despido de usted.

Atentamente,


Inga. Qca. Adela María Marroquín González
ASESORA

Profesora Interina Colegiado 1446
Escuela de Ingeniería Química FIUSAC
e-mail: adelamarro@gmail.com
Tel. 56965761

Adela María Marroquín González
Ingeniera Química Col. No. 1446





Guatemala, 10 de octubre de 2016.
Ref. EIQ.TG-IF.057.2016.

Ingeniero
Carlos Salvador Wong Davi
DIRECTOR
Escuela de Ingeniería Química
Facultad de Ingeniería

Estimado Ingeniero Wong:

Como consta en el registro de evaluación del informe final EIQ-PRO-REG-007 correlativo **048-2015** le informo que reunidos los Miembros de la Terna nombrada por la Escuela de Ingeniería Química, se practicó la revisión del:

INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADUACIÓN

Solicitado por la estudiante universitaria: **Marcela Enid Sotoj López**.
Identificada con número de carné: **2010-20244**.
Previo a optar al título de **INGENIERA QUÍMICA**.


Siguiendo los procedimientos de revisión interna de la Escuela de Ingeniería Química, los Miembros de la Terna han procedido a **APROBARLO** con el siguiente título:

**ANÁLISIS DEL BIOTANOL OBTENIDO A PARTIR DE PAPA (*Solanum tuberosum*)
POR MEDIO DE HIDRÓLISIS ENZIMÁTICA Y FERMENTACIÓN A ESCALA
LABORATORIO**

El Trabajo de Graduación ha sido asesorado por la Ingeniera Química: **Adela María Marroquín González**.

Habiendo encontrado el referido informe final del trabajo de graduación **SATISFACTORIO**, se autoriza al estudiante, proceder con los trámites requeridos de acuerdo a las normas y procedimientos establecidos por la Facultad para su autorización e impresión.

"ID Y ENSEÑAD A TODOS"


~~Inga. Cynthia Patricia Ortiz Quiroa~~
COORDINADORA DE TERNA
Tribunal de Revisión
Trabajo de Graduación



C.c.: archivo





Ref.EIQ.TG.069.2016

El Director de la Escuela de Ingeniería Química de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer el dictamen del Asesor y de los Miembros del Tribunal nombrado por la Escuela de Ingeniería Química para revisar el Informe del Trabajo de Graduación de la estudiante, **MARCELA ENID SOTOJ LÓPEZ** titulado: **"ANÁLISIS DE BIOETANOL OBTENIDO A PARTIR DE PAPA (*Solanum tuberosum*) POR MEDIO DE HIDRÓLISIS ENZIMÁTICA Y FERMENTACIÓN A ESCALA LABORATORIO"**. Procede a la autorización del mismo, ya que reúne el rigor, la secuencia, la pertinencia y la coherencia metodológica requerida.

"Id y Enseñad a Todos"

Ing. Carlos Salvador Wong Davi
Director
Escuela de Ingeniería Química



Guatemala, noviembre 2016

Cc: Archivo
CSWD/ale



Universidad de San Carlos
de Guatemala

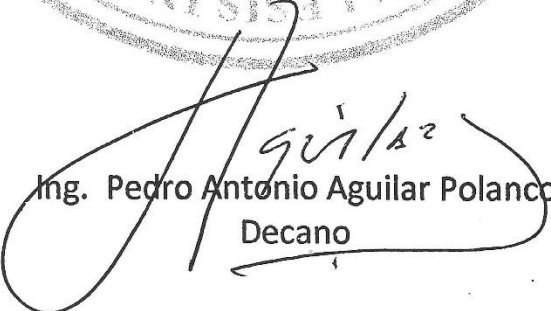


Facultad de Ingeniería
Decanato

DTG. 585.2016

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: **ANÁLISIS DEL BIOETANOL OBTENIDO A PARTIR DE PAPA (*Solanum tuberosum*) POR MEDIO DE HIDRÓLISIS ENZIMÁTICA Y FERMENTACIÓN A ESCALA LABORATORIO**, presentado por la estudiante universitaria: **Marcela Enid Sotoj López**, 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, noviembre de 2016

/gdech



ACTO QUE DEDICO A:

- Dios** Por todas sus bendiciones, por ser mi guía y demostrarme que tiene todo bajo control.
- Mis padres** Williams Sotoj y Teresa López, por todo su apoyo incondicional, por motivarme a seguir adelante y por sus sacrificios, todos estos años.
- Mis hermanos** McWilliams, Mijail y Marcy Sotoj López, por su ayuda en todo momento y por motivarme a no rendirme.
- Mis familiares** Por su apoyo y por estar siempre pendientes de mí.

AGRADECIMIENTOS A:

Universidad de San Carlos de Guatemala	Por ser mi casa de estudios.
Facultad de Ingeniería	Por permitirme realizar mis estudios y darme la oportunidad de ser una profesional.
Mis padres	Por estar a mi lado, brindándome su apoyo incondicional.
Mis hermanos	Por su ayuda en todo momento.
Mi asesora	Inga. Qca. Adela María Marroquín González, por su paciencia y guía en el trabajo de graduación.
Mi revisora	Inga. Qca. Cinthya Patricia Ortiz Quiroa, por sus conocimientos para realizar el trabajo de graduación.
Mis amigos	Por estar siempre a mi lado, brindándome su amistad y su apoyo durante la carrera.
Hemm-Tech	Por su apoyo para poder realizar el trabajo de graduación.

ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES.....	V
LISTA DE SÍMBOLOS	XI
GLOSARIO	XIII
RESUMEN.....	XV
OBJETIVOS.....	XVII
Hipótesis	XVIII
INTRODUCCIÓN	XXIII
1. ANTECEDENTES.....	1
2. MARCO TEÓRICO	3
2.1. Papa (<i>Solanum tuberosum</i>).....	3
2.1.1. Generalidades de la papa (<i>Solanum tuberosum</i>)	3
2.2. Bioetanol	4
2.2.1. Tipos de materias primas utilizadas para la producción de bioetanol.....	5
2.3. Secado	6
2.3.1. Contenido de humedad	6
2.3.1.1. Contenido de humedad en base seca	6
2.3.1.2. Contenido de humedad en base húmeda.....	6
2.4. Almidón	7
2.4.1. Generalidades del almidón	7
2.4.2. Componentes del almidón	7
2.4.2.1. Amilosa	8

	2.4.2.2.	Amilopectina	8
	2.4.3.	Gelatinización	9
	2.4.4.	Retrogradación	10
	2.4.5.	Prueba del yodo para almidón.....	12
2.5.		Hidrólisis	13
	2.5.1.	Hidrólisis del almidón	13
		2.5.1.1. Hidrólisis enzimática del almidón.....	13
		2.5.1.1.1. Licuefacción.....	14
		2.5.1.1.2. Sacarificación	14
		2.5.1.2. Hidrólisis química del almidón	14
2.6.		Grados Brix	15
	2.6.1.	Refractómetro.....	15
		2.6.1.1. Refracción de la luz	15
		2.6.1.2. Índice de refracción	16
		2.6.1.3. Ley de refracción (ley de Snell)	17
		2.6.1.4. Método de medición de los grados Brix	18
2.7.		Fermentación	19
	2.7.1.	Tipos de fermentación	19
		2.7.1.1. Levadura (<i>Saccharomyces cerevisiae</i>)...20	
	2.7.2.	Prueba de Fehling	20
2.8.		Destilación.....	21
2.9.		Alcoholes	21
	2.9.1.	Clasificación de los alcoholes.....	21
	2.9.2.	Prueba del sodio	22
3.		DISEÑO METODOLÓGICO	23
	3.1.	Variables	23
	3.2.	Delimitación de campo de estudio	24

3.3.	Recursos humanos disponibles.....	24
3.4.	Recursos materiales disponibles.....	24
3.5.	Técnica cualitativa y cuantitativa.....	26
3.6.	Recolección y ordenamiento de la información.....	27
3.6.1.	Método de obtención de harina de papa.....	27
3.6.2.	Método de obtención de bioetanol de papa.....	28
3.6.2.1.	Esquema de los reactores utilizados para la obtención de bioetanol de papa.....	29
3.7.	Tabulación, ordenamiento y procesamiento de la información..	32
3.7.1.	Tabulación de la información.....	32
3.8.	Análisis estadístico.....	32
3.8.1.	Número de repeticiones.....	33
3.8.2.	Cálculo de la media.....	33
3.8.3.	Cálculo de la desviación estándar.....	34
3.8.4.	Cálculo del coeficiente de variación.....	34
3.8.5.	Análisis de varianza (ANOVA).....	35
4.	RESULTADOS.....	39
5.	INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS.....	61
	CONCLUSIONES.....	67
	RECOMENDACIONES.....	69
	BIBLIOGRAFÍA.....	71
	APÉNDICES.....	75
	ANEXOS.....	129

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

FIGURAS

1.	Papa (tubérculo)	3
2.	Molécula de almidón	7
3.	Molécula de amilosa.....	8
4.	Molécula de amilopectina.....	9
5.	Intensidad de hinchamiento de varios almidones comerciales.....	10
6.	Mecanismos de retrogradación del almidón.....	11
7.	Refracción de la luz a través del agua	16
8.	Refracción de la luz.....	17
9.	Pasos para la medición de los grados Brix	18
10.	Clasificación de los alcoholes	22
11.	Obtención de harina de papa.....	27
12.	Obtención de bioetanol de papa	28
13.	Esquema del reactor utilizado para la gelatinización de la harina de papa y de las rodajas de papa (beacker de 1 000mL)	29
14.	Esquema del reactor utilizado para la hidrólisis de la harina de papa y de las rodajas de papa (beacker de 1 000mL)	29
15.	Esquema del reactor utilizado para la fermentación de la harina de papa y de las rodajas de papa (kitasato de 500mL).....	30
16.	Esquema del reactor utilizado para la destilación del hidrolizado de la harina de papa y de las rodajas de papa (balón aforado de 250mL)	30

17.	Esquema del reactor utilizado para la condensación del bioetanol de harina de papa y de rodajas de papa (condensador de tubo recto)	31
18.	Esquema del equipo utilizado para la destilación del bioetanol de harina de papa y de rodajas de papa.....	31
19.	Disminución de masa de rodajas de papa, de la número 1 a la número 20, en función del tiempo de secado	39
20.	Reducción total de largo en función de la masa inicial, de las rodajas de papa	40
21.	Reducción total de ancho en función de la masa inicial, de las rodajas de papa	41
22.	Contenido de humedad en función de la masa inicial de las rodajas de papa.....	42
23.	Aumento de volumen de la harina en 1 000mL de agua, en función del tiempo de gelatinización.....	43
24.	Aumento de volumen de la harina en 100mL de agua, en función del tiempo de gelatinización.....	44
25.	Concentración en grados Brix de la hidrólisis de 10 % de harina de papa en 1 000mL, según el porcentaje de enzima agregado, durante 48 horas a 65°C	46
26.	Concentración en grados Brix de la hidrólisis de 15 % de harina de papa en 1 000mL, según el porcentaje de enzima agregado, durante 48 horas a 65°C	47
27.	Concentración en grados Brix de la hidrólisis de 9 % de rodajas de papa en 1 000mL, según el porcentaje de enzima agregado, durante 48 horas a 65°C	49
28.	pH de la hidrólisis de 10 % de harina de papa en 1 000mL, según el porcentaje de enzima agregado, durante 48 horas a 65°C.....	51

29.	pH de la hidrólisis de 15 % de harina de papa en 1 000mL, según el porcentaje de enzima agregado, durante 48 horas a 65°C	53
30.	pH de la hidrólisis de 9 % de rodajas de papa en 1 000mL, según el porcentaje de enzima agregado, durante 48 horas a 65°C	55
31.	Porcentaje de bioetanol, según el porcentaje de enzima	57

TABLAS

I.	Variables a escala laboratorio	23
II.	Organización de datos para el análisis de varianza (ANOVA)	35
III.	Tabla de análisis de varianza generalizada	37
IV.	Porcentaje de reducción de masa	39
V.	Representación de la tendencia de la reducción total de largo en función de la masa inicial	40
VI.	Representación de la tendencia de la reducción total de ancho en función de la masa inicial	41
VII.	Porcentaje promedio de reducción de largo y ancho de las rodajas de papa	42
VIII.	Representación de la tendencia del contenido de humedad en función de la masa inicial de las rodajas de papa	43
IX.	Humedad total de la harina	43
X.	Representación de las tendencias del aumento de volumen de la harina en 1 000mL de agua	44
XI.	Representación de las tendencias del aumento de volumen de la harina en 100mL de agua	45
XII.	Aumento de volumen de la harina durante la gelatinización	45
XIII.	Representación de las tendencias de la concentración en grados Brix de la hidrólisis de 10 % de harina de papa	46

XIV.	Coeficiente de variación de la concentración en grados Brix de la hidrólisis de 10 % de harina de papa, según el porcentaje de enzima	47
XV.	Representación de las tendencias de la concentración en grados Brix de la hidrólisis de 15 % de harina de papa	48
XVI.	Coeficiente de variación de la concentración en grados Brix de la hidrólisis de 15 % de harina de papa, según el porcentaje de enzima	48
XVII.	Análisis de varianza de la concentración en grados Brix de las soluciones con harina (10 %m/V y 15 %m/V)	48
XVIII.	Diferencia de la concentración en grados Brix de las soluciones con harina (10 %m/V y 15 %m/V).....	49
XIX.	Representación de las tendencias de la concentración en grados Brix de la hidrólisis de 9 % de rodajas de papa	50
XX.	Coeficiente de variación de la concentración en grados Brix de la hidrólisis de 9 % de rodajas de papa, según el porcentaje de enzima	50
XXI.	Análisis de varianza de la concentración en grados Brix para las hipótesis H_{11} y H_{01}	50
XXII.	Diferencia de la concentración en grados Brix de la solución con harina (15 %m/V) y de la solución con rodajas de papa (9 %m/V)	51
XXIII.	Representación de las tendencias del pH de la hidrólisis de 10 % de harina de papa	52
XXIV.	Coeficiente de variación del pH de la hidrólisis de 10 % de harina de papa, según el porcentaje de enzima	52
XXV.	Representación de las tendencias del pH de la hidrólisis de 15 % de harina de papa	53
XXVI.	Coeficiente de variación del pH de la hidrólisis de 15 % de harina de papa, según el porcentaje de enzima	54

XXVII.	Análisis de varianza del pH de las soluciones con harina (10 %m/V y 15 %m/V).....	54
XXVIII.	Diferencia del pH de las soluciones con harina (10 %m/V y 15 %m/V) 54	
XXIX.	Representación de las tendencias del pH de la hidrólisis de 9 % de rodajas de papa	55
XXX.	Coeficiente de variación del pH de la hidrólisis de 9 % de rodajas de papa, según el porcentaje de enzima.....	56
XXXI.	Análisis de varianza del pH para las hipótesis H_{i2} y H_{02}	56
XXXII.	Diferencia del pH de la solución con harina (15 %m/V) y de la solución con rodajas de papa (9 %m/V).....	56
XXXIII.	Representación de las tendencias del porcentaje de bioetanol	57
XXXIV.	Coeficiente de variación del porcentaje de bioetanol, según el porcentaje de enzima	58
XXXV.	Análisis de varianza del bioetanol obtenido de las soluciones con harina (10 %m/V y 15 %m/V)	58
XXXVI.	Diferencia del bioetanol obtenido de las soluciones con harina (10 %m/V y 15 %m/V)	58
XXXVII.	Análisis de varianza del bioetanol para las hipótesis H_{i3} y H_{03}	59
XXXVIII.	Diferencia del bioetanol obtenido de la solución con harina (15 %m/V) y de la solución con rodajas de papa (9 %m/V)	59

LISTA DE SÍMBOLOS

Símbolo	Significado
Δ	Cambio
cm	Centímetro
R^2	Coeficiente de correlación
CV	Coeficiente de variación
S	Desviación estándar
°Brix	Grados Brix
°C	Grados celsius
g	Gramo
h	Hora
m	Masa
mL	Mililitro
%	Porcentaje
\bar{x}	Promedio
F_c	Valor F crítico
F_T	Valor F tabulado
V	Volumen

GLOSARIO

Azúcares reductores	Monosacáridos o disacáridos que ceden electrones a otras moléculas, oxidándose en el proceso y actuando como agentes reductores.
Biocombustibles	Combustibles de origen biológico obtenidos de manera renovable a partir de materia orgánica que no contaminan el medio ambiente.
Biomasa	Materia orgánica utilizada como fuente energética, puede ser de origen vegetal o animal, incluyendo residuos y desechos orgánicos.
Catalizador	Sustancia que acelera o retarda una reacción química sin participar en ella.
Enzimas	Proteínas que catalizan reacciones químicas, seleccionando la molécula en la cual actúan, de acuerdo a su afinidad.
Hidrolasas	Enzimas utilizadas para catalizar reacciones que implican la ruptura hidrolítica de distintos tipos de enlaces químicos.
Humedad	Cantidad de agua presente en la superficie o en el interior de un cuerpo.

Monosacáridos	Carbohidratos simples que poseen de tres a siete átomos de carbono, con la fórmula general $(CH_2O)_n$.
Oligosacáridos	Carbohidratos que consisten en la unión de once a cientos de miles monosacárido cíclicos, lineales o ramificados.
pH	Medida de acidez o alcalinidad de una solución acuosa, indicando la concentración de iones hidrógeno presentes.
Polisacáridos	Carbohidratos formados de dos a diez moléculas de monosacáridos.

RESUMEN

Se analizó el bioetanol obtenido a partir de papa (*Solanum tuberosum*) por medio de hidrólisis enzimática, utilizando amilasas y posterior fermentación alcohólica con levadura (*Saccharomyces cerevisiae*) a escala laboratorio.

Para la obtención de bioetanol se preparó harina, la cual se obtuvo con una humedad final de 19,28 %. Posteriormente la harina se gelatinizó, aumentando su volumen inicial 10 veces; simultáneamente se gelatinizaron rodajas de papa. La harina gelatinizada se utilizó para preparar soluciones con concentraciones distintas de harina y las rodajas de papa gelatinizada para preparar una solución. La concentración en grados Brix obtenida de la solución con rodajas de papa, fue mayor a la de las soluciones con harina. Mientras mayor fue la concentración en grados Brix, menor fue el pH. Los porcentajes máximos de bioetanol obtenidos fueron 11,7 % en las soluciones con harina (10 %m/V y 15 %m/V) y 18,6 % con la solución con rodajas de papa (9 %m/V).

OBJETIVOS

General

Analizar el bioetanol obtenido a partir de papa (*Solanum tuberosum*) mediante hidrólisis enzimática, utilizando enzimas amilasas y posterior fermentación con levadura (*Saccharomyces cerevisiae*) a escala laboratorio.

Específicos

1. Determinar el largo y ancho de rodajas de papa para obtener una harina con humedad final baja, así como el tiempo óptimo de secado.
2. Cuantificar el cambio de volumen al gelatinizar harina de papa en agua, en la reacción de hidrólisis.
3. Comparar los grados Brix provenientes del almidón de la papa realizando dos soluciones con concentraciones distintas de harina de papa gelatinizada y una solución con rodajas de papa.
4. Determinar el modelo de la cinética, por método gráfico, de la reacción de hidrólisis, utilizando como parámetro la concentración en grados Brix.
5. Analizar el efecto del pH durante la hidrólisis enzimática de harina de papa y rodajas de papa.
6. Calcular el porcentaje de bioetanol obtenido con harina de papa y rodajas de papa.

Hipótesis

Hipótesis de trabajo

Es factible obtener bioetanol a partir de papa (*Solanum tuberosum*), preparándose dos soluciones con concentraciones distintas de harina de papa gelatinizada (10 %m/V y 15 %m/V) y una solución con rodajas de papa con cáscara (9 %m/V), por medio de hidrólisis enzimática, utilizándose amilasas y posterior fermentación alcohólica, utilizándose levadura (*Saccharomyces cerevisiae*) a escala laboratorio.

Hipótesis de investigación: H_{i1}

Existe diferencia significativa en la concentración en grados Brix de la solución con harina de papa gelatinizada (15 %m/V) y de la solución con rodajas de papa (9 %m/V) en distintos tiempos de hidrólisis enzimática.

$$\mu_w \neq \mu_x \neq \mu_y \neq \mu_z$$

Donde:

μ_w = Concentración en grados Brix respecto a 1 hora

μ_x = Concentración en grados Brix respecto a 2 horas

μ_y = Concentración en grados Brix respecto a 3 horas

μ_z = Concentración en grados Brix respecto a 4 horas

Hipótesis nula: H₀₁

No existe diferencia significativa en la concentración en grados Brix de la solución con harina de papa gelatinizada (15 %m/V) y de la solución con rodajas de papa (9 %m/V) en distintos tiempos de hidrólisis enzimática.

$$\mu_w = \mu_x = \mu_y = \mu_z$$

Donde:

μ_w = Concentración en grados Brix respecto a 1 hora

μ_x = Concentración en grados Brix respecto a 2 horas

μ_y = Concentración en grados Brix respecto a 3 horas

μ_z = Concentración en grados Brix respecto a 4 horas

Hipótesis de investigación: H₁₂

El pH de la solución con harina de papa gelatinizada (15 %m/V) y de la solución con rodajas de papa (9 %m/V) varía significativamente con la concentración en grados Brix.

$$\mu_w \neq \mu_x \neq \mu_y \neq \mu_z$$

Donde:

μ_w = pH respecto a 1 hora

μ_x = pH respecto a 2 horas

μ_y = pH respecto a 3 horas

μ_z = pH respecto a 4 horas

Hipótesis nula: H₀₂

El pH de la solución con harina de papa gelatinizada (15 %m/V) y de la solución con rodajas de papa (9 %m/V) no varía significativamente con la concentración en grados Brix.

$$\mu_w = \mu_x = \mu_y = \mu_z$$

Donde:

μ_w = pH respecto a 1 hora

μ_x = pH respecto a 2 horas

μ_y = pH respecto a 3 horas

μ_z = pH respecto a 4 horas

Hipótesis de investigación: H_{i3}

El porcentaje de bioetanol obtenido de la solución con rodajas de papa (9 %m/V) es mayor al obtenido de la solución con harina de papa gelatinizada (15 %m/V).

$$\mu_x \neq \mu_z$$

Donde:

μ_x = Porcentaje de bioetanol respecto a la solución con 15 %m/V de harina

μ_z = Porcentaje de bioetanol respecto a la solución con 9 %m/V de rodajas de papa

Hipótesis nula: H_{03}

El porcentaje de bioetanol obtenido de la solución con rodajas de papa (9 %m/V) no es mayor al obtenido de la solución con harina de papa gelatinizada (15 %m/V).

$$\mu_x = \mu_z$$

Donde:

μ_x = Porcentaje de bioetanol respecto a la solución con 15 %m/V de harina

μ_z = Porcentaje de bioetanol respecto a la solución con 9 %m/V de rodajas de papa

INTRODUCCIÓN

El bioetanol es un alcohol que se obtiene a partir de la fermentación del azúcar o del almidón vegetal proveniente de cultivos agrícolas, y es el sustituto ecológico de la gasolina obtenida a partir de productos petrolíferos.

Las materias primas para la producción del bioetanol son: maíz, remolacha, papas, caña de azúcar, trigo, etc. Cuando se utiliza papa se extrae el almidón, este se convierte en azúcar y luego en etanol. La producción de etanol, a partir de materia de origen agrícola, es una tecnología desarrollada suficientemente a nivel industrial.

El biocombustible más importante es el bioetanol el cual, al ser utilizado con la gasolina, actúa como oxigenante elevando el contenido de oxígeno y permitiendo una mejor combustión de la misma, además de disminuir las emisiones contaminantes de hidrocarburos no oxidados completamente.

1. ANTECEDENTES

En el año 2008, Castaño P., Hader I. y Mejía G., Carlos E., realizaron el estudio “*Producción de etanol a partir de almidón de yuca utilizando la estrategia de proceso sacarificación-fermentación simultáneas (ssf)*”, publicado en el volumen 15, número 2 de la *Revista de la Facultad de Química Farmacéutica* de la Universidad de Antioquia, Medellín, Colombia. Las cinéticas de proceso, frente a las del control, presentaron reducciones de tiempo de 47 % y 33 % para los niveles de sustrato evaluados. Los niveles de productividad fueron mayores en un 33 % para el nivel de 150 g/L de azúcares reductores y se mantuvieron constantes para 200 g/L. El proceso SSF demostró su viabilidad técnica en la producción de alcohol, al reducir los tiempos y necesidades de energía en la producción de alcohol carburante, a partir de almidón de yuca.

En el año 2011, Ramos-Ponce, L.M.; Valdez-Peña, A.U.; Montañez, J.C.; Espinoza, J.D.; Rendón-Villalobos, R.; Bello-Pérez, L.A. y Contreras-Esquivel, J.C., realizaron un estudio titulado “*Biotransformación del almidón de jícama*”, presentado en el XI Congreso Nacional de Biotecnología y Bioingeniería en el área de Biotecnología Alimentaria, realizado en la Universidad Autónoma de Coahuila, Facultad de Ciencias Químicas, Departamento de Investigación en Alimentos. El almidón de jícama presentó similitud físico-química con el almidón de papa. La biotransformación del almidón de jícama en glucosa puede ser lograda en forma eficiente mediante el uso de una licuefacción y sacarificación enzimática. Se logró la conversión de las dextrinas de jícama y papa a glucosa con rendimientos mayores al 90 %.

En el año 2008, Rojas Pérez, Lilia C.; Caicedo Mesa, Luis A.; Aguilar Arias, Jaime L. y Martínez Ramírez, Liliana R., realizaron el proyecto “*Evaluación de la sacarificación de yuca mediante el proceso convencional y el proceso low-energy, para su posterior determinación de la cinética de reacción*”, publicado en la *Revista Tecnológica* número 21 de la Universidad Nacional de Colombia, Facultad de Ingeniería Química. Se determinó que el efecto global de la hidrólisis de yuca, al tratarse por separado el parénquima interno (parte interna de la yuca) y externo (cáscara) de la misma, arroja diferencias en la producción de azúcares fermentables. En cuanto al porcentaje de humedad, contenido de almidón y proteína en base seca, se presentaron valores mayores para el parénquima externo que para el interno. Se puede incrementar la eficiencia de la hidrólisis enzimática, hidrolizando no solamente el almidón sino también la celulosa presente en la fibra de la yuca.

En el año 2013, Herrera Escobar, Ángel de Jesús y Meers Díaz, Roberto Carlos, realizaron el estudio “*Diseño de las etapas de hidrólisis de almidón y fermentación para producir bioetanol basado en la respuesta dinámica del sistema*” para optar para el título de Ingeniero Químico en la Facultad de Ingeniería, Universidad de Cartagena, Colombia. Fueron diseñadas las etapas de hidrólisis y fermentación para producir bioetanol a partir de almidón de yuca amarga, basándose en la respuesta dinámica del sistema, con el fin de obtener un proceso continuo estable y con alto rendimiento de producto. Se simuló el arranque de cada etapa en un biorreactor de tanque agitado continuo (CSTBR) utilizando códigos programados en Matlab. Los resultados permitieron determinar el efecto de la velocidad de dilución, y la concentración de alimentación de sustrato sobre la estabilidad de ambas etapas, así como el efecto de la temperatura sobre la estabilidad del proceso de fermentación. Se obtuvo un diseño integral al incluir un análisis coherente de la respuesta dinámica del sistema para cada una de las etapas.

2. MARCO TEÓRICO

2.1. Papa (*Solanum tuberosum*)

2.1.1. Generalidades de la papa (*Solanum tuberosum*)

La papa es un tubérculo comestible extraído de la planta herbácea americana, *Solanum tuberosum*. Probablemente su origen sea andino. Las condiciones de cultivo de las distintas especies varían, sin embargo, se desarrollan mejor en suelos ricos en humus, sueltos y arenosos. Siendo la temperatura óptima para su desarrollo entre los 10 y 25°C. Las temperaturas inferiores a 0°C le son dañinas, causando un daño extremo a los -5°C. En primavera y al principio verano, la planta florece según el área donde se cultive. Sus aplicaciones en la industria son infinitas, entre las cuales están: los cosméticos, alcohol, plástico ecológico y papel prensa.

Figura 1. Papa (tubérculo)



Fuente: EcuRed. Papa (Tubérculo). [www.ecured.cu/index.php/Papa_\(Tub%C3%A9rculo\)](http://www.ecured.cu/index.php/Papa_(Tub%C3%A9rculo)).

Consulta: 22 de abril de 2015.

2.2. Bioetanol

El bioetanol es un alcohol producido a partir de materia orgánica como maíz, caña de azúcar, trigo, frutas, verduras e incluso biomasa. El cual se utiliza como combustible o como aditivo de la gasolina, debido a que las reservas del petróleo se agotan de igual manera que las del gas natural, siendo una fuente de energía ecológica que tiene un bajo impacto ambiental. La diferencia radica en que el bioetanol es un biocombustible renovable y el petróleo es un combustible fósil. Al utilizar biocombustibles se pueden reducir considerablemente las emisiones de gases de efecto invernadero que contribuyen al calentamiento global, sobrecalentando la superficie terrestre y acelerando el cambio climático. Con la transformación de materia orgánica en biocombustibles se reduciría la dependencia de los combustibles fósiles, además de impulsar la actividad agrícola e industrial.

El bioetanol, al ser utilizado como aditivo de la gasolina, sustituye a esta parcialmente como carburante, elevando la cantidad de oxígeno presente en la mezcla, ya que actúa como oxigenante, permitiendo una mejor combustión de la gasolina. El bioetanol se puede mezclar con la gasolina en cualquier proporción, sin necesidad de realizar cambios en el motor. No se sustituye totalmente a la gasolina, ya que esta le da a la mezcla estabilidad y resta volatilidad, así como también facilita su uso, su transporte y almacenamiento. Las mezclas más usadas en la actualidad son las denominadas e5, e10 y e85, siendo estas mezclas de gasolina con un 5 %, un 10 % y un 85 % de etanol, respectivamente. Cuanto mayor es el porcentaje de etanol, menor la cantidad de emisiones de gases de efecto invernadero.

2.2.1. Tipos de materias primas utilizadas para la producción de bioetanol

Las materias primas para la producción de etanol se pueden clasificar en tres grupos: las que contienen azúcar, las que contienen almidón y las que contienen celulosa.

- Azúcar: remolacha azucarera, caña de azúcar, fruta
- Almidón: cereales, papas
- Celulosa: algas, madera

Los procesos de fermentación y destilación para el almidón y el azúcar con similares, teniendo como diferencias la preparación para la fermentación y el tipo de subproductos.

La elección de la materia prima que se utiliza, se determina de acuerdo a la temporada de actividad de las plantas y su almacenamiento. Los cereales se almacenan de la misma manera, si son para producir etanol como si son para alimentación, controlando su grado de humedad.

Con la caña de azúcar y la remolacha azucarera se debe trabajar rápidamente, debido a esto, en la industria azucarera, el azúcar se almacena en forma de melaza para que dure mucho más. El almidón de las papas tarda un poco más en deteriorarse, por lo que las papas se pueden almacenar aproximadamente durante seis meses. Debido a que la fruta pasada dura muy poco hay que procesarla lo antes posible, dando como resultado una alta cantidad de alcohol.

2.3. Secado

El secado consiste en eliminar pequeñas cantidades de agua u otro líquido dentro de un sólido para disminuir su contenido de humedad. Se debe tomar en cuenta la cantidad del sólido a secar, la naturaleza del disolvente a eliminar y la sensibilidad del sólido al calor. La cantidad de agua que se extrae depende del grosor de sólido ya que mientras mayor sea este, más difícil es eliminar el agua contenida, esto es debido a que la masa de agua presente en el sólido es una propiedad extensiva y su cantidad depende del tamaño del sólido.

2.3.1. Contenido de humedad

El contenido de humedad de un sólido, después del secado, se puede expresar en base seca o en base húmeda

2.3.1.1. Contenido de humedad en base seca

$$X_{BS} = \frac{m_{sh} - m_{ss}}{m_{ss}}$$

2.3.1.2. Contenido de humedad en base húmeda

$$X_{BH} = \frac{m_{sh} - m_{ss}}{m_{sh}}$$

Donde:

X_{BS} = Contenido de humedad en base seca

X_{BH} = Contenido de humedad en base húmeda

m_{sh} = Masa del sólido húmedo (g)

m_{ss} = Masa del sólido seco (g)

2.4. Almidón

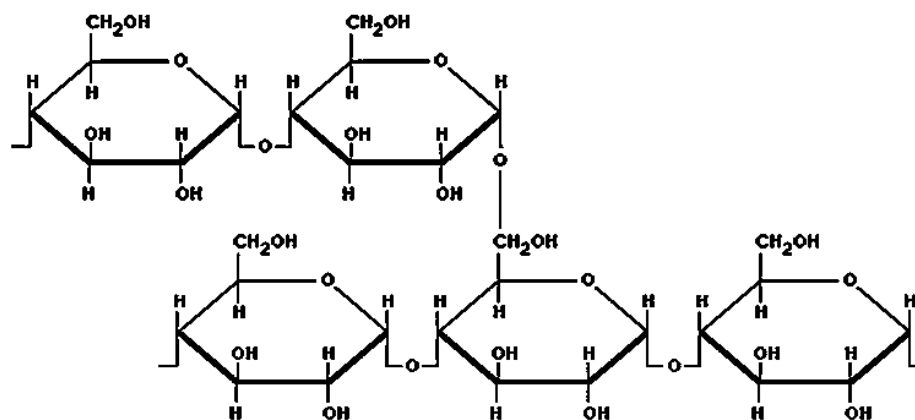
2.4.1. Generalidades del almidón

El almidón es un polisacárido que se emplea en la industria alimentaria, textil y papelera. Los almidones y los almidones modificados se emplean en la industria alimenticia como: adhesivo, ligante, enturbiante, formador de películas, estabilizante de espumas, agente anti-envejecimiento de pan, gelificante, glaseante, humectante, estabilizante, texturizante y espesante.

2.4.2. Componentes del almidón

El almidón está compuesto por amilosa y amilopectina, la proporción de estos varía según la materia orgánica en que se encuentran. La amilosa es un polisacárido lineal y la amilopectina un polisacárido con una estructura ramificada. La amilosa y la amilopectina son polímeros de α -D-Glucosa.

Figura 2. Molécula de almidón



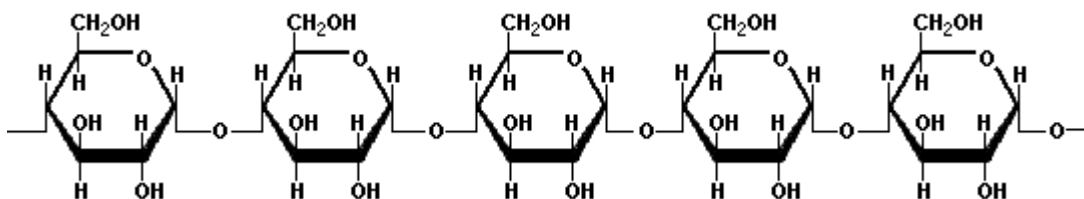
Fuente: *EcuRed. Almidón*. www.ecured.cu/index.php/Almid%C3%B3n. Consulta: 22 de abril de 2015.

2.4.2.1. Amilosa

La molécula de amilosa es una cadena lineal debido al ángulo que forman los enlaces entre las moléculas de glucosa y constituye del 10 al 20 % del almidón. Está formada por 200 a 20 000 unidades de glucosa mediante enlaces α (1-4), llamados enlaces glucosídicos.

La amilosa forma una dispersión coloidal en agua caliente por lo que se utiliza como espesante en la industria alimenticia, mientras que la amilopectina es insoluble en agua.

Figura 3. Molécula de amilosa



Fuente: *Scientific Psychic. Carbohidratos o glúcidos - Estructura química.*

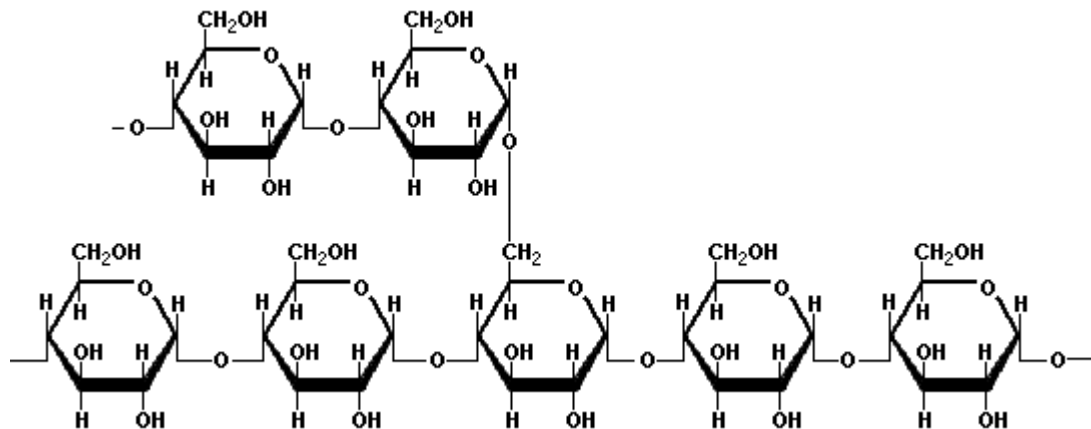
www.scientificpsychic.com/fitness/carbohidratos1.html. Consulta: 1 de junio de 2016.

2.4.2.2. Amilopectina

La molécula de amilopectina es muy ramificada en comparación con la amilosa que es una cadena lineal. En esta molécula cadenas laterales cortas con aproximadamente 30 unidades de glucosa se unen con enlaces α (1-6) cada veinte o treinta unidades de glucosa a lo largo de las cadenas principales, dando una cadena altamente ramificada.

Las moléculas de amilopectina pueden contener hasta dos millones de unidades de glucosa y constituye del 80 al 90 % del almidón.

Figura 4. **Molécula de amilopectina**



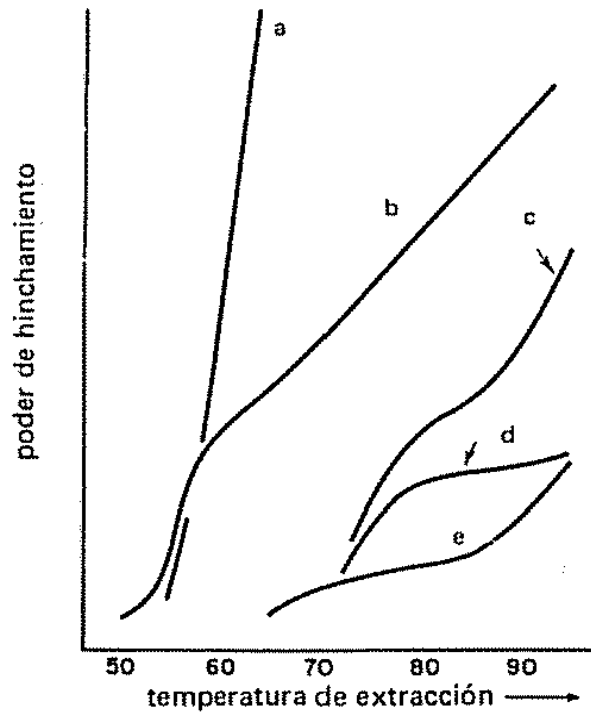
Fuente: *Scientific Psychic. Carbohidratos o glúcidos - Estructura química.*

www.scientificpsychic.com/fitness/carbohidratos1.html. Consulta: 1 de junio de 2016.

2.4.3. **Gelatinización**

Es el proceso realizado para obtener una pasta o un gel a partir de los gránulos de almidón, debido a que estos son insolubles en agua fría se calientan de 60-70°C, su insolubilidad se debe a que su estructura es altamente organizada, donde absorben agua las zonas amorfas, las cuales son menos organizadas y más accesibles. Mientras más alta sea la temperatura más retiene agua y debido a esto se hinchan y aumentan de volumen; al llegar a cierta temperatura los gránulos alcanzan su volumen máximo. El rango de temperatura en la cual todos los gránulos se hinchan se conoce como, Rango de Gelatinización.

Figura 5. **Intensidad de hinchamiento de varios almidones comerciales**



a. papa; b. tapioca; c. sorgo céreo; d. sorgo céreo modificado y e. maíz.

Fuente: BADUI, Salvador. *Química de los alimentos*. p. 100.

2.4.4. Retrogradación

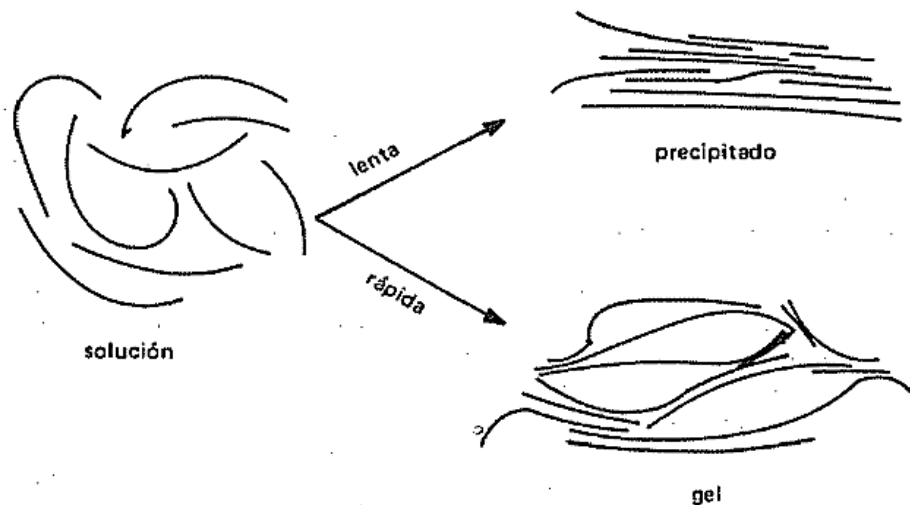
Las moléculas de amilosa se insolubilizan y precipitan espontáneamente, esto es debido a que sus cadenas lineales se orientan paralelamente y accionan entre sí por puentes de hidrógeno, a través de los múltiples hidroxilos que posee. Se puede realizar variando la concentración y la temperatura del sistema.

El grado de retrogradación varía de un almidón a otro, debido a su contenido de amilosa, ya que con la amilopectina es más difícil porque posee ramificaciones, las cuales impiden la formación de puentes de hidrógeno entre moléculas adyacentes; una forma es congelar soluciones de almidón y posteriormente descongelarlas continuamente, para producir su insolubilización.

Existen dos formas para realizar la retrogradación variando la concentración y temperatura del sistema:

- Rápida: se calienta una solución concentrada de amilosa y después se enfría rápidamente hasta temperatura ambiente, formando un gel rígido y reversible.
- Lenta: una solución diluida se deja reposar y enfriar lentamente hasta temperatura ambiente; esta se vuelve opaca y precipita.

Figura 6. **Mecanismos de retrogradación del almidón**



Fuente: BADUI, Salvador. *Química de los alimentos*. p. 100.

2.4.5. Prueba del yodo para almidón

La prueba del yodo es utilizada para determinar la presencia de almidón. Se realiza agregando lugol (solución de yodo y yoduro de potasio) a una solución con almidón. El lugol reacciona con la solución con almidón produciendo una coloración púrpura.

La solución se torna púrpura debido a que el yodo se introduce en las espiras de la molécula de almidón, esta unión del yodo a las espiras es reversible ya que al calentarse la solución desaparece la coloración y al enfriarse reaparece, esto es debido a que el yodo se libera de las espiras del almidón. La reacción del yodo con el almidón no es una reacción química sino una reacción física ya que sólo se modifican las propiedades físicas de la molécula del almidón, dando lugar a una coloración púrpura.

Los enlaces α (1-4) de la amilosa, forman hélices en donde se juntan las moléculas de yodo, dando un color azul oscuro; mientras que los enlaces α (1-4) y α (1-6) de la amilopectina forman hélices mucho más cortos y las moléculas de yodo son incapaces de juntarse, presentando un color intermedio entre anaranjado o amarillo.

Esta prueba se utiliza en la industria para determinar el grado de madurez de los frutos debido a que cuando el fruto está inmaduro, grandes zonas de este se tiñen de color azul; en cambio, cuando el fruto está maduro, no se tiñe debido a que el almidón que contiene se ha transformado completamente en azúcar.

Esta prueba se puede realizar a cualquier producto que contenga almidón como las papas, el pan o algunos frutos.

2.5. Hidrólisis

Es la destrucción, descomposición o alteración de una sustancia química por el agua. La molécula del agua se divide en iones hidrógeno e hidroxilos, los cuales pasan a formar parte de otros iones negativos y positivos.

2.5.1. Hidrólisis del almidón

Los almidones se pueden transformar en muchos productos comerciales por medio de hidrólisis, utilizándose ácidos o enzimas como catalizadores. La hidrólisis del almidón es una reacción química que desdobla las cadenas largas de polisacáridos por medio del agua para producir cadenas más pequeñas o carbohidratos simples.

La hidrólisis del almidón se realiza en la industria para producir glucosa de determinados frutos o productos y se realiza mediante las siguientes etapas:

- Gelatinización
- Dextrinización
- Sacarificación

2.5.1.1. Hidrólisis enzimática del almidón

Proceso donde el almidón se convierte en azúcar utilizándose un grupo de enzimas llamadas hidrolasas que producen la ruptura de las moléculas del almidón por agua.

La hidrólisis enzimática del almidón se realiza en dos etapas: licuefacción y sacarificación.

2.5.1.1.1. Licuefacción

En esta etapa se hidroliza el almidón en oligosacáridos con muchas unidades de dextrina, se realiza en presencia de amilasas. Las dos clases de amilasas más conocidas para la licuefacción y sacarificación son:

- Alfa-amilasas: desdoblan el almidón en glucosa y maltosa, fragmentan fácilmente los almidones en dextrinas reductoras, actúan a una temperatura entre 67,5 y 72,5°C y a un pH de 5,7.
- Beta-amilasas: convierten el almidón en glucosa, actúan a una temperatura entre 55 y 65,5°C y a un pH entre 4,7 y 5,3.

2.5.1.1.2. Sacarificación

En esta etapa se hidrolizan los oligosacáridos en glucosa, se realiza después de la licuefacción utilizándose amiloglucosidasa, la cual es una beta-amilasa y actúa a un pH entre 4 y 6. Se obtiene del hongo *Aspergillus niger*.

2.5.1.2. Hidrólisis química del almidón

El almidón tratado con ácidos produce una hidrólisis total de este, formando glucosa, maltosa e isomaltosa.

El grado de hidrólisis varía considerablemente con la concentración del ácido, la temperatura, y el tiempo de hidrólisis. Los ácidos que se utilizan son el ácido clorhídrico y el ácido nítrico.

2.6. Grados Brix

Los grados Brix miden la concentración total de sólidos solubles contenidos en un líquido. Los sólidos solubles presentes en el agua son azúcares, sales, ácidos, etc. Los refractómetros están calibrados para medir la cantidad en gramos de sacarosa por 100g de solución, así, al medir una solución de azúcar los grados Brix deben ser equivalentes a la concentración real. Si se desea saber la concentración exacta en soluciones que contienen otros componentes es necesaria una tabla de conversiones.

2.6.1. Refractómetro

Son instrumentos utilizados para medir la cantidad de sólidos solubles en una solución líquida. El funcionamiento del refractómetro se basa en la refracción de la luz.

2.6.1.1. Refracción de la luz

La refracción de la luz es originada por el tipo y la concentración de las sustancias disueltas en una solución líquida, cuanto más denso sea el líquido mayor será la refracción.

Un ejemplo de la refracción es cuando se sumerge un lápiz en un vaso con agua, la punta del lápiz parece inclinada, si se utiliza agua azucarada, debido a la refracción de la luz, la punta de este parecerá más inclinada.

Figura 7. **Refracción de la luz a través del agua**



Fuente: *Cosas de física y química. Refracción.*

www.elfisicoloco.blogspot.com/2013/02/refraccion.html. Consulta: 10 de agosto de 2016.

2.6.1.2. Índice de refracción

El índice de refracción (n) es el cociente de la velocidad de la luz en el vacío (c) ($3 \cdot 10^8 \text{ m/s}$) respecto a la velocidad de la luz en el medio (v):

$$n = \frac{c}{v}$$

Debido a que la velocidad de la luz en cualquier medio siempre es menor que en el vacío, el índice de refracción será mayor que 1.

$n = 1$ en el vacío

$n > 1$ en otro medio

2.6.1.3. Ley de refracción (ley de Snell)

La ley de refracción se basa en la siguiente ecuación:

$$n_1 * \text{sen}\theta_1 = n_2 * \text{sen}\theta_2$$

Donde:

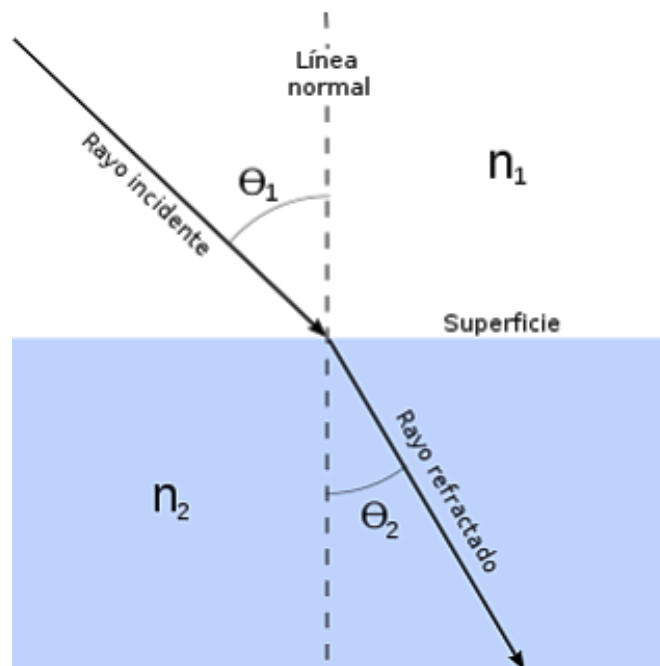
n_1 = Índice de refracción del primer medio

θ_1 = Ángulo de incidencia

n_2 = Índice de refracción del segundo medio

θ_2 = Ángulo de refracción

Figura 8. Refracción de la luz



Fuente: *Cosas de física y química. Refracción.*

www.elfisicoloco.blogspot.com/2013/02/refraccion.html. Consulta: 10 de agosto de 2016.

2.6.1.4. Método de medición de los grados Brix

1. Colocar 2-3 gotas de la muestra en la superficie del prisma
2. Presionar el botón START
3. En 3 segundos el valor o porcentaje de Brix se mostrará en la pantalla

Figura 9. Pasos para la medición de los grados Brix



1



2



3

Fuente: ATAGO. *Refractómetro digital de bolsillo "PAL"*.

www.Atago.net/Spanish/products_pal.php. Consulta: 8 de agosto de 2016.

2.7. Fermentación

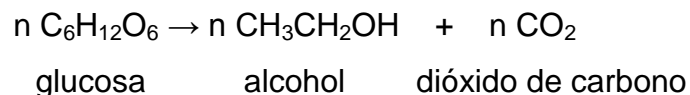
Es un proceso de oxidación incompleta que se lleva a cabo en un medio anaeróbico (que no requiere oxígeno). Es realizada por bacterias y microorganismos los cuales se alimentan del azúcar o glucosa del medio para crecer y multiplicarse.

2.7.1. Tipos de fermentación

Los tipos de fermentación son:

- Alcohólica: es producida a partir de levaduras del género *Saccharomyces*, hongos unicelulares que se utilizan en la producción de pan, cervezas o vinos.
- Láctica: es un proceso metabólico anaeróbico que ocurre en el citosol de la célula, la glucosa se oxida parcialmente para obtener energía dando como producto ácido láctico.
- Acética: se utiliza para transformar el alcohol en ácido acético utilizándose *Acetobacter* en presencia de oxígeno. Si se deja fermentar el vino produce vinagre debido a un exceso de oxígeno.
- Butírica: se convierten los glúcidos en ácido butírico en presencia de bacterias de la especie *Clostridium butyricum* en ausencia de oxígeno. Se produce a partir de lactosa formando ácido butírico y gas.

Durante la fermentación alcohólica los microorganismos producen dióxido de carbono y alcohol:



2.7.1.1. Levadura (*Saccharomyces cerevisiae*)

La levadura es un hongo unicelular utilizado en la industria para la fabricación de pan, cerveza y vino, generando dióxido de carbono y etanol durante el proceso de fermentación. La fermentación se lleva a cabo en un medio rico en azúcares, por lo que el agua facilita la actividad de la levadura mejorando la movilidad de la célula.

Al aumentarse la temperatura se acelera el proceso de fermentación de los azúcares. A una temperatura de 30°C la fermentación es tres veces más significativa que a 20°C. De 38°C a 40°C la actividad se incrementa 8 % por cada grado aumentado. Si la temperatura es mayor a 40°C la actividad de la levadura disminuye. A 55°C la levadura disminuye su actividad totalmente, de igual forma a 0°C.

2.7.2. Prueba de Fehling

La prueba de Fehling se utiliza para determinar la presencia de azúcares reductores. Se realiza añadiendo 1mL de solución de Fehling A y 1mL de Fehling B a 3mL de solución a la que se desea saber si posee azúcares reductores, la solución se calienta a baño María, llevándola a ebullición. Si es positiva, esta se torna de color rojo, si la reacción es negativa la solución permanece de color azul. Los azúcares reductores se oxidan reduciendo el sulfato de cobre (II), de color azul, a óxido de cobre (I), de color rojo-anaranjado. Donde el cobre se reduce de Cu^{++} a Cu^+ .

2.8. Destilación

Proceso donde se calienta un líquido que posee dos o más componentes con el propósito de separarlos debido a una diferencia en los puntos de ebullición; estos se convierten en vapor, posteriormente el vapor se enfría para recuperar los componentes en forma líquida mediante condensación.

2.9. Alcoholes

Los alcoholes son compuestos de fórmula general R-OH, que resultan de la sustitución de uno o más átomos de hidrógeno (H) por grupos hidroxilo (OH) en cualquier grupo alquilo (R). Los alcoholes se clasifican en primarios, secundarios y terciarios.

2.9.1. Clasificación de los alcoholes

Un alcohol es primario si el grupo hidroxilo, que sustituye al hidrógeno, se encuentra unido a un carbono primario. Un alcohol es secundario si el grupo hidroxilo, que sustituye al hidrógeno, se encuentra unido a un carbono secundario. Y un alcohol es terciario si el grupo hidroxilo, que sustituye al hidrógeno, se encuentra unido a un carbono terciario.

Los átomos de carbono se clasifican de acuerdo a su posición con respecto a otros carbonos. De modo que un carbono primario solamente está unido a un carbono, uno secundario está unido a dos carbonos, un carbono terciario a tres y uno cuaternario a cuatro.

Figura 10. Clasificación de los alcoholes



Fuente: MORRISON, Thornton. *Química orgánica*. p. 632.

2.9.2. Prueba del sodio

Prueba para identificar alcoholes donde se agrega una pequeña cantidad de sodio metálico a la muestra, si dicha muestra posee alcohol se producirá sodio gaseoso generando un alcóxido (cuando el alcohol pierde el hidrógeno del OH).

3. DISEÑO METODOLÓGICO

3.1. Variables

Son las que tienen efecto sobre los resultados finales de la obtención de bioetanol a partir de papa (*Solanum tuberosum*) mediante hidrólisis enzimática y posterior fermentación a escala laboratorio.

Tabla I. Variables a escala laboratorio

Variables	Unidades	Dependiente	Independiente
Temperatura	°C		
Tiempo	h		X
Largo de rodajas de papa	cm		X
Ancho de rodajas de papa	cm		X
Tamaño de partícula	-		X
Contenido de humedad	%		X
Masa de harina	g		X
Volumen de agua	mL		X
Cantidad de enzima	g		X
Grados Brix	%	X	
pH	-	X	
Cantidad de levadura	g		X
Porcentaje de bioetanol	%	X	
Densidad del bioetanol	g/mL	X	

Fuente: elaboración propia, con base en el Marco Teórico.

3.2. Delimitación de campo de estudio

- Campo de estudio: Energía renovable.
- Área de investigación: Biocombustibles.
- Línea de Investigación: Biocombustibles de fuentes renovables.
- Ubicación: La harina de papa se realizó en el Laboratorio de Bromatología de la Facultad de Medicina Veterinaria y Zootecnia. El bioetanol de papa se realizó en el Laboratorio Área de Química de la Escuela de Ingeniería Química de la Facultad de Ingeniería. Ambos laboratorios ubicados en la Universidad de San Carlos de Guatemala.

3.3. Recursos humanos disponibles

- Investigador: Marcela Enid Sotoj López.
- Asesor: Inga. Qca. Adela María Marroquín González.

3.4. Recursos materiales disponibles

Insumos y equipo utilizado para la obtención de harina de papa:

- Papa (*Solanum tuberosum*).
- Solución de bisulfito de sodio al 0,1 %.
- Vidrio de reloj.
- Balanza marca Adam Equipment, modelo PGW 4502I, capacidad máxima de 4 500g, lectura mínima 0,01g, incerteza de $\pm 0,01$ g.
- Horno de convección, marca Adverti, modelo SLW 400 STD, número de serie SW4SF 13 028.
- Tamiz Nro. 40, 420 micrones, mesh 35.

Insumos y equipo utilizado para la obtención de bioetanol de papa:

- Harina de papa.
- Papa (*Solanum tuberosum*).
- Enzima amilasa.
- Levadura (*Saccharomyces cerevisiae*).
- Agua destilada.
- Yodo.
- Yoduro de potasio.
- Sulfato de cobre pentahidratado.
- Tartrato de sodio y potasio.
- Hidróxido de sodio.
- Sodio.
- Vidrio de reloj.
- Varillas de agitación.
- Beacker de 1 000mL marca BOECO, incerteza $\pm 0,03$ mL.
- Termómetro de mercurio 0°C - 150°C, incerteza ± 1 °C.
- Pipetas de 1mL, 5mL y 10mL de Pyrex, incerteza $\pm 0,05$ mL.
- Beackers de 10, 50, 100mL, marca INTERLABS, incerteza $\pm 0,03$ mL.
- Kitasatos de 250mL de Pyrex.
- Embudo.
- Balón aforado de 100mL marca SCHOTT MAINZ, incerteza $\pm 0,10$ mL.
- Refrigerante de tubo recto.
- Tubos de ensayo de Pyrex.
- Balanza marca Proinca, modelo 10 002, capacidad máxima de 1 000g, lectura mínima 0,001g, incerteza de $\pm 0,01$ g.
- Horno eléctrico marca Blue M, modelo OV-18, número de serie 1 858, rango de temperatura 38-288°C, potencia de 1 750 watts.

- Refractómetro marca Atago, modelo PAL-1, rango de medida 0,0-53,0 %, incerteza $\pm 0,2$ %.
- Potenciómetro marca *HANNAH INSTRUMENTS*, modelo H1221, incerteza de $\pm 0,01$.
- Plancha de calentamiento.
- Perillas de succión.
- Soporte universal.
- Mechero bunsen.

3.5. Técnica cualitativa y cuantitativa

Para la obtención de información se utilizaron ambas técnicas, durante la realización de las pruebas y para obtener información de las variables. La técnica cualitativa se utiliza al momento de realizar la prueba de yodo, de Fehling y sodio.

- En la prueba de yodo al agregar lugol a una muestra de la solución de harina de papa, esta se torna púrpura.
- En la prueba de Fehling se observa un cambio de color de la muestra debido a que existen azúcares reductores, tornándose la muestra de color anaranjada.
- Al momento de realizar la prueba de sodio se observa la formación de hidrógeno que determina la presencia de alcohol.

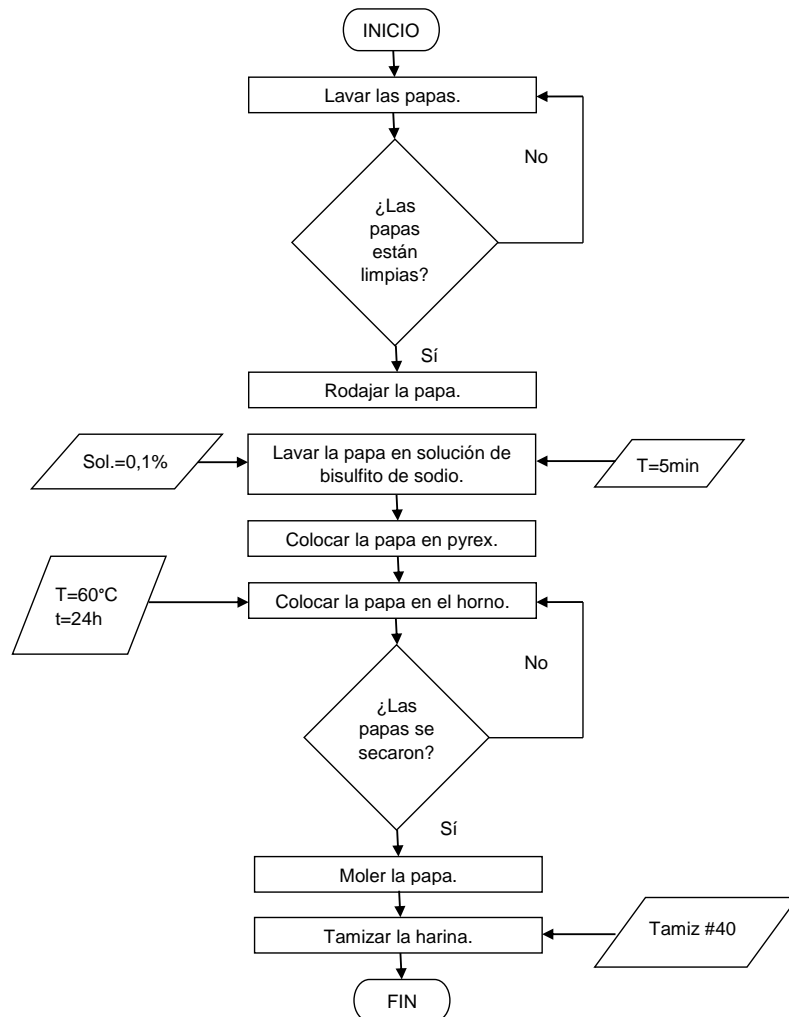
La técnica cuantitativa para obtener información de las variables, como la medición de los grados Brix y de pH de las soluciones de harina y la determinación del porcentaje de alcohol.

3.6. Recolección y ordenamiento de la información

3.6.1. Método de obtención de harina de papa

El siguiente diagrama de flujo detalla el método de obtención de harina de papa.

Figura 11. Obtención de harina de papa

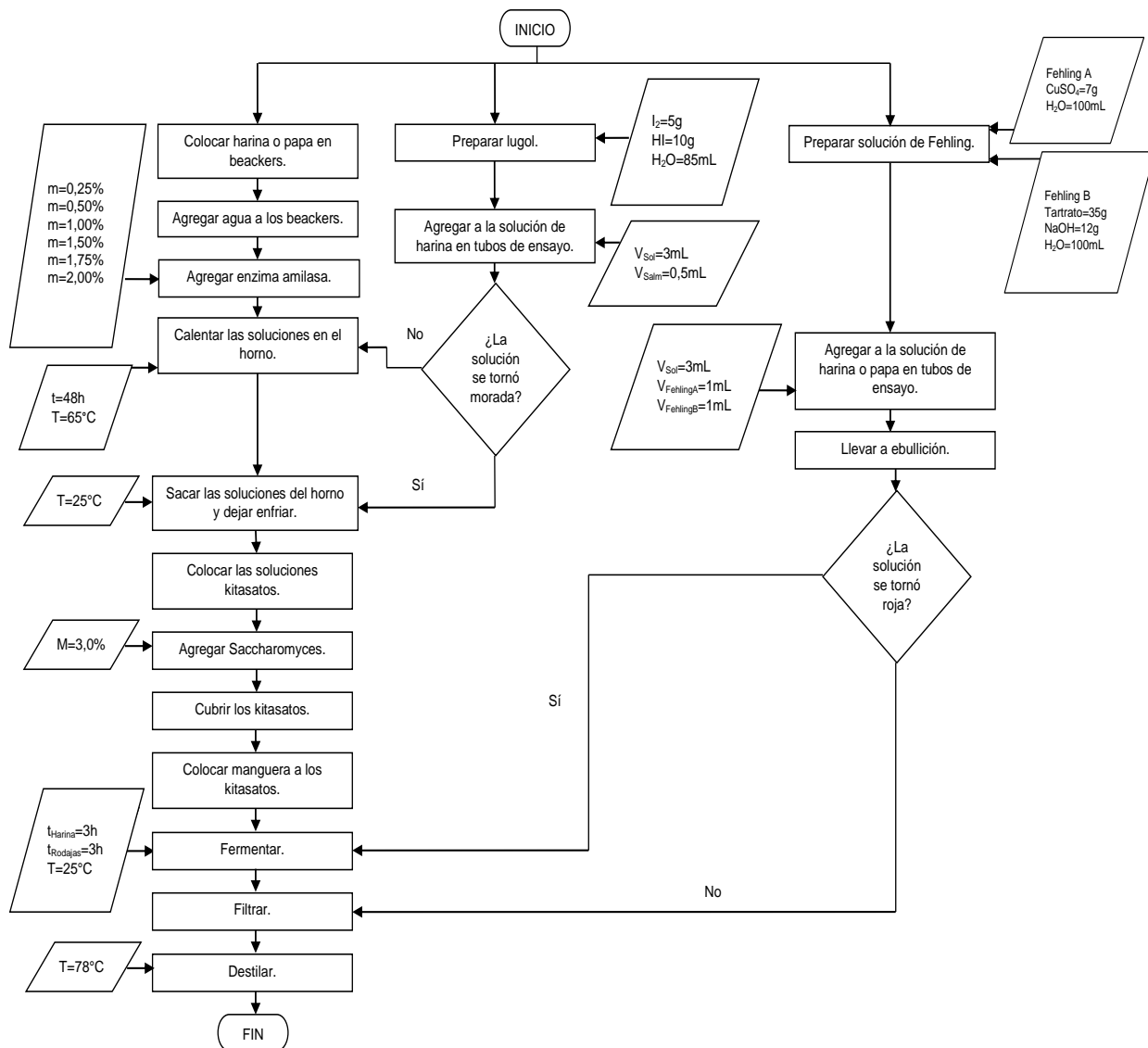


Fuente: elaboración propia.

3.6.2. Método de obtención de bioetanol de papa

El siguiente diagrama de flujo detalla el método de obtención de bioetanol de papa.

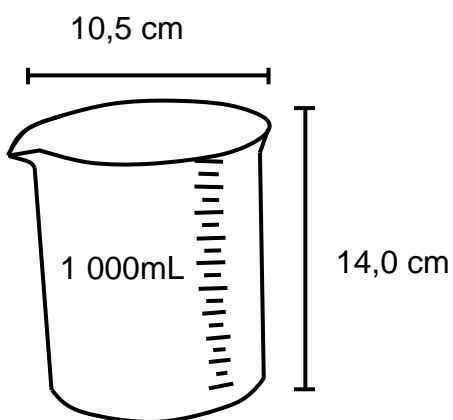
Figura 12. Obtención de bioetanol de papa



Fuente: elaboración propia.

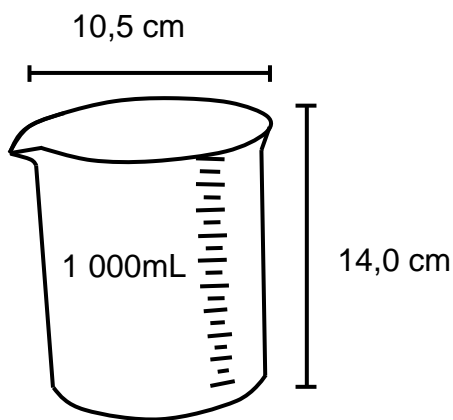
3.6.2.1. Esquema de los reactores utilizados para la obtención de bioetanol de papa

Figura 13. Esquema del reactor utilizado para la gelatinización de la harina de papa y de las rodajas de papa (beacker de 1 000mL)



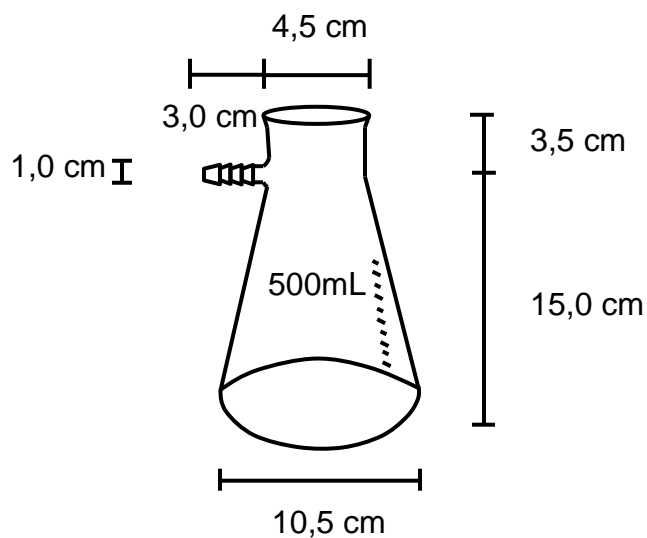
Fuente: elaboración propia.

Figura 14. Esquema del reactor utilizado para la hidrólisis de la harina de papa y de las rodajas de papa (beacker de 1 000mL)



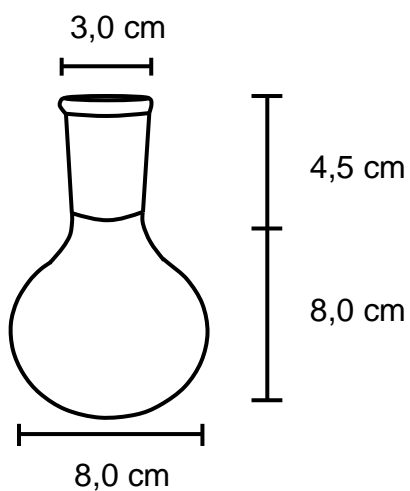
Fuente: elaboración propia.

Figura 15. **Esquema del reactor utilizado para la fermentación de la harina de papa y de las rodajas de papa (kitasato de 500mL)**



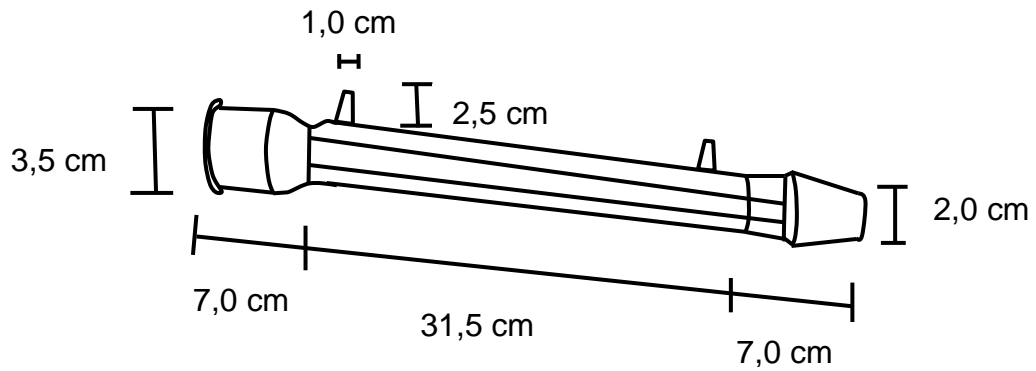
Fuente: elaboración propia.

Figura 16. **Esquema del reactor utilizado para la destilación del hidrolizado de la harina de papa y de las rodajas de papa (balón aforado de 250mL)**



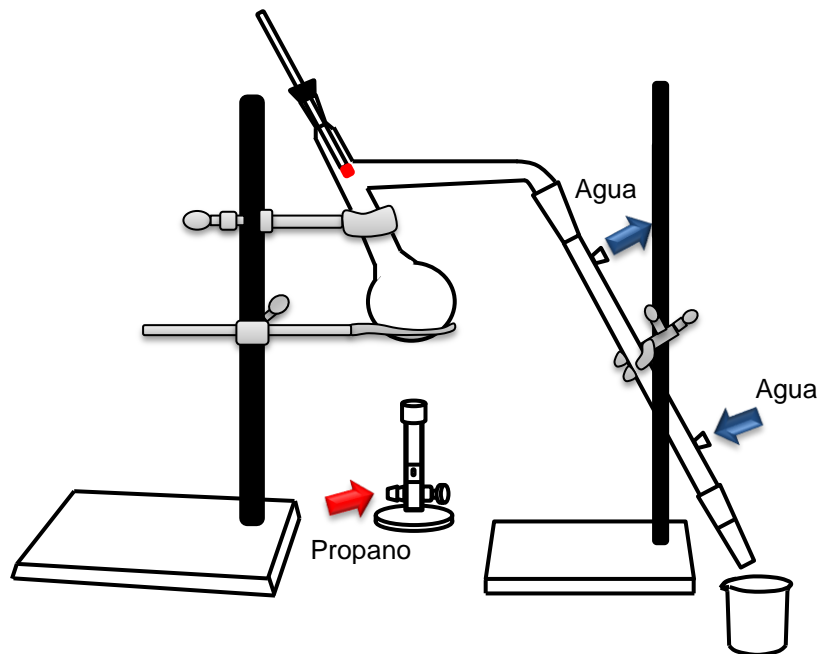
Fuente: elaboración propia.

Figura 17. **Esquema del reactor utilizado para la condensación del bioetanol de harina de papa y de rodajas de papa (condensador de tubo recto)**



Fuente: elaboración propia.

Figura 18. **Esquema del equipo utilizado para la destilación del bioetanol de harina de papa y de rodajas de papa**



Fuente: elaboración propia.

3.7. Tabulación, ordenamiento y procesamiento de la información

La información obtenida será tabulada y graficada para establecer un comportamiento y analizar de mejor manera los resultados. Durante el proceso se describen los cambios que ocurren, asimismo se analizan las variables dependientes e independientes.

3.7.1. Tabulación de la información

La información recabada durante el proceso se encuentra tabulada en los apéndices 2 al 12:

- Masa, largo y ancho de rodajas de papa al deshidratarse después de 23 horas, a 60°C: apéndice 2, 3 y 4.
- Aumento de volumen de la harina de papa en 1 000mL y 100mL de agua durante la gelatinización, a 65°C: apéndice 5 y 6, respectivamente.
- Grados Brix de la hidrólisis de 10 % y 15 % de harina de papa en 1 000mL durante 48 horas, a 65°C: apéndice 7 y 8, respectivamente.
- Grados Brix de la hidrólisis de rodajas de papa durante 48 horas, a 65°C: apéndice 9.
- pH de la hidrólisis de 10 % y 15 % de harina de papa en 1 000mL durante 48 horas, a 65°C: apéndice 10 y 11, respectivamente.
- pH de la hidrólisis de rodajas de papa durante 48 horas, a 65°C: apéndice 12.

3.8. Análisis estadístico

Los datos son obtenidos a partir de mediciones se deben analizar por medio de métodos estadísticos para tener representatividad estadística.

3.8.1. Número de repeticiones

Para determinar el número de repeticiones a realizar en cada corrida se utiliza un intervalo de confianza del 95 %, lo que implica un valor de $z=1,96$, un intervalo de fracaso del 5 % y un error estimado para la medición de 0,25.

$$N = \frac{Z^2 * P * Q}{E^2}$$

Donde:

N = Número de corridas a realizar

Z = Confianza

P = Intervalo de confianza

Q = Intervalo de error

E = Error estimado

$$N = \frac{1,96^2 * 0,95 * 0,05}{0,25^2} = 2,92 \approx 3$$

3.8.2. Cálculo de la media

El cálculo de la media muestral se realiza de la siguiente manera:

$$\bar{X} = \frac{\sum_{i=1}^n X_i}{n}$$

Donde:

\bar{X} = Media

X_i = Valor de la repetición i

n = Número total de observaciones

3.8.3. Cálculo de la desviación estándar

El cálculo de la desviación estándar se realiza de la siguiente manera:

$$S = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2}{n}}$$

Donde:

S = Desviación estándar

X_i = Valor de la repetición i

\bar{X} = Media

n = Número total de observaciones

3.8.4. Cálculo del coeficiente de variación

El cálculo del coeficiente de variación se realiza de la siguiente manera:

$$CV = \frac{S}{\bar{X}} * 100$$

Donde:

CV = Coeficiente de variación

S = Desviación estándar

\bar{X} = Media

3.8.5. Análisis de varianza (ANOVA)

Por medio de un análisis estadístico de varianza (ANOVA) se determinó cuál de las dos hipótesis propuestas se aceptaba, si la hipótesis de investigación o la hipótesis nula.

Tabla II. Organización de datos para el análisis de varianza (ANOVA)

Tratamientos Repeticiones	1	2	3
1	X_{11}	X_{21}	X_{31}
2	X_{12}	X_{22}	X_{32}
3	X_{13}	X_{23}	X_{33}
Total (\bar{x}_j)	X_1	X_2	X_3

Fuente: WEBSTER, Allen. *Estadística aplicada a los negocios y la economía*. p. 275.

Cada una de las celdas de la tabla anterior está identificada como X_{ij} en donde i es la fila y j es la columna. El número de filas o repeticiones en cada columna se indica con una r y el número de columnas o tratamientos se indica con una c . Debido a que las columnas se identifican con un subíndice j , el promedio se representa con \bar{x}_j .

Las fórmulas utilizadas para el análisis de varianza, utilizando como referencia la tabla II, son las siguientes:

$$\bar{X} = \sum \frac{X_{ij}}{n}$$

$$SCT = \sum_{i=1}^r \sum_{j=1}^c (X_{ij} - \bar{X})^2$$

$$SCTR = r_j \sum (\bar{X}_j - \bar{X})^2$$

$$SCE = \sum_{i=1}^r \sum_{j=1}^c (X_{ij} - \bar{X}_j)^2$$

$$CMTR = \frac{SCTR}{c - 1}$$

$$CME = \frac{SCE}{n - c}$$

$$F = \frac{CMTR}{CME}$$

Donde:

\bar{X} = Gran media de todas las observaciones del experimento

n = Número total de observaciones

SCT = Suma de cuadrados total

r = Número de filas o repeticiones en cada columna

c = Número de columnas o tratamientos

i = Fila

j = Columna

SCTR = Suma de cuadrados de los tratamientos

r_j = Número de observaciones o filas en cada tratamiento

\bar{X}_j = Media de cada tratamiento

SCE = Suma del cuadrado del error

CMTR = Cuadrado medio del tratamiento

CME =Cuadrado medio del error

F = Valor F

Tabla III. **Tabla de análisis de varianza generalizada**

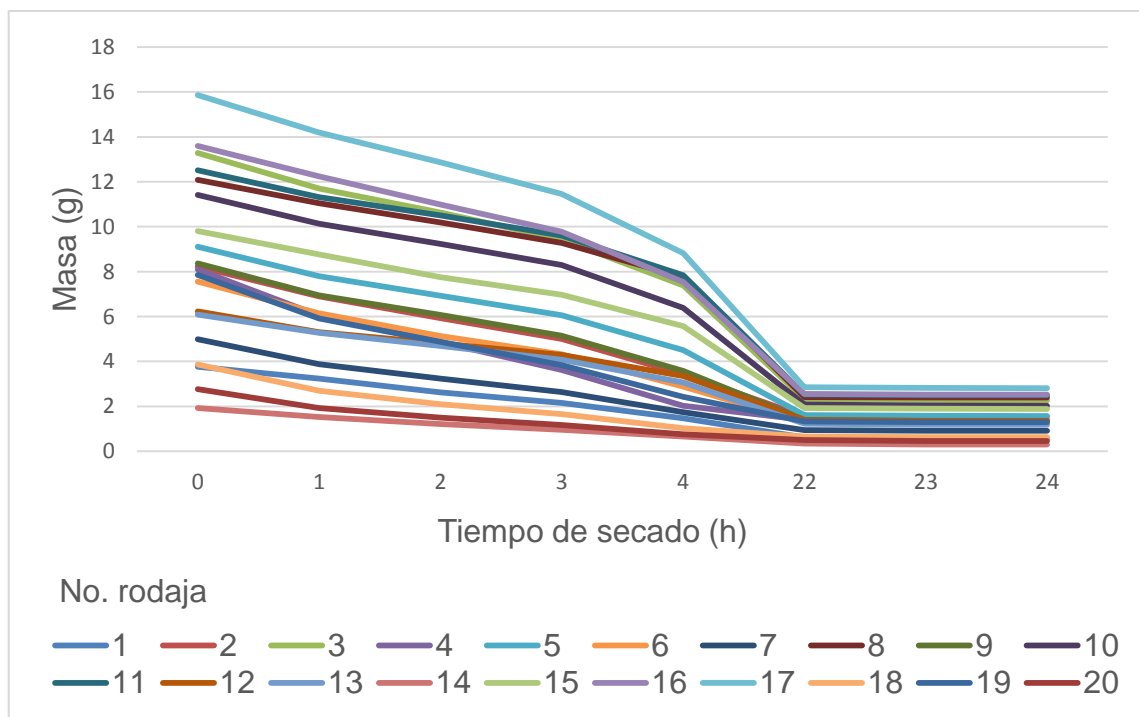
Fuente de variación	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Cuadrados medios	Valor F
Entre muestras (tratamiento)	SCTR	c-1	$\frac{SCTR}{(c-1)}$	$\frac{CMTR}{CME}$
Dentro de muestras (error)	SCE	n-c	$\frac{SCE}{(n-c)}$	
Variación total	SCT	n-1		

Fuente: WEBSTER, Allen. *Estadística aplicada a los negocios y la economía*. p. 281.

Para determinar cuál de las dos hipótesis propuestas se aceptaba se comparó el valor F con el valor crítico de F, encontrado en una tabla de distribución F, con $\alpha=0,05$. Si $F > \text{valor}$ se acepta la hipótesis de investigación, si $F \leq \text{valor}$ se acepta la hipótesis nula.

4. RESULTADOS

Figura 19. **Disminución de masa de rodajas de papa, de la número 1 a la número 20, en función del tiempo de secado**



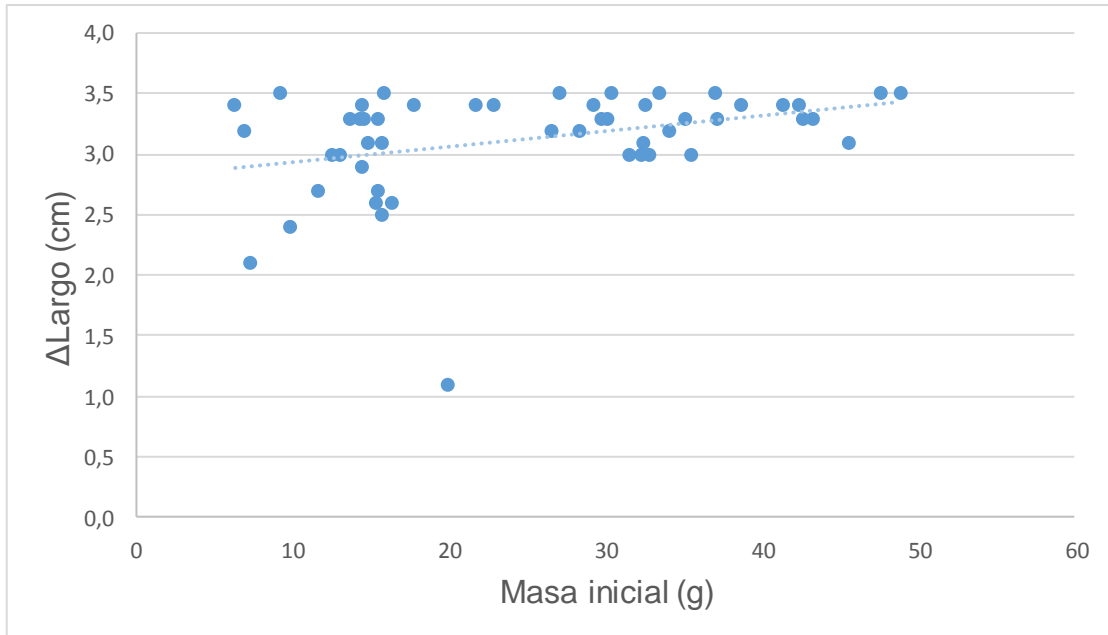
Fuente: elaboración propia, a partir de valores del apéndice 2.

Tabla IV. **Porcentaje de reducción de masa**

Masa total inicial (g)	Masa total final (g)	Porcentaje de reducción (%)
2 878,31	570,40	80

Fuente: elaboración propia, a partir de valores de los apéndices 2, 3 y 4.

Figura 20. **Reducción total de largo en función de la masa inicial, de las rodajas de papa**



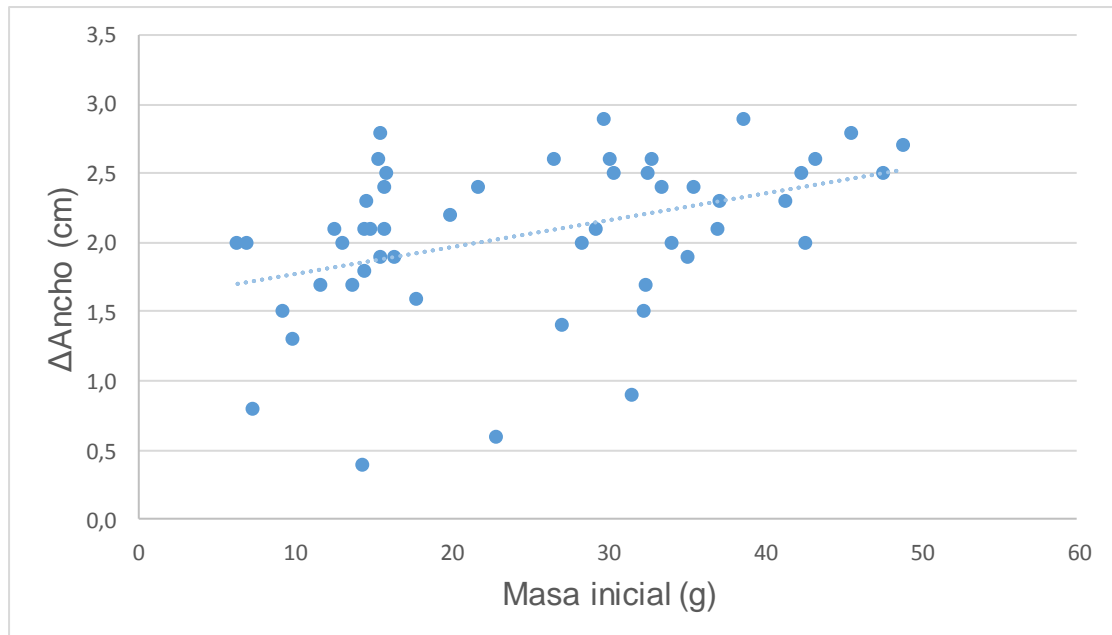
Fuente: elaboración propia, a partir de valores del apéndice 4.

Tabla V. **Representación de la tendencia de la reducción total de largo en función de la masa inicial**

Color	Modelo matemático	R ²
	$\Delta L = 0,0128m + 2,8112$	0,1282

Fuente: elaboración propia, a partir de la figura 20.

Figura 21. **Reducción total de ancho en función de la masa inicial, de las rodajas de papa**



Fuente: elaboración propia, a partir de valores del apéndice 4.

Tabla VI. **Representación de la tendencia de la reducción total de ancho en función de la masa inicial**

Color	Modelo matemático	R ²
	$\Delta A=0,0193m+1,5836$	0,1671

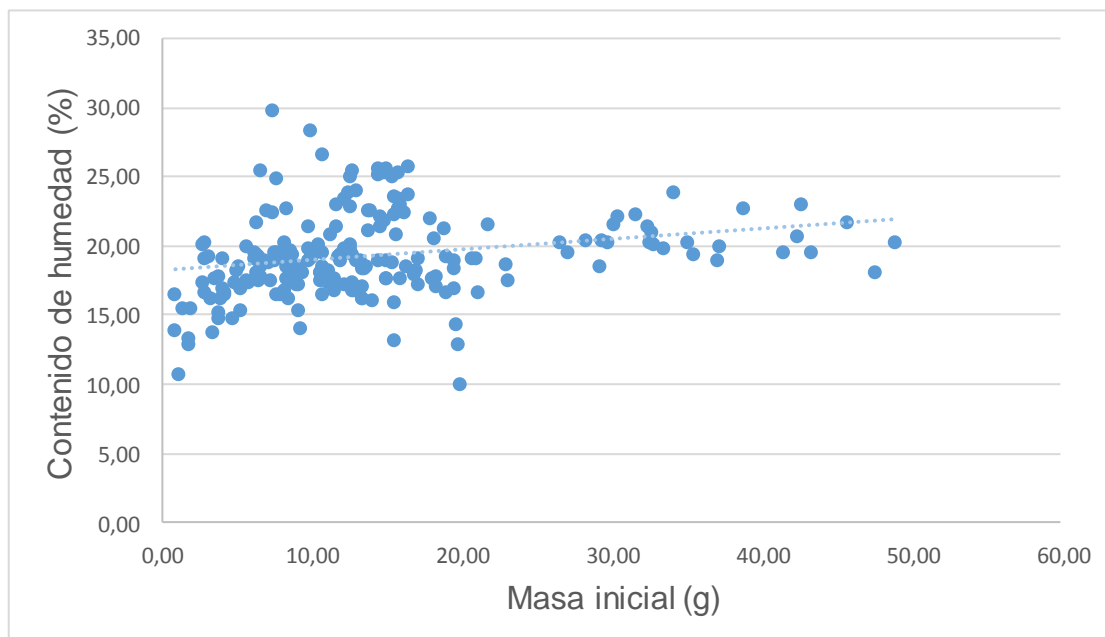
Fuente: elaboración propia, a partir de la figura 21.

Tabla VII. **Porcentaje promedio de reducción de largo y ancho de las rodajas de papa**

Reducción de largo (%)	Reducción de ancho (%)
74,30	66,23

Fuente: elaboración propia, a partir de valores del apéndice 4.

Figura 22. **Contenido de humedad en función de la masa inicial de las rodajas de papa**



Fuente: elaboración propia, a partir de valores de los apéndices 2, 3 y 4.

Tabla VIII. **Representación de la tendencia del contenido de humedad en función de la masa inicial de las rodajas de papa**

Color	Modelo matemático	R ²
	$\Delta H=0,0772m+18,193$	0,0629

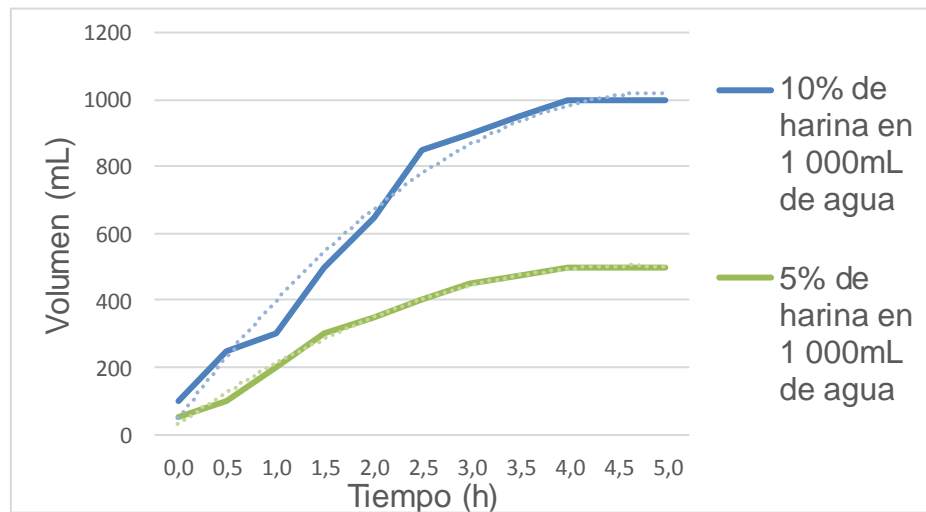
Fuente: elaboración propia, a partir de la figura 22.

Tabla IX. **Humedad total de la harina**

Contenido de humedad (%)
19,28

Fuente: elaboración propia, a partir de valores de los apéndices 2, 3 y 4.

Figura 23. **Aumento de volumen de la harina en 1 000mL de agua, en función del tiempo de gelatinización**



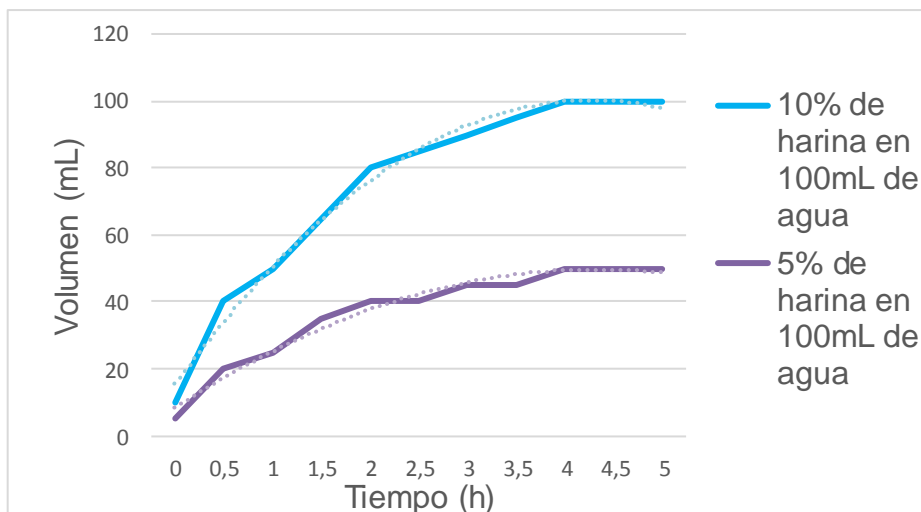
Fuente: elaboración propia, a partir de valores del apéndice 5.

Tabla X. **Representación de las tendencias del aumento de volumen de la harina en 1 000mL de agua**

Color	Modelo matemático	R ²
	$V = -9,8485t^2 + 215,91t - 160,61$	0,9805
	$V = -5,4779t^2 + 113,01t - 78,333$	0,9945

Fuente: elaboración propia, a partir de la figura 23.

Figura 24. **Aumento de volumen de la harina en 100mL de agua, en función del tiempo de gelatinización**



Fuente: elaboración propia, a partir de valores del apéndice 6.

Tabla XI. **Representación de las tendencias del aumento de volumen de la harina en 100mL de agua**

Color	Modelo matemático	R ²
	$V=-1,1655t^2+22,259t-5,8485$	0,9889
	$V=-0,5536t^2+10,689t-1,8485$	0,9761

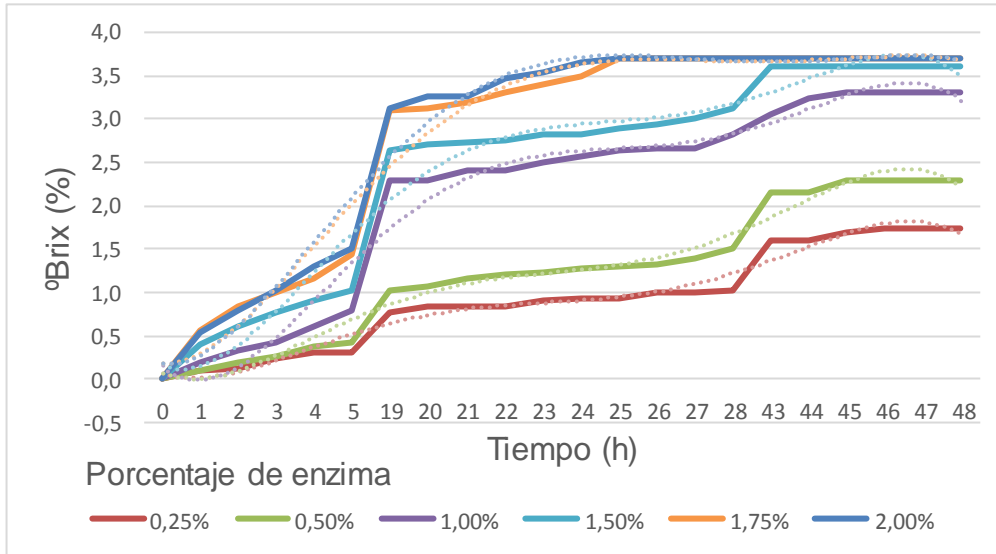
Fuente: elaboración propia, a partir de la figura 24.

Tabla XII. **Aumento de volumen de la harina durante la gelatinización**

Número de veces que aumentó la harina	Tiempo de aumento (h)
10	4

Fuente: elaboración propia, a partir de valores de los apéndices 5 y 6.

Figura 25. **Concentración en grados Brix de la hidrólisis de 10 % de harina de papa en 1 000mL, según el porcentaje de enzima agregado, durante 48 horas a 65°C**



Fuente: elaboración propia, a partir de valores de los apéndices 7 y 17.

Tabla XIII. **Representación de las tendencias de la concentración en grados Brix de la hidrólisis de 10 % de harina de papa**

Color	Modelo matemático	R ²
Red	$^{\circ}\text{B} = -2\text{E}-05\text{t}^5 + 0,0008\text{t}^4 - 0,0163\text{t}^3 + 0,1367\text{t}^2 - 0,3521\text{t} + 0,29$	0,9700
Green	$^{\circ}\text{B} = -2\text{E}-05\text{t}^5 + 0,0011\text{t}^4 - 0,0219\text{t}^3 + 0,1852\text{t}^2 - 0,4857\text{t} + 0,3948$	0,9746
Purple	$^{\circ}\text{B} = -3\text{E}-05\text{t}^5 + 0,0017\text{t}^4 - 0,0374\text{t}^3 + 0,3438\text{t}^2 - 0,9574\text{t} + 0,7971$	0,9658
Cyan	$^{\circ}\text{B} = -3\text{E}-05\text{t}^5 + 0,0016\text{t}^4 - 0,034\text{t}^3 + 0,2997\text{t}^2 - 0,7044\text{t} + 0,6075$	0,9584
Orange	$^{\circ}\text{B} = -1\text{E}-05\text{t}^5 + 0,0001\text{t}^4 - 0,023\text{t}^3 + 0,2146\text{t}^2 - 0,3763\text{t} + 0,3631$	0,9655
Blue	$^{\circ}\text{B} = -2\text{E}-05\text{t}^5 + 0,0012\text{t}^4 - 0,0268\text{t}^3 + 0,2476\text{t}^2 - 0,4669\text{t} + 0,4178$	0,9706

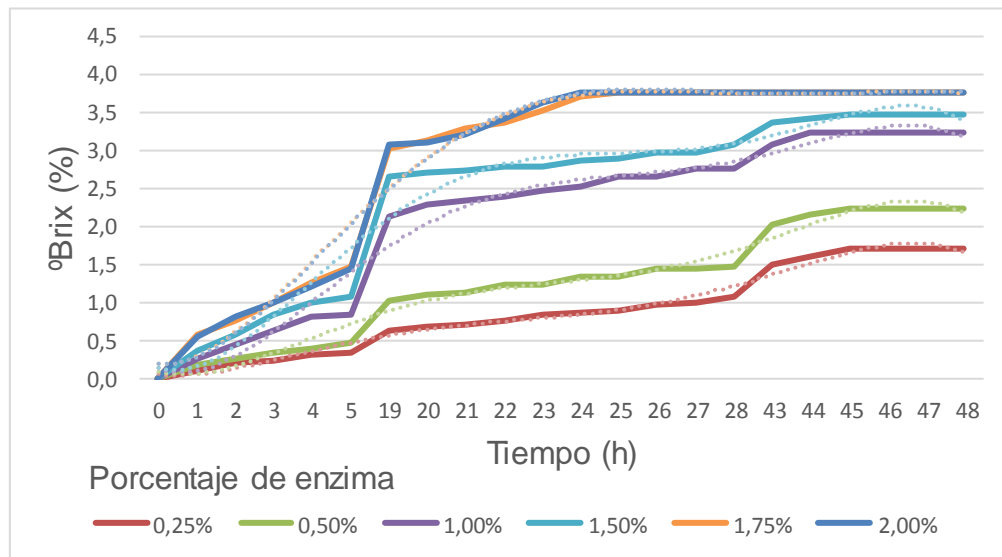
Fuente: elaboración propia, a partir de la figura 25.

Tabla XIV. **Coeficiente de variación de la concentración en grados Brix de la hidrólisis de 10 % de harina de papa, según el porcentaje de enzima**

	Porcentaje de enzima (%)					
	0,25	0,50	1,00	1,50	1,75	2,00
CV	5,58	4,87	6,66	3,39	3,25	3,35

Fuente: elaboración propia, a partir de valores del apéndice 18.

Figura 26. **Concentración en grados Brix de la hidrólisis de 15 % de harina de papa en 1 000mL, según el porcentaje de enzima agregado, durante 48 horas a 65°C**



Fuente: elaboración propia, a partir de valores de los apéndices 8 y 19.

Tabla XV. **Representación de las tendencias de la concentración en grados Brix de la hidrólisis de 15 % de harina de papa**

Color	Modelo matemático	R ²
	$^{\circ}\text{B} = -1\text{E}-05t^5 + 0,0006t^4 - 0,0107t^3 + 0,085t^2 - 0,181t + 0,1512$	0,9840
	$^{\circ}\text{B} = -2\text{E}-05t^5 + 0,0009t^4 - 0,018t^3 + 0,1516t^2 - 0,3696t + 0,3213$	0,9758
	$^{\circ}\text{B} = -2\text{E}-05t^5 + 0,0013t^4 - 0,0278t^3 + 0,2515t^2 - 0,6116t + 0,5121$	0,9716
	$^{\circ}\text{B} = -3\text{E}-05t^5 + 0,0015t^4 - 0,0327t^3 + 0,2876t^2 - 0,6479t + 0,5355$	0,9619
	$^{\circ}\text{B} = -2\text{E}-05t^5 + 0,001t^4 - 0,0237t^3 + 0,2254t^2 - 0,4202t + 0,3997$	0,9744
	$^{\circ}\text{B} = -1\text{E}-05t^5 + 0,001t^4 - 0,0237t^3 + 0,2285t^2 - 0,4448t + 0,4267$	0,9730

Fuente: elaboración propia, a partir de la figura 26.

Tabla XVI. **Coefficiente de variación de la concentración en grados Brix de la hidrólisis de 15 % de harina de papa, según el porcentaje de enzima**

	Porcentaje de enzima (%)					
	0,25	0,50	1,00	1,50	1,75	2,00
CV	5,54	6,43	3,69	3,49	2,34	2,63

Fuente: elaboración propia, a partir de valores del apéndice 20.

Tabla XVII. **Análisis de varianza de la concentración en grados Brix de las soluciones con harina (10 %m/V y 15 %m/V)**

Valor F (F _T)	Valor crítico de F (F _C)
0,4	4,41

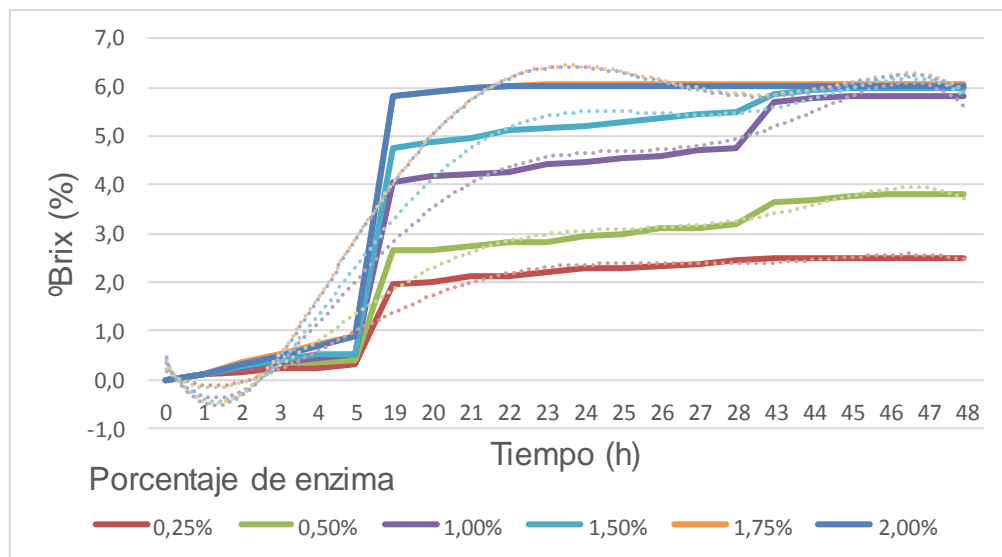
Fuente: elaboración propia, a partir de valores del apéndice 33.

Tabla XVIII. **Diferencia de la concentración en grados Brix de las soluciones con harina (10 %m/V y 15 %m/V)**

Comparación	Conclusión
$F_T < F_C$	No hay diferencia significativa

Fuente: elaboración propia, a partir de valores del apéndice 33.

Figura 27. **Concentración en grados Brix de la hidrólisis de 9 % de rodajas de papa en 1 000mL, según el porcentaje de enzima agregado, durante 48 horas a 65°C**



Fuente: elaboración propia, a partir de valores de los apéndices 9 y 21.

Tabla XIX. **Representación de las tendencias de la concentración en grados Brix de la hidrólisis de 9 % de rodajas de papa**

Color	Modelo matemático	R ²
	$^{\circ}\text{B} = -2\text{E}-05t^5 + 0,0014t^4 - 0,0335t^3 + 0,03316t^2 - 1,0531t + 0,9142$	0,9412
	$^{\circ}\text{B} = -4\text{E}-05t^5 + 0,0022t^4 - 0,05t^3 + 0,477t^2 - 1,4856t + 1,266$	0,9465
	$^{\circ}\text{B} = -6\text{E}-05t^5 + 0,0039t^4 - 0,0864t^3 + 0,8193t^2 - 2,5927t + 2,194$	0,9419
	$^{\circ}\text{B} = -6\text{E}-05t^5 + 0,0041t^4 - 0,0932t^3 + 0,9079t^2 - 2,9149t + 2,483$	0,9341
	$^{\circ}\text{B} = -7\text{E}-05t^5 + 0,0048t^4 - 0,1106t^3 + 1,0769t^2 - 0,34083t + 2,8598$	0,9250
	$^{\circ}\text{B} = -8\text{E}-05t^5 + 0,0049t^4 - 0,113t^3 + 1,1007t^2 - 3,5054t + 2,9492$	0,9233

Fuente: elaboración propia, a partir de la figura 27.

Tabla XX. **Coefficiente de variación de la concentración en grados Brix de la hidrólisis de 9 % de rodajas de papa, según el porcentaje de enzima**

	Porcentaje de enzima (%)					
	0,25	0,50	1,00	1,50	1,75	2,00
CV	5,76	4,57	3,77	2,89	2,81	3,73

Fuente: elaboración propia, a partir de valores del apéndice 22.

Tabla XXI. **Análisis de varianza de la concentración en grados Brix para las hipótesis H_{i1} y H₀₁**

Valor F (F _T)	Valor crítico de F (F _C)	Hipótesis aceptada
592,5	4,41	H _{i1}

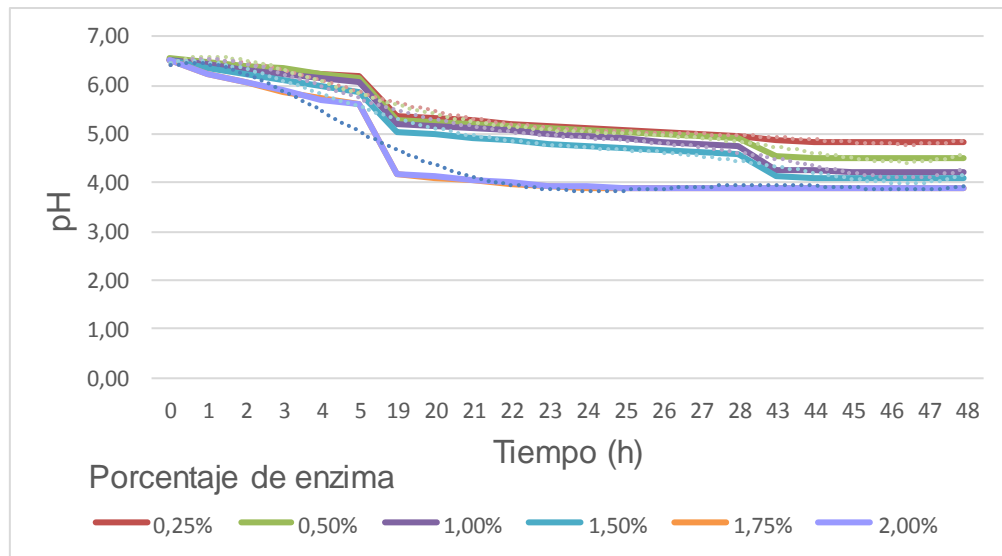
Fuente: elaboración propia, a partir de valores del apéndice 34.

Tabla XXII. **Diferencia de la concentración en grados Brix de la solución con harina (15 %m/V) y de la solución con rodajas de papa (9 %m/V)**

Comparación	Conclusión
$F_T > F_C$	Hay diferencia significativa

Fuente: elaboración propia, a partir de valores del apéndice 34.

Figura 28. **pH de la hidrólisis de 10 % de harina de papa en 1 000mL, según el porcentaje de enzima agregado, durante 48 horas a 65°C**



Fuente: elaboración propia, a partir de valores de los apéndices 10 y 23.

Tabla XXIII. **Representación de las tendencias del pH de la hidrólisis de 10 % de harina de papa**

Color	Modelo matemático	R ²
	$^{\circ}B=1E-05t^5-0,0008t^4+0,0172t^3-0,1668t^2+0,4924t+6,0793$	0,9636
	$^{\circ}B=2E-05t^5-0,0011t^4+0,0231t^3-0,2124t^2+0,6142t+6,0375$	0,9664
	$^{\circ}B=2E-05t^5-0,0011t^4+0,023t^3-0,2066t^2+0,5671t+6,0585$	0,9704
	$^{\circ}B=2E-05t^5-0,001t^4+0,0204t^3-0,1794t^2+0,4233t+6,1923$	0,9760
	$^{\circ}B=2E-05t^5-0,0012t^4+0,0278t^3-0,2608t^2+0,6467t+5,9753$	0,9584
	$^{\circ}B=2E-05t^5-0,0012t^4+0,0272t^3-0,255t^2+0,623t+6,0046$	0,9580

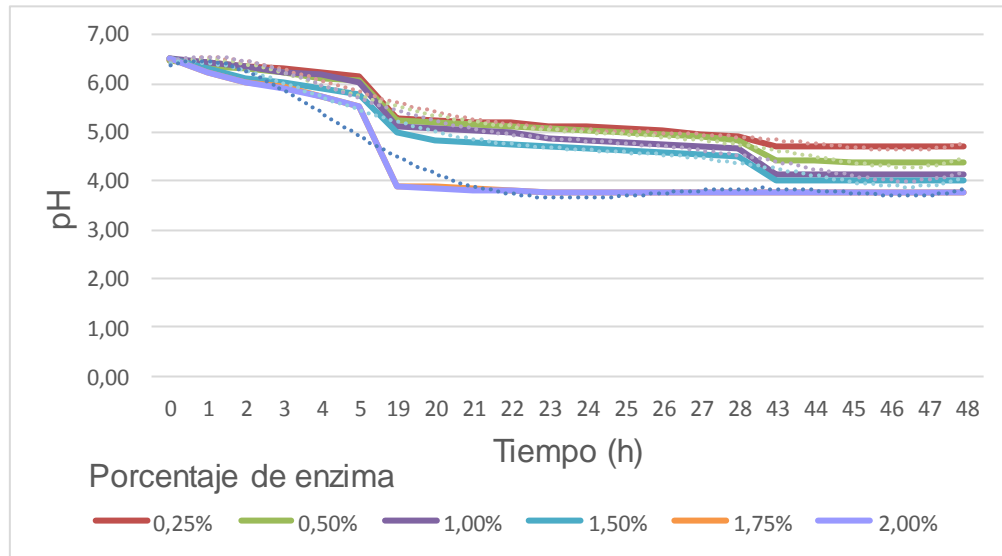
Fuente: elaboración propia, a partir de la figura 28.

Tabla XXIV. **Coefficiente de variación del pH de la hidrólisis de 10 % de harina de papa, según el porcentaje de enzima**

	Porcentaje de enzima (%)					
	0,25	0,50	1,00	1,50	1,75	2,00
CV	0,48	0,34	0,33	0,32	0,44	0,44

Fuente: elaboración propia, a partir de valores del apéndice 24.

Figura 29. **pH de la hidrólisis de 15 % de harina de papa en 1 000mL, según el porcentaje de enzima agregado, durante 48 horas a 65°C**



Fuente: elaboración propia, a partir de valores de los apéndices 11 y 25.

Tabla XXV. **Representación de las tendencias del pH de la hidrólisis de 15 % de harina de papa**

Color	Modelo matemático	R ²
■	$^{\circ}B=1E-05t^5-0,0009t^4+0,0196t^3-0,1859t^2+0,5468t+6,0269$	0,9636
■	$^{\circ}B=2E-05t^5-0,001t^4+0,0207t^3-0,186t^2+0,5039t+6,0734$	0,9683
■	$^{\circ}B=2E-05t^5-0,0012t^4+0,0248t^3-0,2244t^2+0,6249t+6,0195$	0,9696
■	$^{\circ}B=2E-05t^5-0,001t^4+0,0214t^3-0,1848t^2+0,4185t+6,165$	0,9732
■	$^{\circ}B=2E-05t^5-0,0015t^4+0,0348t^3-0,3256t^2+0,8602t+5,7753$	0,9480
■	$^{\circ}B=2E-05t^5-0,0016t^4+0,0354t^3-0,3284t^2+0,8561t+5,8043$	0,9487

Fuente: elaboración propia, a partir de la figura 29.

Tabla XXVI. **Coefficiente de variación del pH de la hidrólisis de 15 % de harina de papa, según el porcentaje de enzima**

	Porcentaje de enzima (%)					
	0,25	0,50	1,00	1,50	1,75	2,00
CV	0,25	0,36	0,35	0,41	0,49	0,40

Fuente: elaboración propia, a partir de valores del apéndice 26.

Tabla XXVII. **Análisis de varianza del pH de las soluciones con harina (10 %m/V y 15 %m/V)**

Valor F (F_T)	Valor crítico de F (F_C)
17,32	4,41

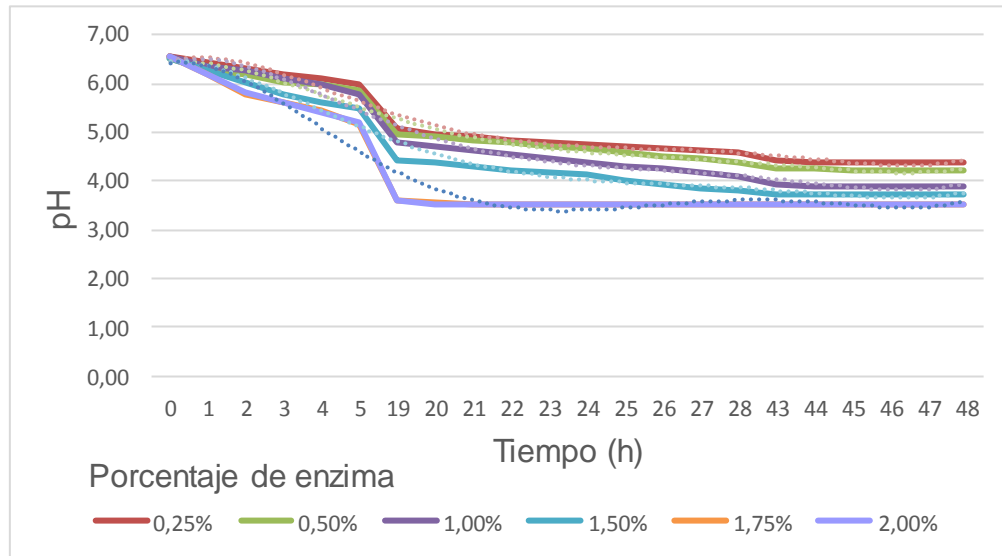
Fuente: elaboración propia, a partir de valores del apéndice 35.

Tabla XXVIII. **Diferencia del pH de las soluciones con harina (10 %m/V y 15 %m/V)**

Comparación	Conclusión
$F_T > F_C$	Hay diferencia significativa

Fuente: elaboración propia, a partir de valores del apéndice 35.

Figura 30. **pH de la hidrólisis de 9 % de rodajas de papa en 1 000mL, según el porcentaje de enzima agregado, durante 48 horas a 65°C**



Fuente: elaboración propia, a partir de valores de los apéndices 12 y 27.

Tabla XXIX. **Representación de las tendencias del pH de la hidrólisis de 9 % de rodajas de papa**

Color	Modelo matemático	R ²
	$^{\circ}B=2E-05t^5-0,0009t^4+0,0212t^3-0,1977t^2+0,5292t+6,1072$	0,9703
	$^{\circ}B=1E-05t^5-0,0007t^4+0,0148t^3-0,1359t^2+0,2856t+6,2708$	0,9743
	$^{\circ}B=2E-05t^5-0,001t^4+0,0221t^3-0,206t^2+0,5216t+6,119$	0,9782
	$^{\circ}B=1E-05t^5-0,0008t^4+0,0174t^3-0,1541t^2+0,245t+6,3517$	0,9780
	$^{\circ}B=2E-05t^5-0,0015t^4+0,0321t^3-0,2833t^2+0,5809t+6,0777$	0,9554
	$^{\circ}B=2E-05t^5-0,0015t^4+0,0325t^3-0,2871t^2+0,5923t+6,0815$	0,9555

Fuente: elaboración propia, a partir de la figura 30.

Tabla XXX. **Coefficiente de variación del pH de la hidrólisis de 9 % de rodajas de papa, según el porcentaje de enzima**

	Porcentaje de enzima (%)					
	0,25	0,50	1,00	1,50	1,75	2,00
CV	0,26	0,32	0,40	0,33	0,35	0,27

Fuente: elaboración propia, a partir de valores del apéndice 28.

Tabla XXXI. **Análisis de varianza del pH para las hipótesis H_{i2} y H_{02}**

Valor F (F_T)	Valor crítico de F (F_C)	Hipótesis aceptada
234,70	4,41	H_{i2}

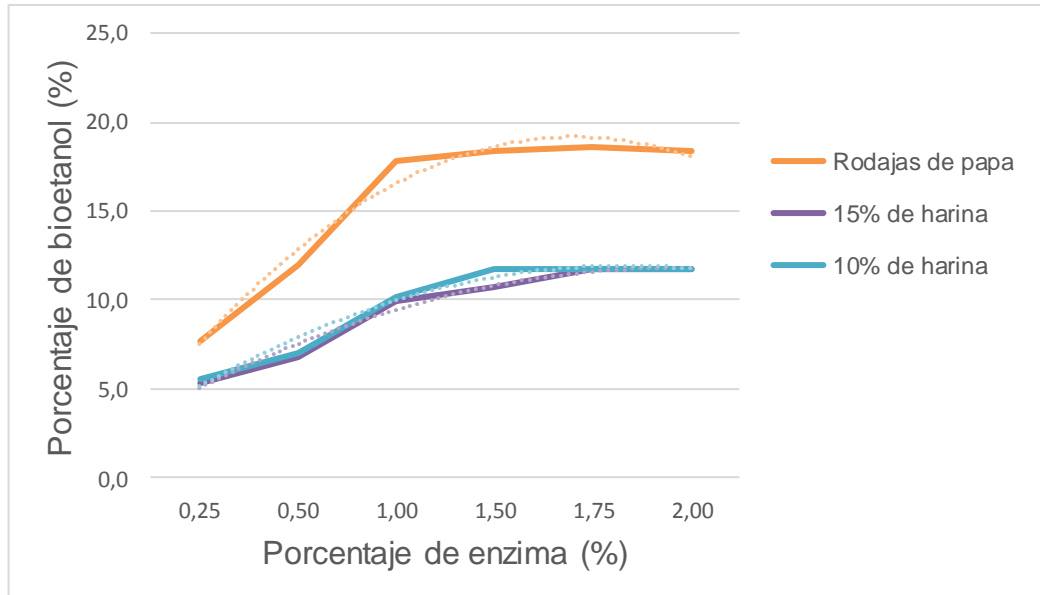
Fuente: elaboración propia, a partir de valores del apéndice 36.

Tabla XXXII. **Diferencia del pH de la solución con harina (15 %m/V) y de la solución con rodajas de papa (9 %m/V)**

Comparación	Conclusión
$F_T > F_C$	Hay diferencia significativa

Fuente: elaboración propia, a partir de valores del apéndice 36.

Figura 31. **Porcentaje de bioetanol, según el porcentaje de enzima**



Fuente: elaboración propia, a partir de valores de los apéndices 30, 31 y 32.

Tabla XXXIII. **Representación de las tendencias del porcentaje de bioetanol**

Color	Modelo matemático	R ²
	$b = -0,8018e^2 + 7,7182e + 0,5967$	0,9722
	$b = -0,2863e^2 + 3,585e + 1,9433$	0,9749
	$b = -0,3631e^2 + 3,8702e + 1,6$	0,9684

Fuente: elaboración propia, a partir de la figura 31.

Tabla XXXIV. **Coefficiente de variación del porcentaje de bioetanol, según el porcentaje de enzima**

		Porcentaje de enzima (%)					
		0,25	0,50	1,00	1,50	1,75	2,00
CV	10 % harina	0,00	9,38	0,00	0,00	0,00	0,00
	15 % harina	5,34	8,41	3,31	3,09	0,00	0,00
	9 % de rodajas de papa	3,67	2,77	0,00	2,06	0,00	2,06

Fuente: elaboración propia, a partir de valores de los apéndices 36, 37 y 38.

Tabla XXXV. **Análisis de varianza del bioetanol obtenido de las soluciones con harina (10 %m/V y 15 %m/V)**

Valor F (F_T)	Valor crítico de F (F_C)
1,0	7,71

Fuente: elaboración propia, a partir de valores del apéndice 37.

Tabla XXXVI. **Diferencia del bioetanol obtenido de las soluciones con harina (10 %m/V y 15 %m/V)**

Comparación	Conclusión
$F_T < F_C$	No hay diferencia significativa

Fuente: elaboración propia, a partir de valores del apéndice 37.

Tabla XXXVII. **Análisis de varianza del bioetanol para las hipótesis H_{i3} y H_{03}**

Valor F (F_T)	Valor crítico de F (F_C)	Hipótesis aceptada
408,4	7,71	H_{i3}

Fuente: elaboración propia, a partir de valores del apéndice 38.

Tabla XXXVIII. **Diferencia del bioetanol obtenido de la solución con harina (15 %m/V) y de la solución con rodajas de papa (9 %m/V)**

Comparación	Conclusión
$F_T > F_C$	Hay diferencia significativa

Fuente: elaboración propia, a partir de valores del apéndice 38.

5. INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS

La masa de las rodajas de papa disminuyó uniformemente durante el tiempo de secado, según figura 19. A las 23 horas de secado la masa se mantuvo constante, determinándose éste como el tiempo óptimo de secado. Según tabla IV la masa se redujo en un 80 %.

Las rodajas de papa, después del secado, redujeron su largo en un intervalo de 0,5cm y 1,5cm su ancho, según figuras 20 y 21, respectivamente, obteniéndose un porcentaje promedio de reducción de largo del 74,30 % y 66,23 % de ancho, según tabla VII. Las dimensiones iniciales de las rodajas de papa no afectaron su porcentaje de reducción debido a que cada rodaja posee distinta cantidad de agua contenida.

Según figura 22 las rodajas de papa con menos de 10g de masa presentaron un menor porcentaje de humedad después del secado, debido a que el grosor de las rodajas de papa aumentaba con su masa, obteniendo una harina con humedad final de 19,28 %, según tabla IX.

En las figuras 23 y 24 se observa que al gelatinizar la harina, esta aumentó proporcionalmente su volumen inicial debido a que los gránulos de almidón absorbieron el agua en la que se gelatinizó la harina, aumentando 10 veces su volumen inicial, en 4 horas, según tabla XII.

La mayor concentración en grados Brix obtenidos con las soluciones con 10 % de harina fue de 3,7, agregándose 1,75 % de enzima, según figura 25. La variación fue de 3,25 %, según tabla XIV. Con las soluciones con 15 % de

harina se obtuvieron 3,8 grados Brix al agregarse 1,75 % de enzima, según figura 26. Debido a que las concentraciones en grados Brix para las tres soluciones presentaron valores similares, se obtuvo una variación de 2,34 %, según tabla XVI. Las concentraciones en grados Brix aumentaron proporcionalmente a la cantidad de enzima agregada a las soluciones con harina, además disminuyó el tiempo en que se mantuvieron constantes.

En el análisis de varianza ANOVA para las soluciones con harina el valor F_T fue menor al valor crítico de F_C , por lo que la concentración en grados Brix fue significativa en las soluciones con 15 % de harina en comparación con las soluciones con 10 % de harina, según tabla XVIII.

En la figura 27 se presentan las concentraciones en grados Brix de la hidrólisis de 9 % de rodajas de papa, siendo de 6,1 al agregarse 1,75 % de enzima, con una variación de 2,81 %, según tabla XX. El coeficiente de variación demuestra que los valores de las concentraciones en grados Brix no fueron significativas. Las concentraciones en grados Brix obtenidas de las rodajas de papa fueron mayores a los de la harina debido a que la enzima solamente actuaba en el área superficial de la harina gelatinizada, hidrolizando mayor cantidad de almidón cuando se utilizó rodajas de papa, debido a que las rodajas tenían una mayor área de contacto. En la concentración en grados Brix, las soluciones con 15 % de harina tuvieron una mayor exactitud, 97,66 %, y las soluciones con 10 % de harina una menor exactitud, 96,75 %.

Según tabla XXII, en el análisis de varianza ANOVA para la concentración en grados Brix el valor F_T fue mayor al valor crítico de F_C por lo que se acepta la hipótesis de investigación, la cual indica que existe diferencia significativa entre la concentración en grados Brix de las soluciones con 15 % harina y los de la solución con 9 % de rodajas de papa.

El menor pH obtenido de la hidrólisis de 10 % de harina fue de 3,88 al agregarse 1,75 % de enzima, según figura 28. En la tabla XXIV se tiene que la variación fue de 0,44 %, por lo que no existe diferencia significativa en la medición del pH. Según figura 29 el menor pH obtenido de las soluciones con 15 % de harina, a las cuales se les agregó 1,75 %, fue de 3,77. Se obtuvo una variación de 0,49 %, según tabla XXVI.

El análisis de varianza ANOVA realizado para determinar cuál de las soluciones con harina presentaba el menor pH muestra que las soluciones con 15 % de harina tuvieron un menor pH, debido a que el valor de F_T fue mayor al valor crítico de F_C , según tabla XXVIII.

En la figura 30 se observa que el pH de la hidrólisis de 9 % de rodajas de papa fue de 3,52 al agregarse 1,75 % de enzima. Según tabla XXX la variación fue de 0,35 %, por lo que no existe diferencia significativa entre los valores de pH medidos. El pH durante la hidrólisis enzimática fue menor en las soluciones con rodajas de papa ya que las concentraciones en grados Brix obtenidas fueron mayores a los de las soluciones con harina, las soluciones disminuyeron su pH para ajustarse a la acidez necesaria de la actividad enzimática. Para el pH, las soluciones con 9 % de rodajas de papa tuvieron una mayor exactitud, 99,65 %, y las soluciones con 15 % de harina una menor exactitud, 99,51 %.

Según tabla XXXII, el análisis de varianza ANOVA para el pH de la solución con 15 % de harina y la solución con 9 % de rodajas de papa, indica que el valor F_T fue mayor al valor crítico de F_C , por lo que se acepta la hipótesis de investigación la cual indica que el pH de la solución de harina de papa y de rodajas de papa varía significativamente con los grados Brix.

Los porcentajes máximos de bioetanol que se obtuvieron en las tres soluciones fueron al agregarse 1,75 % de enzima a cada una. Los porcentajes de bioetanol obtenidos se encuentran graficados en la figura 31, las soluciones con 10 % y 15 % de harina presentaron porcentajes similares de bioetanol, siendo éstos de 11,7 %. El porcentaje de bioetanol obtenido con 9 % de rodajas de papa fue de 18,6 %. La variación fue de 0,00 % para las tres soluciones, al agregarse 1,75 % de enzima, indicando que los porcentajes de bioetanol obtenido fueron similares entre cada solución, según tabla XXXIV. El porcentaje de bioetanol obtenido fue proporcional a los grados Brix de cada una de las soluciones, ya que las soluciones con rodajas de papa presentaron una mayor concentración en grados Brix se obtuvo un porcentaje mayor de bioetanol en comparación con las soluciones con harina. En la obtención de bioetanol, las soluciones tuvieron una exactitud del 100,00 %.

En el análisis de varianza ANOVA realizado para las soluciones con harina se determina que la mayor cantidad de bioetanol obtenido fue con las soluciones con 15 % de harina ya que el valor F_T fue menor al valor crítico de F_C , según tabla XXXVI. Demostrando que en el análisis de varianza realizado para las concentraciones en grados Brix la mayor concentración en grados Brix fue obtenida de las soluciones con 15 % de harina.

El valor F_T , del análisis de varianza ANOVA para la obtención de bioetanol, fue mayor al valor crítico de F_C , lo cual comprueba la hipótesis de investigación que se refiere a que el porcentaje de bioetanol obtenido de la solución con rodajas de papa fue mayor al obtenido de la solución con 15 % de harina de papa, según tabla XXXVIII.

Según tabla X, el aumento de volumen de la harina presenta el mayor coeficiente de correlación en función del tiempo, 0,9945, en comparación con el contenido de humedad en función de la masa inicial, cuyo coeficiente de correlación es 0,0629, según tabla VIII.

CONCLUSIONES

1. Las dimensiones iniciales de las rodajas de papa no afectaron la humedad final de la harina, por lo que se obtuvo una harina con 19,28 % de humedad, con un tiempo óptimo de secado de 23 horas.
2. La absorción de agua por los gránulos de almidón de la harina de papa ocasionó un aumento de volumen de 10 veces, durante la gelatinización.
3. La concentración en grados Brix fue de 6,1 con la solución con rodajas de papa, debido a que la enzima solamente actuaba en el área superficial de la harina gelatinizada, hidrolizando mayor cantidad de almidón cuando se utilizó rodajas de papa debido a que éstas tenían mayor área de contacto.
4. La concentración en grados Brix aumentó proporcionalmente a la cantidad de enzima agregada a las soluciones de harina, disminuyendo el tiempo en que se mantuvieron constantes.
5. El pH durante la hidrólisis enzimática disminuyó al aumentar la concentración en grados Brix en las soluciones para ajustarse a la acidez necesaria de la actividad enzimática.
6. El porcentaje de bioetanol obtenido fue proporcional a la concentración en grados Brix de cada una de las soluciones, siendo 11,7 para las soluciones con harina y 18,6 % con la solución con rodajas de papa, ya que las soluciones con rodajas de papa presentaron una mayor

concentración en grados Brix se obtuvo un porcentaje mayor de bioetanol en comparación con las soluciones con harina.

RECOMENDACIONES

1. Disminuir el grosor de las rodajas de papa a 0,1cm para reducir el tiempo de secado.
2. Agitar constantemente las soluciones con harina durante la hidrólisis enzimática para obtener una mayor concentración en grados Brix.
3. Realizar el proceso de gelatinización de harina de papa y rodajas de papa en plancha de calentamiento para disminuir el tiempo de gelatinización.
4. Determinar si es factible darle un valor agregado a la papa como alternativa energética por medio de estudios de mercado.
5. Realizar estudios económicos para determinar si es factible aprovechar la papa en forma de combustible, como fuente energética.

BIBLIOGRAFÍA

1. ATAGO. *Refractómetro digital de bolsillo "PAL"*. [en línea]. China 2016. <http://www.Atago.net/Spanish/products_pal.php>. [Consulta: 8 de agosto de 2016].
2. BADUI, Salvador. *Química de los alimentos*. 4a edición. México: Pearson, 2006. 736 p.
3. BLOKIT MOTOR, S.L. *Bioetanol y combustibles*. [en línea]. España 2015. <<http://www.biokitmotor.com/info/bioetanol>>. [Consulta: 22 de abril de 2015].
4. Cosas de Física y Química. *Refracción*. [en línea]. España, 2016. <<http://elfisicoloco.blogspot.com/2013/02/refraccion.html>>. [Consulta: 10 de agosto de 2015].
5. Creamoselfuturo. *Bioteología*. [en línea]. España, 2015. <<http://blogs.creamoselfuturo.com/bio-tecnologia/2011/03/14/la-fermentacion-alcoholica-como-se-produce-y-aplicaciones/>>. [Consulta: 24 de abril de 2015].
6. EcuRed. *Almidón*. [en línea]. Cuba, 2016. <<http://www.ecured.cu/index.php/Almid%C3%B3n>>. [Consulta: 22 de abril de 2015].

7. EcuRed. *Hidrólisis*. [en línea]. Cuba, 2016. <<http://www.ecured.cu/index.php/Hidr%C3%B3lisis>>. [Consulta: 22 de abril de 2015].
8. EcuRed. *Papa (Tubérculo)*. [en línea]. Cuba, 2016. <[http://www.ecured.cu/index.php/Papa_\(Tub%C3%A9rculo\)](http://www.ecured.cu/index.php/Papa_(Tub%C3%A9rculo))>. [Consulta: 22 de abril de 2015].
9. Escuela Superior Politécnica de Chimborazo. *Prueba del almidón*. [en línea]. Ecuador, 2014. <<https://sites.google.com/site/laboratoriosbioquimica/bioquimica-i/prueba-del-almidon>>. [Consulta: 23 de abril de 2015].
10. *Journey to Forever. Biocombustibles y desarrollo sostenible*. [en línea]. Japón, 2015. <<http://www.journeytoforever.org/es/biocombustibles/manual-etanol-madre-tierra/manual-etanol-2.cgi>>. [Consulta: 22 de abril de 2015].
11. McMURRY, John. *Química orgánica*. 6a edición. México: Cengage Learning Latin America, 2008. 1224p.
12. MORRISON, Thornton. *Química orgánica*. 5a edición. México: Pearson, 2006. 736 p.
13. PERRY, Robert H. y GREEN, Don W. "*Manual del Ingeniero Químico*" 7a edición. Volumen I, Capítulo 2. España: McGraw-Hill, 2001.

14. Polisacáridos. *Almidones*. [en línea]. Colombia, 2015. <[http:// polisacaridos-almidones.blogspot.com/p/almidones.html](http://polisacaridos-almidones.blogspot.com/p/almidones.html)>. [Consulta: 23 de abril de 2015].
15. *Scientific Psychic. Carbohidratos o glúcidos–Estructura química*. [en línea]. Estados Unidos de América, 2015. <[http:// www.scientificpsychic.com/fitness/carbohidratos1.html](http://www.scientificpsychic.com/fitness/carbohidratos1.html)>. [Consulta: 1 de junio de 2016].
16. Universidad Autónoma de Chiriquí. *Pruebas para identificar una sustancia orgánica desconocida*. [en línea]. Panamá, 2011. <[http:// reaccionesparacompuestosorganicos.blogspot.com/](http://reaccionesparacompuestosorganicos.blogspot.com/)>. [Consulta: 23 de abril de 2015].
17. Universidad de Barcelona. *Destilación*. [en línea]. España, 2015. <http://www.ub.edu/oblq/oblq%20castellano/destilacio_fonament.html>. [Consulta: 25 de abril de 2015].
18. Universidad de Barcelona. *Secado*. [en línea]. España, 2015. <http://www.ub.edu/oblq/oblq%20castellano/dessecacio_tip.html>. [Consulta: 23 de abril de 2015].
19. Universidad Nacional Abierta y a Distancia. *La sacarificación*. [en línea]. Colombia, 2015. <http://datateca.unad.edu.co/contenidos/306598/contLinea/leccin_4__la_sacarificacin.html>. [Consulta: 23 de abril de 2015].
20. WEBSTER, Allen. *Estadística aplicada a los negocios y la economía*. 3a edición. Colombia: McGraw-Hill, 2000. 640p.

APÉNDICES

Apéndice 1. Método de lectura de las tablas

La concentración en grados Brix de la hidrólisis de 9 % de rodajas de papa a las 2 horas de hidrólisis es de 0,3, utilizándose 1,50 % de enzima, en la repetición 3:

		Porcentaje de enzima (%)																	
		0,25			0,50			1,00			1,50			1,75			2,00		
°Brix (%)	Tiempo (h)																		
	0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
	1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1
	2	0,2	0,1	0,2	0,2	0,3	0,2	0,2	0,2	0,3	0,2	0,3	0,3	0,3	0,4	0,3	0,3	0,2	0,4
	3	0,3	0,2	0,2	0,3	0,4	0,3	0,3	0,3	0,5	0,4	0,4	0,4	0,6	0,6	0,4	0,5	0,4	0,5
	4	0,3	0,2	0,2	0,3	0,4	0,3	0,4	0,4	0,5	0,6	0,5	0,5	0,7	0,8	0,7	0,8	0,6	0,6
5	0,3	0,3	0,3	0,4	0,5	0,3	0,5	0,5	0,6	0,5	0,6	0,4	0,8	1,0	0,9	0,9	0,8	0,9	

Fuente: elaboración propia.

Apéndice 2. **Masa de rodajas de papa al deshidratarse a 60°C y contenido de humedad**

		Tiempo de secado (h)								
Masa (g)	No. Rodaja	0	1	2	3	4	22	23	24	Humedad (%)
	1	3,76	3,24	2,62	2,16	1,47	0,61	0,58	0,57	15,16
	2	12,08	11,04	10,19	9,28	7,75	2,41	2,39	2,39	19,78
	3	8,23	6,90	5,93	5,00	3,43	1,55	1,52	1,52	18,47
	4	4,99	3,88	3,23	2,64	1,74	0,94	0,91	0,91	18,24
	5	13,29	11,70	10,64	9,44	7,38	2,32	2,28	2,27	17,08
	6	8,09	6,04	4,86	3,62	2,03	1,40	1,37	1,36	16,81
	7	7,56	6,15	5,13	4,32	2,88	1,29	1,25	1,25	16,53
	8	9,11	7,80	6,93	6,06	4,51	1,61	1,58	1,57	17,23
	9	8,36	6,94	6,07	5,15	3,58	1,40	1,36	1,36	16,27
	10	11,42	10,14	9,24	8,29	6,38	2,08	2,04	2,02	17,69
	11	12,52	11,32	10,50	9,60	7,84	2,53	2,50	2,49	19,89
	12	6,23	5,30	4,81	4,29	3,35	1,39	1,35	1,35	21,67
	13	6,09	5,28	4,69	4,08	3,06	1,22	1,19	1,19	19,54
	14	1,93	1,52	1,21	0,96	0,65	0,34	0,30	0,30	15,54
	15	9,80	8,76	7,76	6,97	5,58	1,92	1,89	1,88	19,18
	16	13,60	12,24	10,99	9,78	7,54	2,55	2,53	2,53	18,60
	17	15,86	14,20	12,87	11,46	8,82	2,85	2,83	2,81	17,72
	18	3,87	2,70	2,10	1,65	1,03	0,65	0,63	0,63	16,28
	19	7,86	5,92	4,87	3,83	2,42	1,32	1,30	1,30	16,54
20	2,76	1,92	1,50	1,17	0,75	0,50	0,46	0,46	16,67	

Fuente: elaboración propia.

Apéndice 3. **Pérdida de masa de rodajas de papa al deshidratarse después de 23 horas, a 60°C**

		Tiempo de secado (h)		Pérdida de masa	
		0	23	Δ Masa (g)	Humedad (%)
Masa (g)	No. Rodaja				
	21	5,22	0,80	4,42	15,33
	22	10,60	1,75	8,85	16,51
	23	6,45	1,13	5,32	17,52
	24	12,62	2,20	10,42	17,43
	25	8,20	1,45	6,75	17,68
	26	5,19	0,88	4,31	16,96
	27	6,20	1,12	5,08	18,06
	28	5,70	0,99	4,71	17,37
	29	3,50	0,62	2,88	17,71
	30	4,09	0,68	3,41	16,63
	31	1,29	0,20	1,09	15,50
	32	1,70	0,22	1,48	12,94
	33	3,21	0,52	2,69	16,20
	34	2,69	0,54	2,15	20,07
	35	2,81	0,57	2,24	20,28
	36	5,61	1,12	4,49	19,96
	37	10,42	2,09	8,33	20,06
	38	6,44	1,24	5,20	19,25
	39	11,75	2,27	9,48	19,32
	40	8,38	1,59	6,79	18,97
41	3,99	0,76	3,23	19,05	

Continuación del apéndice 3

42	6,52	1,21	5,31	18,56
43	8,70	1,57	7,13	18,05
44	7,07	1,33	5,74	18,81
45	7,48	1,42	6,06	18,98
46	7,60	1,49	6,11	19,61
47	12,65	2,45	10,20	19,37
48	8,52	1,68	6,84	19,72
49	9,78	1,94	7,84	19,84
50	6,19	1,18	5,01	19,06
51	3,02	0,58	2,44	19,21
52	0,85	0,14	0,71	16,47
53	5,54	0,97	4,57	17,51
54	8,72	1,69	7,03	19,38
55	11,82	2,24	9,58	18,95
56	13,47	2,50	10,97	18,56
57	13,34	2,45	10,89	18,37
58	2,83	0,54	2,29	19,08
59	10,49	1,84	8,65	17,54
60	5,02	0,93	4,09	18,53
61	10,52	1,91	8,61	18,16
62	13,22	2,50	10,72	18,91
63	4,84	0,84	4,00	17,36
64	9,99	1,93	8,06	19,32
65	12,99	2,46	10,53	18,94
66	16,89	3,07	13,82	18,18
67	14,89	2,63	12,26	17,66

Continuación del apéndice 3

68	11,07	2,02	9,05	18,25
69	14,96	2,64	12,32	17,65
70	18,86	3,64	15,22	19,30
71	14,02	2,25	11,77	16,05
72	11,66	2,68	8,98	22,98
73	10,66	2,08	8,58	19,51
74	6,47	1,15	5,32	17,77
75	3,27	0,45	2,82	13,76
76	0,86	0,12	0,74	13,95
77	1,12	0,12	1,00	10,71
78	8,84	1,54	7,30	17,42
79	20,64	3,96	16,68	19,19
80	16,75	3,02	13,73	18,03
81	17,03	2,93	14,10	17,20
82	18,24	3,11	15,13	17,05
83	18,99	3,17	15,82	16,69
84	7,24	1,27	5,97	17,54
85	12,18	2,10	10,08	17,24
86	11,40	1,92	9,48	16,84
87	12,75	2,15	10,60	16,86
88	16,26	3,02	13,24	18,57
89	10,54	1,91	8,63	18,12
90	4,69	0,69	4,00	14,71
91	4,12	0,68	3,44	16,50
92	11,91	2,31	9,60	19,40
93	19,46	3,70	15,76	19,01

Continuación del apéndice 3

94	18,25	3,25	15,00	17,81
95	19,47	3,29	16,18	16,90
96	12,60	2,11	10,49	16,75
97	21,00	3,49	17,51	16,62
98	14,84	3,25	11,59	21,90
99	19,70	2,53	17,17	12,84
100	8,97	1,55	7,42	17,28
101	13,48	2,47	11,01	18,32
102	9,03	1,68	7,35	18,60
103	6,81	1,29	5,52	18,94
104	7,51	1,47	6,04	19,57
105	3,70	0,66	3,04	17,84
106	1,73	0,23	1,50	13,29
107	9,39	1,70	7,69	18,10
108	11,04	1,92	9,12	17,39
109	13,33	2,17	11,16	16,28
110	9,03	1,39	7,64	15,39
111	15,44	2,45	12,99	15,87
112	13,30	2,16	11,14	16,24
113	8,98	1,61	7,37	17,93
114	10,61	1,96	8,65	18,47
115	9,67	1,84	7,83	19,03
116	3,73	0,55	3,18	14,75
117	14,36	3,62	10,74	25,21
118	19,57	2,80	16,77	14,31
119	17,99	3,18	14,81	17,68

Continuación del apéndice 3

120	23,01	4,04	18,97	17,56
121	29,13	5,39	23,74	18,50
122	17,09	3,27	13,82	19,13
123	15,64	3,27	12,37	20,91
124	7,72	1,50	6,22	19,43
125	4,06	0,69	3,37	17,00
126	11,14	2,33	8,81	20,92
127	18,10	3,73	14,37	20,61
128	15,31	2,88	12,43	18,81
129	19,45	3,58	15,87	18,41
130	20,97	4,01	16,96	19,12
131	18,75	4,00	14,75	21,33
132	15,48	3,65	11,83	23,58
133	7,35	1,65	5,70	22,45
134	15,67	3,57	12,10	22,78
135	12,59	2,88	9,71	22,88
136	16,06	3,61	12,45	22,48
137	14,99	3,85	11,14	25,68
138	14,82	3,75	11,07	25,30
139	12,18	2,85	9,33	23,40
140	9,73	2,09	7,64	21,48
141	16,43	3,90	12,53	23,74
142	8,28	1,88	6,40	22,71
143	13,88	3,13	10,75	22,55
144	13,73	3,10	10,63	22,58
145	10,69	2,84	7,85	26,57

Continuación del apéndice 3

146	7,56	1,88	5,68	24,87
147	12,71	3,23	9,48	25,41
148	12,42	2,96	9,46	23,83
149	12,48	2,52	9,96	20,19
150	6,49	1,65	4,84	25,42
151	7,87	1,54	6,33	19,57
152	8,15	1,65	6,50	20,25
153	2,71	0,47	2,24	17,34

Fuente: elaboración propia.

Apéndice 4. **Pérdida de masa y reducción de largo y ancho de rodajas de papa al deshidratarse a 60°C después de 23 horas**

No. Rodaja	Condiciones iniciales			Condiciones finales			Pérdida de masa y reducción de largo y ancho			Humedad (%)
	Masa (g)	Largo (cm)	Ancho (cm)	Masa (g)	Largo (cm)	Ancho (cm)	Δ Masa (g)	Δ Largo (cm)	Δ Ancho (cm)	
154	42,40	13,90	7,80	8,79	10,50	5,30	33,61	3,40	2,50	20,73
155	32,38	16,10	5,30	6,93	13,10	3,80	25,45	3,00	1,50	21,40
156	32,79	16,90	6,20	6,61	13,90	3,60	26,18	3,00	2,60	20,16
157	34,11	16,70	8,00	8,16	13,50	6,00	25,95	3,20	2,00	23,92
158	42,68	17,10	6,80	9,83	13,80	4,80	32,85	3,30	2,00	23,03
159	30,09	18,20	6,40	6,49	14,90	3,80	23,60	3,30	2,60	21,57
160	31,52	13,80	6,30	7,04	10,80	5,40	24,48	3,00	0,90	22,34
161	43,32	14,70	7,90	8,49	11,40	5,30	34,83	3,30	2,60	19,60
162	37,01	15,10	8,00	7,04	11,60	5,90	29,97	3,50	2,10	19,02
163	32,62	15,30	7,80	6,84	11,90	5,30	25,78	3,40	2,50	20,97
164	28,31	13,80	7,10	5,78	10,60	5,10	22,53	3,20	2,00	20,42
165	38,76	17,90	9,70	8,79	14,50	6,80	29,97	3,40	2,90	22,68
166	29,73	14,80	7,00	6,03	11,50	4,10	23,70	3,30	2,90	20,28
167	48,90	13,90	7,00	9,90	10,40	4,30	39,00	3,50	2,70	20,25
168	33,46	13,50	7,80	6,64	10,00	5,40	26,82	3,50	2,40	19,84
169	41,43	16,00	7,50	8,11	12,60	5,20	33,32	3,40	2,30	19,58
170	37,20	17,70	6,20	7,46	14,40	3,90	29,74	3,30	2,30	20,05
171	45,66	16,50	9,30	9,89	13,40	6,50	35,77	3,10	2,80	21,66
172	35,48	15,30	7,40	6,87	12,30	5,00	28,61	3,00	2,40	19,36
173	26,53	16,70	6,90	5,37	13,50	4,30	21,16	3,20	2,60	20,24
174	27,06	15,30	5,60	5,30	11,80	4,20	21,76	3,50	1,40	19,59
175	47,59	16,10	7,30	8,63	12,60	4,80	38,96	3,50	2,50	18,13
176	29,26	16,90	6,30	5,96	13,50	4,20	23,30	3,40	2,10	20,37
177	35,10	11,90	6,30	7,11	8,60	4,40	27,99	3,30	1,90	20,26
178	22,91	16,30	4,60	4,28	12,90	4,00	18,63	3,40	0,60	18,68

Continuación del apéndice 4

179	32,47	13,00	6,50	6,57	9,90	4,80	25,90	3,10	1,70	20,23
180	14,48	13,60	4,40	3,11	10,20	2,60	11,37	3,40	1,80	21,48
181	17,80	13,90	3,90	3,93	10,50	2,30	13,87	3,40	1,60	22,08
182	15,91	9,10	5,80	3,66	5,60	3,30	12,25	3,50	2,50	23,00
183	30,45	10,50	6,90	6,76	7,00	4,40	23,69	3,50	2,50	22,20
184	13,69	11,30	5,40	2,89	8,00	3,70	10,80	3,30	1,70	21,11
185	21,69	10,70	5,80	4,67	7,30	3,40	17,02	3,40	2,40	21,53
186	19,92	10,20	6,70	1,98	9,10	4,50	17,94	1,10	2,20	9,94
187	15,44	8,90	6,00	3,45	5,60	3,20	11,99	3,30	2,80	22,34
188	14,35	14,70	4,30	2,72	11,40	3,90	11,63	3,30	0,40	18,95
189	9,91	14,20	3,60	2,81	11,80	2,30	7,10	2,40	1,30	28,36
190	15,73	8,10	5,70	3,98	5,60	3,60	11,75	2,50	2,10	25,30
191	14,89	14,80	4,80	2,83	11,70	2,70	12,06	3,10	2,10	19,01
192	6,30	11,50	3,70	1,22	8,10	1,70	5,08	3,40	2,00	19,37
193	6,88	9,00	4,30	1,55	5,80	2,30	5,33	3,20	2,00	22,53
194	16,34	8,20	5,50	4,20	5,60	3,60	12,14	2,60	1,90	25,70
195	12,99	9,10	6,00	3,13	6,10	4,00	9,86	3,00	2,00	24,10
196	11,65	9,00	5,20	2,50	6,30	3,50	9,15	2,70	1,70	21,46
197	14,54	9,20	5,30	3,23	5,90	3,00	11,31	3,30	2,30	22,21
198	15,77	9,10	5,90	3,69	6,00	3,50	12,08	3,10	2,40	23,40
199	15,36	8,30	5,80	3,85	5,70	3,20	11,51	2,60	2,60	25,07
200	12,52	8,00	5,50	3,14	5,00	3,40	9,38	3,00	2,10	25,08
201	15,44	7,80	5,40	2,03	5,10	3,50	13,41	2,70	1,90	13,15
202	9,16	8,70	5,90	1,29	5,20	4,40	7,87	3,50	1,50	14,08
203	14,45	8,90	6,10	3,71	6,00	4,00	10,74	2,90	2,10	25,67
204	7,30	8,00	4,50	2,18	5,90	3,70	5,12	2,10	0,80	29,86

Fuente: elaboración propia.

Apéndice 5. **Aumento de volumen de la harina de papa en 1 000mL de agua durante la gelatinización, a 65°C**

		Porcentaje de harina en agua (%)					
		5			10		
Tiempo (h)							
Volumen (mL)	0,0	50	50	50	100	100	100
	0,5	100	100	100	250	250	250
	1,0	200	200	200	300	300	300
	1,5	300	300	300	500	500	500
	2,0	350	350	350	650	650	650
	2,5	400	400	400	850	850	850
	3,0	450	450	450	900	900	900
	3,5	475	475	475	950	950	950
	4,0	500	500	500	1 000	1 000	1 000
	4,5	500	500	500	1 000	1 000	1 000
	5,0	500	500	500	1 000	1 000	1 000

Fuente: elaboración propia.

Apéndice 6. **Aumento de volumen de la harina de papa en 100mL de agua durante la gelatinización, a 65°C**

		Porcentaje de harina en agua (%)					
		5			10		
Volumen (mL)	Tiempo (h)						
	0,0	5	5	5	10	10	10
	0,5	20	20	20	40	40	40
	1,0	25	25	25	50	50	50
	1,5	35	35	35	65	65	65
	2,0	40	40	40	80	80	80
	2,5	40	40	40	85	85	85
	3,0	45	45	45	90	90	90
	3,5	45	45	45	95	95	95
	4,0	50	50	50	100	100	100
	4,5	50	50	50	100	100	100
5,0	50	50	50	100	100	100	

Fuente: elaboración propia.

Apéndice 7. **Grados Brix de la hidrólisis de 10 % de harina de papa en 1 000mL durante 48 horas, a 65°C**

		Porcentaje de enzima (%)																	
Tiempo (h)		0,25			0,50			1,00			1,50			1,75			2,00		
°Brix (%)	0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
	1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,2	0,3	0,5	0,4	0,3	0,6	0,6	0,5	0,5	0,6	0,5
	2	0,2	0,1	0,1	0,2	0,2	0,2	0,3	0,3	0,4	0,6	0,5	0,7	0,8	0,9	0,8	0,8	0,9	0,7
	3	0,2	0,2	0,3	0,3	0,2	0,3	0,3	0,4	0,6	0,8	0,7	0,8	1,1	1,0	0,9	1,0	1,1	1,0
	4	0,3	0,3	0,3	0,3	0,4	0,4	0,5	0,6	0,7	0,9	0,8	1,0	1,2	1,2	1,1	1,3	1,4	1,2
	5	0,3	0,3	0,3	0,4	0,5	0,4	0,8	0,7	0,9	1,1	1,0	1,0	1,5	1,4	1,4	1,5	1,6	1,4
	19	0,7	0,7	0,9	1,1	1,0	1,0	2,2	2,3	2,4	2,7	2,5	2,7	3,2	3,1	3,0	3,1	3,0	3,3
	20	0,8	0,8	0,9	1,1	1,0	1,1	2,2	2,3	2,4	2,7	2,6	2,8	3,3	3,1	3,0	3,2	3,2	3,4
	21	0,8	0,8	0,9	1,2	1,1	1,2	2,3	2,4	2,5	2,7	2,7	2,8	3,3	3,2	3,1	3,2	3,2	3,4
	22	0,8	0,8	0,9	1,2	1,2	1,2	2,3	2,4	2,5	2,8	2,7	2,8	3,5	3,2	3,2	3,5	3,4	3,5
	23	0,9	0,9	0,9	1,3	1,2	1,2	2,4	2,5	2,6	2,8	2,8	2,9	3,5	3,4	3,3	3,6	3,4	3,6
	24	0,9	0,9	1,0	1,3	1,2	1,3	2,5	2,6	2,6	2,8	2,8	2,9	3,6	3,6	3,3	3,8	3,6	3,6
	25	0,9	0,9	1,0	1,3	1,3	1,3	2,6	2,6	2,7	2,9	2,9	2,9	3,8	3,6	3,7	3,8	3,6	3,7
	26	1,0	1,0	1,0	1,3	1,3	1,4	2,6	2,7	2,7	2,9	2,9	3,0	3,8	3,6	3,7	3,8	3,6	3,7
	27	1,0	1,0	1,0	1,4	1,4	1,4	2,6	2,7	2,7	3,0	2,9	3,1	3,8	3,6	3,7	3,8	3,6	3,7
	28	1,1	1,0	1,0	1,4	1,5	1,6	2,8	2,9	2,8	3,2	3,0	3,2	3,8	3,6	3,7	3,8	3,6	3,7
	43	1,7	1,6	1,5	2,0	2,3	2,2	3,1	3,1	3,0	3,6	3,6	3,6	3,8	3,6	3,7	3,8	3,6	3,7
	44	1,7	1,6	1,5	2,0	2,3	2,2	3,2	3,3	3,2	3,6	3,6	3,6	3,8	3,6	3,7	3,8	3,6	3,7
	45	1,8	1,7	1,6	2,1	2,4	2,4	3,2	3,3	3,4	3,6	3,6	3,6	3,8	3,6	3,7	3,8	3,6	3,7
46	1,8	1,7	1,7	2,1	2,4	2,4	3,2	3,3	3,4	3,6	3,6	3,6	3,8	3,6	3,7	3,8	3,6	3,7	
47	1,8	1,7	1,7	2,1	2,4	2,4	3,2	3,3	3,4	3,6	3,6	3,6	3,8	3,6	3,7	3,8	3,6	3,7	
48	1,8	1,7	1,7	2,1	2,4	2,4	3,2	3,3	3,4	3,6	3,6	3,6	3,8	3,6	3,7	3,8	3,6	3,7	

Fuente: elaboración propia.

Apéndice 8. **Grados Brix de la hidrólisis de 15 % de harina de papa en 1 000mL durante 48 horas, a 65°C**

		Porcentaje de enzima (%)																	
Tiempo (h)		0,25			0,50			1,00			1,50			1,75			2,00		
°Brix (%)	0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
	1	0,1	0,1	0,1	0,2	0,1	0,2	0,3	0,2	0,3	0,4	0,4	0,4	0,6	0,5	0,6	0,5	0,5	0,6
	2	0,2	0,2	0,2	0,3	0,3	0,2	0,5	0,4	0,4	0,4	0,6	0,7	0,8	0,7	0,8	0,9	0,7	0,8
	3	0,3	0,2	0,2	0,3	0,4	0,3	0,6	0,7	0,6	0,7	0,9	0,9	1,0	0,9	1,1	1,1	0,9	1,0
	4	0,3	0,3	0,3	0,4	0,4	0,4	0,8	0,8	0,8	0,9	1,0	1,1	1,3	1,2	1,3	1,3	1,1	1,2
	5	0,4	0,3	0,3	0,4	0,5	0,5	0,8	0,9	0,8	1,0	1,1	1,1	1,5	1,4	1,5	1,4	1,4	1,5
	19	0,6	0,7	0,6	1,0	1,0	1,1	2,1	2,2	2,1	2,6	2,7	2,7	3,1	3,0	3,0	3,1	3,1	3,0
	20	0,6	0,7	0,7	1,0	1,1	1,2	2,2	2,4	2,3	2,7	2,7	2,7	3,1	3,2	3,1	3,1	3,2	3,0
	21	0,6	0,8	0,7	1,1	1,1	1,2	2,3	2,4	2,3	2,7	2,8	2,7	3,3	3,3	3,3	3,2	3,2	3,2
	22	0,7	0,8	0,8	1,2	1,2	1,3	2,3	2,5	2,4	2,8	2,8	2,8	3,4	3,3	3,4	3,4	3,5	3,4
	23	0,8	0,9	0,8	1,2	1,2	1,3	2,5	2,5	2,4	2,8	2,8	2,8	3,6	3,6	3,4	3,6	3,6	3,7
	24	0,8	0,9	0,9	1,3	1,3	1,4	2,5	2,6	2,5	2,9	2,9	2,8	3,8	3,6	3,7	3,8	3,8	3,7
	25	0,9	0,9	0,9	1,3	1,3	1,4	2,7	2,7	2,6	2,9	2,9	2,9	3,8	3,8	3,7	3,8	3,8	3,7
	26	0,9	1,0	1,0	1,4	1,4	1,5	2,7	2,7	2,6	3,0	3,0	2,9	3,8	3,8	3,7	3,8	3,8	3,7
	27	1,0	1,0	1,0	1,4	1,4	1,5	2,8	2,8	2,7	3,0	3,0	2,9	3,8	3,8	3,7	3,8	3,8	3,7
	28	1,0	1,1	1,1	1,5	1,4	1,5	2,8	2,8	2,7	3,1	3,1	3,0	3,8	3,8	3,7	3,8	3,8	3,7
	43	1,6	1,5	1,4	2,0	1,9	2,2	3,0	3,2	3,0	3,4	3,4	3,3	3,8	3,8	3,7	3,8	3,8	3,7
	44	1,8	1,6	1,4	2,2	2,1	2,2	3,1	3,3	3,3	3,5	3,4	3,4	3,8	3,8	3,7	3,8	3,8	3,7
	45	1,8	1,7	1,6	2,2	2,1	2,4	3,1	3,3	3,3	3,5	3,4	3,5	3,8	3,8	3,7	3,8	3,8	3,7
46	1,8	1,7	1,6	2,2	2,1	2,4	3,1	3,3	3,3	3,5	3,4	3,5	3,8	3,8	3,7	3,8	3,8	3,7	
47	1,8	1,7	1,6	2,2	2,1	2,4	3,1	3,3	3,3	3,5	3,4	3,5	3,8	3,8	3,7	3,8	3,8	3,7	
48	1,8	1,7	1,6	2,2	2,1	2,4	3,1	3,3	3,3	3,5	3,4	3,5	3,8	3,8	3,7	3,8	3,8	3,7	

Fuente: elaboración propia.

Apéndice 9. **Grados Brix de la hidrólisis de 9 % de rodajas de papa en 1 000mL durante 48 horas, a 65°C**

		Porcentaje de enzima (%)																	
		0,25			0,50			1,00			1,50			1,75			2,00		
°Brix (%)	Tiempo (h)																		
		0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
	1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1
	2	0,2	0,1	0,2	0,2	0,3	0,2	0,2	0,2	0,3	0,2	0,3	0,3	0,3	0,4	0,3	0,3	0,2	0,4
	3	0,3	0,2	0,2	0,3	0,4	0,3	0,3	0,3	0,5	0,4	0,4	0,4	0,6	0,6	0,4	0,5	0,4	0,5
	4	0,3	0,2	0,2	0,3	0,4	0,3	0,4	0,4	0,5	0,6	0,5	0,5	0,7	0,8	0,7	0,8	0,6	0,6
	5	0,3	0,3	0,3	0,4	0,5	0,3	0,5	0,5	0,6	0,5	0,6	0,4	0,8	1,0	0,9	0,9	0,8	0,9
	19	2,0	1,8	2,1	2,6	2,7	2,6	4,0	4,1	4,1	4,6	4,9	4,8	5,7	5,9	5,9	5,8	5,7	6,0
	20	2,1	1,8	2,1	2,7	2,7	2,6	4,1	4,2	4,2	4,8	4,9	4,9	5,8	5,9	6,0	5,9	5,8	6,0
	21	2,2	1,9	2,2	2,8	2,7	2,7	4,2	4,3	4,2	4,9	5,0	5,0	5,9	6,1	6,0	6,0	5,9	6,1
	22	2,2	2,0	2,2	2,8	2,8	2,8	4,2	4,3	4,3	5,0	5,1	5,2	6,0	6,1	6,0	6,1	5,9	6,1
	23	2,3	2,1	2,2	2,9	2,8	2,8	4,3	4,5	4,4	5,1	5,2	5,2	6,1	6,1	6,0	6,1	5,9	6,1
	24	2,3	2,2	2,3	3,0	2,9	2,9	4,4	4,5	4,5	5,1	5,2	5,3	6,1	6,1	6,0	6,1	5,9	6,1
	25	2,3	2,2	2,3	3,1	2,9	3,0	4,5	4,6	4,5	5,2	5,3	5,4	6,1	6,1	6,0	6,1	5,9	6,1
	26	2,4	2,3	2,3	3,2	3,0	3,1	4,6	4,6	4,6	5,3	5,3	5,5	6,1	6,1	6,0	6,1	5,9	6,1
	27	2,4	2,3	2,4	3,2	3,0	3,1	4,7	4,7	4,7	5,4	5,4	5,5	6,1	6,1	6,0	6,1	5,9	6,1
	28	2,4	2,4	2,5	3,3	3,1	3,2	4,7	4,8	4,7	5,5	5,4	5,6	6,1	6,1	6,0	6,1	5,9	6,1
	43	2,5	2,4	2,6	3,6	3,7	3,6	5,8	5,6	5,7	6,0	5,8	5,8	6,1	6,1	6,0	6,1	5,9	6,1
	44	2,5	2,4	2,6	3,6	3,8	3,7	5,8	5,7	5,8	6,0	5,8	6,0	6,1	6,1	6,0	6,1	5,9	6,1
	45	2,5	2,4	2,6	3,7	3,9	3,7	5,8	5,7	5,9	6,0	5,9	6,0	6,1	6,1	6,0	6,1	5,9	6,1
	46	2,5	2,4	2,6	3,8	3,9	3,7	5,8	5,7	5,9	6,0	5,9	6,0	6,1	6,1	6,0	6,1	5,9	6,1
	47	2,5	2,4	2,6	3,8	3,9	3,7	5,8	5,7	5,9	6,0	5,9	6,0	6,1	6,1	6,0	6,1	5,9	6,1
	48	2,5	2,4	2,6	3,8	3,9	3,7	5,8	5,7	5,9	6,0	5,9	6,0	6,1	6,1	6,0	6,1	5,9	6,1

Fuente: elaboración propia.

Apéndice 10. **pH de la hidrólisis de 10 % de harina de papa en 1 000mL durante 48 horas, a 65°C**

		Porcentaje de enzima (%)																	
Tiempo (h)	pH	0,25			0,50			1,00			1,50			1,75			2,00		
		0	6,50	6,53	6,46	6,60	6,55	6,47	6,51	6,55	6,50	6,54	6,54	6,52	6,43	6,55	6,59	6,58	6,50
1	6,45	6,42	6,39	6,52	6,49	6,40	6,42	6,40	6,45	6,36	6,33	6,39	6,21	6,23	6,29	6,27	6,25	6,20	
2	6,36	6,38	6,34	6,45	6,40	6,37	6,33	6,31	6,34	6,21	6,20	6,24	6,02	6,08	6,05	6,03	6,06	6,07	
3	6,31	6,33	6,26	6,39	6,32	6,30	6,25	6,25	6,23	6,09	6,11	6,14	5,88	5,92	5,83	5,90	5,90	5,88	
4	6,27	6,27	6,20	6,24	6,23	6,25	6,18	6,14	6,12	5,95	5,98	5,99	5,73	5,75	5,70	5,71	5,70	5,72	
5	6,20	6,21	6,18	6,15	6,17	6,15	6,08	6,06	6,05	5,84	5,87	5,88	5,60	5,64	5,59	5,63	5,58	5,63	
19	5,35	5,40	5,33	5,28	5,31	5,31	5,18	5,20	5,23	5,07	5,01	5,05	4,13	4,16	4,20	4,16	4,19	4,15	
20	5,31	5,37	5,26	5,25	5,24	5,26	5,12	5,16	5,17	5,00	4,96	5,00	4,09	4,10	4,12	4,11	4,15	4,10	
21	5,27	5,32	5,22	5,20	5,20	5,21	5,08	5,10	5,13	4,91	4,92	4,97	4,01	4,04	4,05	4,06	4,09	4,06	
22	5,23	5,25	5,18	5,17	5,17	5,16	5,04	5,06	5,07	4,86	4,86	4,90	3,96	3,98	3,99	3,97	4,03	4,01	
23	5,17	5,19	5,14	5,13	5,14	5,11	4,98	5,02	5,01	4,79	4,80	4,82	3,93	3,92	3,93	3,93	3,96	3,95	
24	5,13	5,16	5,10	5,09	5,11	5,06	4,93	4,97	4,96	4,72	4,75	4,76	3,90	3,89	3,87	3,89	3,92	3,93	
25	5,08	5,11	5,06	5,05	5,07	5,02	4,87	4,90	4,92	4,68	4,69	4,72	3,90	3,88	3,85	3,87	3,92	3,91	
26	5,03	5,07	5,03	5,01	5,02	4,99	4,84	4,85	4,84	4,64	4,66	4,69	3,90	3,88	3,85	3,87	3,92	3,91	
27	5,00	5,04	5,00	4,97	4,99	4,96	4,80	4,79	4,80	4,62	4,60	4,63	3,90	3,88	3,85	3,87	3,92	3,91	
28	4,94	5,00	4,96	4,90	4,93	4,95	4,76	4,74	4,77	4,58	4,55	4,57	3,90	3,88	3,85	3,87	3,92	3,91	
43	4,82	4,86	4,89	4,52	4,55	4,54	4,28	4,22	4,26	4,13	4,14	4,12	3,90	3,88	3,85	3,87	3,92	3,91	
44	4,82	4,84	4,88	4,50	4,55	4,51	4,28	4,22	4,22	4,10	4,08	4,12	3,90	3,88	3,85	3,87	3,92	3,91	
45	4,80	4,84	4,87	4,50	4,55	4,51	4,23	4,19	4,22	4,10	4,08	4,11	3,90	3,88	3,85	3,87	3,92	3,91	
46	4,80	4,84	4,87	4,50	4,55	4,51	4,23	4,19	4,22	4,10	4,08	4,11	3,90	3,88	3,85	3,87	3,92	3,91	
47	4,80	4,84	4,87	4,50	4,55	4,51	4,23	4,19	4,22	4,10	4,08	4,11	3,90	3,88	3,85	3,87	3,92	3,91	
48	4,80	4,84	4,87	4,50	4,55	4,51	4,23	4,19	4,22	4,10	4,08	4,11	3,90	3,88	3,85	3,87	3,92	3,91	

Fuente: elaboración propia.

Apéndice 11. **pH de la hidrólisis de 15 % de harina de papa en 1 000mL durante 48 horas, a 65°C**

		Porcentaje de enzima (%)																	
Tiempo (h)		0,25			0,50			1,00			1,50			1,75			2,00		
pH	0	6,46	6,50	6,47	6,53	6,45	6,49	6,57	6,53	6,48	6,54	6,50	6,48	6,52	6,47	6,50	6,55	6,48	6,52
	1	6,43	6,42	6,41	6,40	6,38	6,33	6,45	6,47	6,39	6,33	6,31	6,29	6,20	6,22	6,29	6,23	6,29	6,21
	2	6,33	6,36	6,38	6,32	6,33	6,25	6,33	6,36	6,32	6,10	6,14	6,11	6,01	5,99	6,04	6,05	6,00	6,07
	3	6,29	6,27	6,31	6,23	6,25	6,19	6,21	6,29	6,24	5,97	6,03	6,02	5,95	5,93	5,90	5,92	5,91	5,90
	4	6,23	6,21	6,25	6,12	6,14	6,10	6,15	6,18	6,17	5,91	5,92	5,90	5,79	5,72	5,74	5,76	5,70	5,75
	5	6,14	6,16	6,18	6,08	6,07	6,05	6,00	6,04	6,02	5,79	5,80	5,73	5,52	5,54	5,58	5,50	5,51	5,55
	19	5,27	5,32	5,30	5,25	5,23	5,27	5,14	5,12	5,09	4,95	5,00	4,98	3,92	3,92	3,88	3,90	3,87	3,88
	20	5,24	5,28	5,26	5,20	5,19	5,22	5,12	5,09	5,06	4,86	4,83	4,84	3,88	3,90	3,86	3,87	3,84	3,85
	21	5,22	5,23	5,21	5,18	5,16	5,16	5,07	5,04	5,03	4,80	4,81	4,77	3,84	3,88	3,83	3,85	3,80	3,81
	22	5,18	5,19	5,17	5,14	5,12	5,11	5,00	4,99	4,97	4,75	4,77	4,74	3,79	3,84	3,80	3,82	3,80	3,79
	23	5,15	5,13	5,13	5,11	5,08	5,06	4,91	4,87	4,88	4,70	4,72	4,68	3,76	3,80	3,78	3,79	3,79	3,75
	24	5,12	5,09	5,10	5,08	5,05	5,01	4,84	4,84	4,85	4,67	4,69	4,63	3,76	3,80	3,76	3,77	3,79	3,75
	25	5,09	5,04	5,06	5,00	5,02	4,96	4,80	4,79	4,80	4,63	4,66	4,59	3,76	3,80	3,76	3,77	3,79	3,75
	26	5,06	5,02	5,04	4,98	4,97	4,90	4,77	4,75	4,76	4,58	4,62	4,55	3,76	3,80	3,76	3,77	3,79	3,75
	27	4,94	4,96	4,95	4,93	4,91	4,85	4,73	4,72	4,72	4,56	4,57	4,52	3,76	3,80	3,76	3,77	3,79	3,75
	28	4,89	4,92	4,91	4,87	4,84	4,82	4,70	4,67	4,69	4,52	4,53	4,49	3,76	3,80	3,75	3,77	3,79	3,75
	43	4,72	4,71	4,74	4,42	4,40	4,42	4,14	4,16	4,10	4,00	4,03	3,99	3,76	3,80	3,75	3,77	3,79	3,75
	44	4,71	4,70	4,74	4,41	4,40	4,42	4,13	4,16	4,10	3,99	4,03	3,97	3,76	3,80	3,75	3,77	3,79	3,75
	45	4,71	4,70	4,73	4,41	4,37	4,40	4,13	4,14	4,09	3,99	4,02	3,97	3,76	3,80	3,75	3,77	3,79	3,75
46	4,71	4,70	4,73	4,39	4,37	4,40	4,13	4,14	4,09	3,99	4,02	3,97	3,76	3,80	3,75	3,77	3,79	3,75	
47	4,71	4,70	4,73	4,39	4,37	4,40	4,13	4,14	4,09	3,99	4,02	3,97	3,76	3,80	3,75	3,77	3,79	3,75	
48	4,71	4,70	4,73	4,39	4,37	4,40	4,13	4,14	4,09	3,99	4,02	3,97	3,76	3,80	3,75	3,77	3,79	3,75	

Fuente: elaboración propia.

Apéndice 12. **pH de la hidrólisis de 9 % de rodajas de papa en 1 000mL durante 48 horas, a 65°C**

		Porcentaje de enzima (%)																	
Tiempo (h)	pH	0,25			0,50			1,00			1,50			1,75			2,00		
		0	6,55	6,58	6,50	6,50	6,53	6,55	6,57	6,52	6,54	6,52	6,50	6,52	6,57	6,55	6,50	6,55	6,52
1	6,41	6,46	6,39	6,25	6,26	6,28	6,38	6,36	6,33	6,25	6,27	6,31	6,16	6,20	6,14	6,21	6,22	6,18	
2	6,28	6,31	6,28	6,18	6,18	6,15	6,23	6,25	6,28	6,03	5,99	6,05	5,80	5,78	5,77	5,82	5,84	5,80	
3	6,16	6,20	6,18	6,01	6,03	5,99	6,09	6,11	6,13	5,80	5,76	5,72	5,64	5,60	5,62	5,60	5,61	5,62	
4	6,10	6,10	6,09	5,93	6,00	5,96	5,97	5,94	6,00	5,61	5,69	5,59	5,42	5,44	5,46	5,40	5,38	5,45	
5	6,01	5,98	6,00	5,85	5,86	5,82	5,75	5,77	5,80	5,52	5,50	5,48	5,18	5,14	5,12	5,21	5,16	5,20	
19	5,09	5,03	5,06	4,96	4,99	4,97	4,77	4,80	4,75	4,42	4,46	4,44	3,61	3,58	3,57	3,60	3,59	3,58	
20	4,97	4,95	4,99	4,89	4,88	4,91	4,70	4,74	4,67	4,36	4,38	4,36	3,57	3,53	3,52	3,54	3,52	3,55	
21	4,89	4,91	4,92	4,85	4,81	4,84	4,62	4,66	4,62	4,30	4,32	4,28	3,50	3,53	3,52	3,54	3,52	3,52	
22	4,85	4,83	4,84	4,78	4,76	4,77	4,51	4,54	4,55	4,22	4,26	4,22	3,50	3,53	3,52	3,54	3,52	3,52	
23	4,82	4,80	4,79	4,72	4,72	4,69	4,43	4,47	4,48	4,17	4,20	4,15	3,50	3,53	3,52	3,54	3,52	3,52	
24	4,78	4,76	4,75	4,65	4,68	4,63	4,34	4,39	4,40	4,11	4,14	4,09	3,50	3,53	3,52	3,54	3,52	3,52	
25	4,75	4,71	4,72	4,58	4,60	4,56	4,28	4,31	4,34	4,05	4,01	4,02	3,50	3,53	3,52	3,54	3,52	3,52	
26	4,70	4,66	4,68	4,52	4,54	4,49	4,22	4,25	4,27	3,95	3,94	3,94	3,50	3,53	3,52	3,54	3,52	3,52	
27	4,65	4,62	4,63	4,45	4,46	4,43	4,17	4,19	4,21	3,88	3,85	3,86	3,50	3,53	3,52	3,54	3,52	3,52	
28	4,61	4,60	4,60	4,39	4,40	4,37	4,10	4,12	4,11	3,85	3,82	3,80	3,50	3,53	3,52	3,54	3,52	3,52	
43	4,40	4,43	4,40	4,25	4,22	4,26	3,90	3,89	3,94	3,73	3,74	3,72	3,50	3,53	3,52	3,54	3,52	3,52	
44	4,39	4,40	4,37	4,23	4,22	4,26	3,89	3,87	3,91	3,72	3,74	3,71	3,50	3,53	3,52	3,54	3,52	3,52	
45	4,38	4,40	4,37	4,23	4,20	4,24	3,89	3,87	3,91	3,71	3,72	3,71	3,50	3,53	3,52	3,54	3,52	3,52	
46	4,38	4,40	4,37	4,23	4,20	4,24	3,89	3,87	3,91	3,71	3,72	3,71	3,50	3,53	3,52	3,54	3,52	3,52	
47	4,38	4,40	4,37	4,23	4,20	4,24	3,89	3,87	3,91	3,71	3,72	3,71	3,50	3,53	3,52	3,54	3,52	3,52	
48	4,38	4,40	4,37	4,23	4,20	4,24	3,89	3,87	3,91	3,71	3,72	3,71	3,50	3,53	3,52	3,54	3,52	3,52	

Fuente: elaboración propia.

Apéndice 13. **Prueba de almidón después de la hidrólisis durante 48 horas, a 65°C**

Porcentaje de enzima (%)	Repetición	Prueba de almidón		
		10 % de harina de papa	15 % de harina de papa	Rodajas de papa
0,25	1	Negativa	Negativa	Negativa
	2	Negativa	Negativa	Negativa
	3	Negativa	Negativa	Negativa
0,50	1	Negativa	Negativa	Negativa
	2	Negativa	Negativa	Negativa
	3	Negativa	Negativa	Negativa
1,00	1	Negativa	Negativa	Negativa
	2	Negativa	Negativa	Negativa
	3	Negativa	Negativa	Negativa
1,50	1	Negativa	Negativa	Negativa
	2	Negativa	Negativa	Negativa
	3	Negativa	Negativa	Negativa
1,75	1	Negativa	Negativa	Negativa
	2	Negativa	Negativa	Negativa
	3	Negativa	Negativa	Negativa
2,00	1	Negativa	Negativa	Negativa
	2	Negativa	Negativa	Negativa
	3	Negativa	Negativa	Negativa

Fuente: elaboración propia.

Apéndice 14. **Prueba de Fehling después de la hidrólisis durante 48 horas, a 65°C**

		Prueba de Fehling		
Porcentaje de enzima (%)	Repetición	10 % de harina de papa	15 % de harina de papa	Rodajas de papa
0,25	1	Positiva	Positiva	Positiva
	2	Positiva	Positiva	Positiva
	3	Positiva	Positiva	Positiva
0,50	1	Positiva	Positiva	Positiva
	2	Positiva	Positiva	Positiva
	3	Positiva	Positiva	Positiva
1,00	1	Positiva	Positiva	Positiva
	2	Positiva	Positiva	Positiva
	3	Positiva	Positiva	Positiva
1,50	1	Positiva	Positiva	Positiva
	2	Positiva	Positiva	Positiva
	3	Positiva	Positiva	Positiva
1,75	1	Positiva	Positiva	Positiva
	2	Positiva	Positiva	Positiva
	3	Positiva	Positiva	Positiva
2,00	1	Positiva	Positiva	Positiva
	2	Positiva	Positiva	Positiva
	3	Positiva	Positiva	Positiva

Fuente: elaboración propia.

Apéndice 15. **Prueba de Fehling después de la fermentación, a 20°C**

Porcentaje de enzima (%)	Repetición	Prueba de Fehling		
		10 % de harina de papa	15 % de harina de papa	Rodajas de papa
0,25	1	Negativa	Negativa	Negativa
	2	Negativa	Negativa	Negativa
	3	Negativa	Negativa	Negativa
0,50	1	Negativa	Negativa	Negativa
	2	Negativa	Negativa	Negativa
	3	Negativa	Negativa	Negativa
1,00	1	Negativa	Negativa	Negativa
	2	Negativa	Negativa	Negativa
	3	Negativa	Negativa	Negativa
1,50	1	Negativa	Negativa	Negativa
	2	Negativa	Negativa	Negativa
	3	Negativa	Negativa	Negativa
1,75	1	Negativa	Negativa	Negativa
	2	Negativa	Negativa	Negativa
	3	Negativa	Negativa	Negativa
2,00	1	Negativa	Negativa	Negativa
	2	Negativa	Negativa	Negativa
	3	Negativa	Negativa	Negativa

Fuente: elaboración propia.

Apéndice 16. **Prueba de sodio a las muestras de bioetanol**

Porcentaje de enzima (%)	Repetición	Prueba de sodio		
		10 % de harina de papa	15 % de harina de papa	Rodajas de papa
0,25	1	Positiva	Positiva	Positiva
	2	Positiva	Positiva	Positiva
	3	Positiva	Positiva	Positiva
0,50	1	Positiva	Positiva	Positiva
	2	Positiva	Positiva	Positiva
	3	Positiva	Positiva	Positiva
1,00	1	Positiva	Positiva	Positiva
	2	Positiva	Positiva	Positiva
	3	Positiva	Positiva	Positiva
1,50	1	Positiva	Positiva	Positiva
	2	Positiva	Positiva	Positiva
	3	Positiva	Positiva	Positiva
1,75	1	Positiva	Positiva	Positiva
	2	Positiva	Positiva	Positiva
	3	Positiva	Positiva	Positiva
2,00	1	Positiva	Positiva	Positiva
	2	Positiva	Positiva	Positiva
	3	Positiva	Positiva	Positiva

Fuente: elaboración propia.

Apéndice 17. Promedio y desviación estándar de los grados Brix de la hidrólisis de 10 % de harina de papa en 1 000mL durante 48 horas, a 65°C

		Porcentaje de enzima (%)											
		0,25		0,50		1,00		1,50		1,75		2,00	
Tiempo (h)	°Brix (%)	ḡ	S	ḡ	S	ḡ	S	ḡ	S	ḡ	S	ḡ	S
		0		0,0	0,000	0,0	0,000	0,0	0,000	0,0	0,000	0,0	0,000
1		0,1	0,000	0,1	0,000	0,2	0,082	0,4	0,082	0,6	0,047	0,5	0,047
2		0,1	0,047	0,2	0,000	0,3	0,047	0,6	0,082	0,8	0,047	0,8	0,082
3		0,2	0,047	0,3	0,047	0,4	0,125	0,8	0,047	1,0	0,082	1,0	0,047
4		0,3	0,000	0,4	0,047	0,6	0,082	0,9	0,082	1,2	0,047	1,3	0,082
5		0,3	0,000	0,4	0,047	0,8	0,082	1,0	0,047	1,4	0,047	1,5	0,082
19		0,8	0,094	1,0	0,047	2,3	0,082	2,6	0,094	3,1	0,082	3,1	0,125
20		0,8	0,047	1,1	0,047	2,3	0,082	2,7	0,082	3,1	0,125	3,3	0,094
21		0,8	0,047	1,2	0,047	2,4	0,082	2,7	0,047	3,2	0,082	3,3	0,094
22		0,8	0,047	1,2	0,000	2,4	0,082	2,8	0,047	3,3	0,141	3,5	0,047
23		0,9	0,000	1,2	0,047	2,5	0,082	2,8	0,047	3,4	0,082	3,5	0,094
24		0,9	0,047	1,3	0,047	2,6	0,047	2,8	0,047	3,5	0,141	3,7	0,094
25		0,9	0,047	1,3	0,000	2,6	0,047	2,9	0,000	3,7	0,082	3,7	0,082
26		1,0	0,000	1,3	0,047	2,7	0,047	2,9	0,047	3,7	0,082	3,7	0,082
27		1,0	0,000	1,4	0,000	2,7	0,047	3,0	0,082	3,7	0,082	3,7	0,082
28		1,0	0,047	1,5	0,082	2,8	0,047	3,1	0,094	3,7	0,082	3,7	0,082
43		1,6	0,082	2,2	0,125	3,1	0,047	3,6	0,000	3,7	0,082	3,7	0,082
44		1,6	0,082	2,2	0,125	3,2	0,047	3,6	0,000	3,7	0,082	3,7	0,082
45		1,7	0,082	2,3	0,141	3,3	0,082	3,6	0,000	3,7	0,082	3,7	0,082
46		1,7	0,047	2,3	0,141	3,3	0,082	3,6	0,000	3,7	0,082	3,7	0,082
47		1,7	0,047	2,3	0,141	3,3	0,082	3,6	0,000	3,7	0,082	3,7	0,082
48		1,7	0,047	2,3	0,141	3,3	0,082	3,6	0,000	3,7	0,082	3,7	0,082

Fuente: elaboración propia, a partir de valores del apéndice 7.

Apéndice 18. **Coefficiente de variación de los grados Brix de la hidrólisis de 10 % de harina de papa en 1 000mL durante 48 horas, a 65°C**

		Porcentaje de enzima (%)					
	Tiempo (h)	0,25	0,50	1,00	1,50	1,75	2,00
CV	0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	1	0,00	0,00	40,82	20,41	8,32	8,84
	2	35,36	0,00	14,14	13,61	5,66	10,21
	3	20,20	17,68	28,78	6,15	8,16	4,56
	4	0,00	12,86	13,61	9,07	4,04	6,28
	5	0,00	10,88	10,21	4,56	3,29	5,44
	19	12,30	4,56	3,55	3,58	2,63	3,98
	20	5,66	4,42	3,55	3,02	3,98	2,89
	21	5,66	4,04	3,40	1,72	2,55	2,89
	22	5,66	0,00	3,40	1,70	4,29	1,36
	23	0,00	3,82	3,27	1,66	2,40	2,67
	24	5,05	3,72	1,84	1,66	4,04	2,57
	25	5,05	0,00	1,79	0,00	2,21	2,21
	26	0,00	3,54	1,77	1,61	2,21	2,21
	27	0,00	0,00	1,77	2,72	2,21	2,21
	28	4,56	5,44	1,66	3,01	2,21	2,21
	43	5,10	5,76	1,54	0,00	2,21	2,21
	44	5,10	5,76	1,46	0,00	2,21	2,21
	45	4,80	6,15	2,47	0,00	2,21	2,21
46	2,72	6,15	2,47	0,00	2,21	2,21	
47	2,72	6,15	2,47	0,00	2,21	2,21	
48	2,72	6,15	2,47	0,00	2,21	2,21	

Fuente: elaboración propia, a partir de valores del apéndice 17.

Apéndice 19. Promedio y desviación estándar de los grados Brix de la hidrólisis de 15 % de harina de papa en 1 000mL durante 48 horas, a 65°C

		Porcentaje de enzima (%)											
		0,25		0,50		1,00		1,50		1,75		2,00	
Tiempo (h)	°Brix (%)	ḡ	S	ḡ	S	ḡ	S	ḡ	S	ḡ	S	ḡ	S
		0		0,0	0,000	0,0	0,000	0,0	0,000	0,0	0,000	0,0	0,000
1		0,1	0,000	0,2	0,047	0,3	0,047	0,4	0,047	0,6	0,047	0,5	0,047
2		0,2	0,000	0,3	0,047	0,4	0,047	0,6	0,125	0,8	0,047	0,8	0,082
3		0,2	0,047	0,3	0,047	0,6	0,047	0,8	0,094	1,0	0,082	1,0	0,082
4		0,3	0,000	0,4	0,000	0,8	0,000	1,0	0,082	1,3	0,047	1,2	0,082
5		0,3	0,047	0,5	0,047	0,8	0,047	1,1	0,047	1,5	0,047	1,4	0,047
19		0,6	0,047	1,0	0,047	2,1	0,047	2,7	0,047	3,0	0,047	3,1	0,047
20		0,7	0,047	1,1	0,082	2,3	0,082	2,7	0,000	3,1	0,047	3,1	0,082
21		0,7	0,082	1,1	0,047	2,3	0,047	2,7	0,047	3,3	0,000	3,2	0,000
22		0,8	0,047	1,2	0,047	2,4	0,082	2,8	0,000	3,4	0,047	3,4	0,047
23		0,8	0,047	1,2	0,047	2,5	0,047	2,8	0,000	3,5	0,094	3,6	0,047
24		0,9	0,047	1,3	0,047	2,5	0,047	2,9	0,047	3,7	0,082	3,8	0,047
25		0,9	0,000	1,3	0,047	2,7	0,047	2,9	0,000	3,8	0,047	3,8	0,047
26		1,0	0,047	1,4	0,047	2,7	0,047	3,0	0,047	3,8	0,047	3,8	0,047
27		1,0	0,000	1,4	0,047	2,8	0,047	3,0	0,047	3,8	0,047	3,8	0,047
28		1,1	0,047	1,5	0,047	2,8	0,047	3,1	0,047	3,8	0,047	3,8	0,047
43		1,5	0,082	2,0	0,125	3,1	0,094	3,4	0,047	3,8	0,047	3,8	0,047
44		1,6	0,163	2,2	0,047	3,2	0,094	3,4	0,047	3,8	0,047	3,8	0,047
45		1,7	0,082	2,2	0,125	3,2	0,094	3,5	0,047	3,8	0,047	3,8	0,047
46		1,7	0,082	2,2	0,125	3,2	0,094	3,5	0,047	3,8	0,047	3,8	0,047
47		1,7	0,082	2,2	0,125	3,2	0,094	3,5	0,047	3,8	0,047	3,8	0,047
48		1,7	0,082	2,2	0,125	3,2	0,094	3,5	0,047	3,8	0,047	3,8	0,047

Fuente: elaboración propia, a partir de valores del apéndice 8.

Apéndice 20. **Coefficiente de variación de los grados Brix de la hidrólisis de 15 % de harina de papa en 1 000mL durante 48 horas, a 65°C**

		Porcentaje de enzima (%)					
Tiempo (h)		0,25	0,50	1,00	1,50	1,75	2,00
CV	0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	1	0,00	28,28	17,68	12,86	8,32	8,84
	2	0,00	17,68	10,88	22,01	6,15	10,21
	3	20,20	14,14	7,44	11,31	8,16	8,16
	4	0,00	0,00	0,00	8,16	3,72	6,80
	5	14,14	10,10	5,66	4,42	3,21	3,29
	19	7,44	4,56	2,21	1,77	1,55	1,54
	20	7,07	7,42	3,55	0,00	1,50	2,63
	21	11,66	4,16	2,02	1,72	0,00	0,00
	22	6,15	3,82	3,40	0,00	1,40	1,37
	23	5,66	3,82	1,91	0,00	2,67	1,30
	24	5,44	3,54	1,86	1,64	2,21	1,25
	25	0,00	3,54	1,77	0,00	1,25	1,25
	26	4,88	3,29	1,77	1,59	1,25	1,25
	27	0,00	3,29	1,70	1,59	1,25	1,25
	28	4,42	3,21	1,70	1,54	1,25	1,25
	43	5,44	6,13	3,07	1,40	1,25	1,25
	44	10,21	2,18	2,92	1,37	1,25	1,25
	45	4,80	5,58	2,92	1,36	1,25	1,25
46	4,80	5,58	2,92	1,36	1,25	1,25	
47	4,80	5,58	2,92	1,36	1,25	1,25	
48	4,80	5,58	2,92	1,36	1,25	1,25	

Fuente: elaboración propia, a partir de valores del apéndice 19.

Apéndice 21. Promedio y desviación estándar de los grados Brix de la hidrólisis de 9 % de rodajas de papa en 1 000mL durante 48 horas, a 65°C

		Porcentaje de enzima (%)											
		0,25		0,50		1,00		1,50		1,75		2,00	
Tiempo (h)	°Brix (%)	ḡ	S	ḡ	S	ḡ	S	ḡ	S	ḡ	S	ḡ	S
		0		0,0	0,000	0,0	0,000	0,0	0,000	0,0	0,000	0,0	0,000
1		0,1	0,000	0,1	0,000	0,1	0,000	0,1	0,000	0,1	0,000	0,1	0,000
2		0,2	0,047	0,2	0,047	0,2	0,047	0,3	0,047	0,3	0,047	0,3	0,082
3		0,2	0,047	0,3	0,047	0,4	0,094	0,4	0,000	0,5	0,094	0,5	0,047
4		0,2	0,047	0,3	0,047	0,4	0,047	0,5	0,047	0,7	0,047	0,7	0,094
5		0,3	0,000	0,4	0,082	0,5	0,047	0,5	0,082	0,9	0,082	0,9	0,047
19		2,0	0,125	2,6	0,047	4,1	0,047	4,8	0,125	5,8	0,094	5,8	0,125
20		2,0	0,141	2,7	0,047	4,2	0,047	4,9	0,047	5,9	0,082	5,9	0,082
21		2,1	0,141	2,7	0,047	4,2	0,047	5,0	0,047	6,0	0,082	6,0	0,082
22		2,1	0,094	2,8	0,000	4,3	0,047	5,1	0,082	6,0	0,047	6,0	0,094
23		2,2	0,082	2,8	0,047	4,4	0,082	5,2	0,047	6,1	0,047	6,0	0,094
24		2,3	0,047	2,9	0,047	4,5	0,047	5,2	0,082	6,1	0,047	6,0	0,094
25		2,3	0,047	3,0	0,082	4,5	0,047	5,3	0,082	6,1	0,047	6,0	0,094
26		2,3	0,047	3,1	0,082	4,6	0,000	5,4	0,094	6,1	0,047	6,0	0,094
27		2,4	0,047	3,1	0,082	4,7	0,000	5,4	0,047	6,1	0,047	6,0	0,094
28		2,4	0,047	3,2	0,082	4,7	0,047	5,5	0,082	6,1	0,047	6,0	0,094
43		2,5	0,082	3,6	0,047	5,7	0,082	5,9	0,094	6,1	0,047	6,0	0,094
44		2,5	0,082	3,7	0,082	5,8	0,047	5,9	0,094	6,1	0,047	6,0	0,094
45		2,5	0,082	3,8	0,094	5,8	0,082	6,0	0,047	6,1	0,047	6,0	0,094
46		2,5	0,082	3,8	0,082	5,8	0,082	6,0	0,047	6,1	0,047	6,0	0,094
47		2,5	0,082	3,8	0,082	5,8	0,082	6,0	0,047	6,1	0,047	6,0	0,094
48		2,5	0,082	3,8	0,082	5,8	0,082	6,0	0,047	6,1	0,047	6,0	0,094

Fuente: elaboración propia, a partir de valores del apéndice 9.

Apéndice 22. **Coefficiente de variación de los grados Brix de la hidrólisis de 9 % de rodajas de papa en 1 000mL durante 48 horas, a 65°C**

		Porcentaje de enzima (%)					
	Tiempo (h)	0,25	0,50	1,00	1,50	1,75	2,00
CV	0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	1	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	2	28,28	20,20	20,20	17,68	14,14	27,22
	3	20,20	14,14	25,71	0,00	17,68	10,10
	4	20,20	14,14	10,88	8,84	6,43	14,14
	5	0,00	20,41	8,84	16,33	9,07	5,44
	19	6,34	1,79	1,16	2,62	1,62	2,14
	20	7,07	1,77	1,13	0,97	1,38	1,38
	21	6,73	1,72	1,11	0,95	1,36	1,36
	22	4,42	0,00	1,10	1,60	0,78	1,56
	23	3,71	1,66	1,86	0,91	0,78	1,56
	24	2,08	1,61	1,06	1,57	0,78	1,56
	25	2,08	2,72	1,04	1,54	0,78	1,56
	26	2,02	2,63	0,00	1,76	0,78	1,56
	27	1,99	2,63	0,00	0,87	0,78	1,56
	28	1,94	2,55	1,00	1,48	0,78	1,56
	43	3,27	1,30	1,43	1,61	0,78	1,56
	44	3,27	2,21	0,82	1,59	0,78	1,56
	45	3,27	2,50	1,41	0,79	0,78	1,56
46	3,27	2,15	1,41	0,79	0,78	1,56	
47	3,27	2,15	1,41	0,79	0,78	1,56	
48	3,27	2,15	1,41	0,79	0,78	1,56	

Fuente: elaboración propia, a partir de valores del apéndice 21.

Apéndice 23. Promedio y desviación estándar del pH de la hidrólisis de 10 % de harina de papa en 1 000mL durante 48 horas, a 65°C

		Porcentaje de enzima (%)											
		0,25		0,50		1,00		1,50		1,75		2,00	
Tiempo (h)	pH	ḡ	S	ḡ	S	ḡ	S	ḡ	S	ḡ	S	ḡ	S
		0		6,50	0,029	6,54	0,054	6,52	0,022	6,53	0,009	6,52	0,068
1		6,42	0,024	6,47	0,051	6,42	0,021	6,36	0,024	6,24	0,034	6,24	0,029
2		6,36	0,016	6,41	0,033	6,33	0,012	6,22	0,017	6,05	0,024	6,05	0,017
3		6,30	0,029	6,34	0,039	6,24	0,009	6,11	0,021	5,88	0,037	5,89	0,009
4		6,25	0,033	6,24	0,008	6,15	0,025	5,97	0,017	5,73	0,021	5,71	0,008
5		6,20	0,012	6,16	0,009	6,06	0,012	5,86	0,017	5,61	0,022	5,61	0,024
19		5,36	0,029	5,30	0,014	5,20	0,021	5,04	0,025	4,16	0,029	4,17	0,017
20		5,31	0,045	5,25	0,008	5,15	0,022	4,99	0,019	4,10	0,012	4,12	0,022
21		5,27	0,041	5,20	0,005	5,10	0,021	4,93	0,026	4,03	0,017	4,07	0,014
22		5,22	0,029	5,17	0,005	5,06	0,012	4,87	0,019	3,98	0,012	4,00	0,025
23		5,17	0,021	5,13	0,012	5,00	0,017	4,80	0,012	3,93	0,005	3,95	0,012
24		5,13	0,024	5,09	0,021	4,95	0,017	4,74	0,017	3,89	0,012	3,91	0,017
25		5,08	0,021	5,05	0,021	4,90	0,021	4,70	0,017	3,88	0,021	3,90	0,022
26		5,04	0,019	5,01	0,012	4,84	0,005	4,66	0,021	3,88	0,021	3,90	0,022
27		5,01	0,019	4,97	0,012	4,80	0,005	4,62	0,012	3,88	0,021	3,90	0,022
28		4,97	0,025	4,93	0,021	4,76	0,012	4,57	0,012	3,88	0,021	3,90	0,022
43		4,86	0,029	4,54	0,012	4,25	0,025	4,13	0,008	3,88	0,021	3,90	0,022
44		4,85	0,025	4,52	0,022	4,24	0,028	4,10	0,016	3,88	0,021	3,90	0,022
45		4,84	0,029	4,52	0,022	4,21	0,017	4,10	0,012	3,88	0,021	3,90	0,022
46		4,84	0,029	4,52	0,022	4,21	0,017	4,10	0,012	3,88	0,021	3,90	0,022
47		4,84	0,029	4,52	0,022	4,21	0,017	4,10	0,012	3,88	0,021	3,90	0,022
48		4,84	0,029	4,52	0,022	4,21	0,017	4,10	0,012	3,88	0,021	3,90	0,022

Fuente: elaboración propia, a partir de valores del apéndice 10.

Apéndice 24. **Coefficiente de variación del pH de la hidrólisis de 10 % de harina de papa en 1 000mL durante 48 horas, a 65°C**

		Porcentaje de enzima (%)					
Tiempo (h)		0,25	0,50	1,00	1,50	1,75	2,00
CV	0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	1	0,38	0,79	0,32	0,39	0,54	0,47
	2	0,26	0,52	0,20	0,27	0,40	0,28
	3	0,47	0,61	0,15	0,34	0,63	0,16
	4	0,53	0,13	0,41	0,28	0,36	0,14
	5	0,20	0,15	0,21	0,29	0,39	0,42
	19	0,55	0,27	0,39	0,49	0,69	0,41
	20	0,85	0,16	0,42	0,38	0,30	0,52
	21	0,77	0,09	0,40	0,53	0,42	0,35
	22	0,56	0,09	0,25	0,39	0,31	0,62
	23	0,40	0,24	0,34	0,26	0,12	0,32
	24	0,48	0,40	0,34	0,36	0,32	0,43
	25	0,40	0,41	0,42	0,36	0,53	0,55
	26	0,37	0,25	0,10	0,44	0,53	0,55
	27	0,38	0,25	0,10	0,27	0,53	0,55
	28	0,50	0,42	0,26	0,27	0,53	0,55
	43	0,59	0,27	0,59	0,20	0,53	0,55
	44	0,51	0,48	0,67	0,40	0,53	0,55
	45	0,59	0,48	0,40	0,30	0,53	0,55
46	0,59	0,48	0,40	0,30	0,53	0,55	
47	0,59	0,48	0,40	0,30	0,53	0,55	
48	0,59	0,48	0,40	0,30	0,53	0,55	

Fuente: elaboración propia, a partir de valores del apéndice 23.

Apéndice 25. **Promedio y desviación estándar del pH de la hidrólisis de 15 % de harina de papa en 1 000mL durante 48 horas, a 65°C**

		Porcentaje de enzima (%)											
Tiempo (h)	0,25		0,50		1,00		1,50		1,75		2,00		
	\bar{x}	S	\bar{x}	S	\bar{x}	S	\bar{x}	S	\bar{x}	S	\bar{x}	S	
pH	0	6,48	0,017	6,49	0,033	6,53	0,037	6,51	0,025	6,50	0,021	6,52	0,029
	1	6,42	0,008	6,37	0,029	6,44	0,034	6,31	0,016	6,24	0,039	6,24	0,034
	2	6,36	0,021	6,30	0,036	6,34	0,017	6,12	0,017	6,01	0,021	6,04	0,029
	3	6,29	0,016	6,22	0,025	6,25	0,033	6,01	0,026	5,93	0,021	5,91	0,008
	4	6,23	0,016	6,12	0,016	6,17	0,012	5,91	0,008	5,75	0,029	5,74	0,026
	5	6,16	0,016	6,07	0,012	6,02	0,016	5,77	0,031	5,55	0,025	5,52	0,022
	19	5,30	0,021	5,25	0,016	5,12	0,021	4,98	0,021	3,91	0,019	3,88	0,012
	20	5,26	0,016	5,20	0,012	5,09	0,024	4,84	0,012	3,88	0,016	3,85	0,012
	21	5,22	0,008	5,17	0,009	5,05	0,017	4,79	0,017	3,85	0,022	3,82	0,022
	22	5,18	0,008	5,12	0,012	4,99	0,012	4,75	0,012	3,81	0,022	3,80	0,012
	23	5,14	0,009	5,08	0,021	4,89	0,017	4,70	0,016	3,78	0,016	3,78	0,019
	24	5,10	0,012	5,05	0,029	4,84	0,005	4,66	0,025	3,77	0,019	3,77	0,016
	25	5,06	0,021	4,99	0,025	4,80	0,005	4,63	0,029	3,77	0,019	3,77	0,016
	26	5,04	0,016	4,95	0,036	4,76	0,008	4,58	0,029	3,77	0,019	3,77	0,016
	27	4,95	0,008	4,90	0,034	4,72	0,005	4,55	0,022	3,77	0,019	3,77	0,016
	28	4,91	0,012	4,84	0,021	4,69	0,012	4,51	0,017	3,77	0,022	3,77	0,016
	43	4,72	0,012	4,41	0,009	4,13	0,025	4,01	0,017	3,77	0,022	3,77	0,016
	44	4,72	0,017	4,41	0,008	4,13	0,024	4,00	0,025	3,77	0,022	3,77	0,016
	45	4,71	0,012	4,39	0,017	4,12	0,022	3,99	0,021	3,77	0,022	3,77	0,016
46	4,71	0,012	4,39	0,012	4,12	0,022	3,99	0,021	3,77	0,022	3,77	0,016	
47	4,71	0,012	4,39	0,012	4,12	0,022	3,99	0,021	3,77	0,022	3,77	0,016	
48	4,71	0,012	4,39	0,012	4,12	0,022	3,99	0,021	3,77	0,022	3,77	0,016	

Fuente: elaboración propia, a partir de valores del apéndice 11.

Apéndice 26. **Coefficiente de variación del pH de la hidrólisis de 15 % de harina de papa en 1 000mL durante 48 horas, a 65°C**

		Porcentaje de enzima (%)					
Tiempo (h)		0,25	0,50	1,00	1,50	1,75	2,00
CV	0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	1	0,13	0,46	0,53	0,26	0,62	0,54
	2	0,32	0,56	0,27	0,28	0,34	0,49
	3	0,26	0,40	0,53	0,44	0,35	0,14
	4	0,26	0,27	0,20	0,14	0,51	0,46
	5	0,27	0,21	0,27	0,54	0,45	0,39
	19	0,39	0,31	0,40	0,41	0,48	0,32
	20	0,31	0,24	0,48	0,26	0,42	0,32
	21	0,16	0,18	0,34	0,35	0,56	0,57
	22	0,16	0,24	0,25	0,26	0,57	0,33
	23	0,18	0,40	0,35	0,35	0,43	0,50
	24	0,24	0,57	0,10	0,53	0,50	0,43
	25	0,41	0,50	0,10	0,62	0,50	0,43
	26	0,32	0,72	0,17	0,63	0,50	0,43
	27	0,16	0,69	0,10	0,47	0,50	0,43
	28	0,25	0,42	0,27	0,38	0,57	0,43
	43	0,26	0,21	0,60	0,42	0,57	0,43
	44	0,36	0,19	0,59	0,62	0,57	0,43
	45	0,26	0,39	0,52	0,51	0,57	0,43
46	0,26	0,28	0,52	0,51	0,57	0,43	
47	0,26	0,28	0,52	0,51	0,57	0,43	
48	0,26	0,28	0,52	0,51	0,57	0,43	

Fuente: elaboración propia, a partir de valores del apéndice 25.

Apéndice 27. Promedio y desviación estándar del pH de la hidrólisis de 9 % de rodajas de papa en 1 000mL durante 48 horas, a 65°C

		Porcentaje de enzima (%)											
Tiempo (h)	0,25		0,50		1,00		1,50		1,75		2,00		
	\bar{x}	S	\bar{x}	S	\bar{x}	S	\bar{x}	S	\bar{x}	S	\bar{x}	S	
pH	0	6,54	0,033	6,53	0,021	6,54	0,021	6,51	0,009	6,54	0,029	6,54	0,012
	1	6,42	0,029	6,26	0,012	6,36	0,021	6,28	0,025	6,17	0,025	6,20	0,017
	2	6,29	0,014	6,17	0,014	6,25	0,021	6,02	0,025	5,78	0,012	5,82	0,016
	3	6,18	0,016	6,01	0,016	6,11	0,016	5,76	0,033	5,62	0,016	5,61	0,008
	4	6,10	0,005	5,96	0,029	5,97	0,024	5,63	0,043	5,44	0,016	5,41	0,029
	5	6,00	0,012	5,84	0,017	5,77	0,021	5,50	0,016	5,15	0,025	5,19	0,022
	19	5,06	0,024	4,97	0,012	4,77	0,021	4,44	0,016	3,59	0,017	3,59	0,008
	20	4,97	0,016	4,89	0,012	4,70	0,029	4,37	0,009	3,54	0,022	3,54	0,012
	21	4,91	0,012	4,83	0,017	4,63	0,019	4,30	0,016	3,52	0,012	3,53	0,009
	22	4,84	0,008	4,77	0,008	4,53	0,017	4,23	0,019	3,52	0,012	3,53	0,009
	23	4,80	0,012	4,71	0,014	4,46	0,022	4,17	0,021	3,52	0,012	3,53	0,009
	24	4,76	0,012	4,65	0,021	4,38	0,026	4,11	0,021	3,52	0,012	3,53	0,009
	25	4,73	0,017	4,58	0,016	4,31	0,024	4,03	0,017	3,52	0,012	3,53	0,009
	26	4,68	0,016	4,52	0,021	4,25	0,021	3,94	0,005	3,52	0,012	3,53	0,009
	27	4,63	0,012	4,45	0,012	4,19	0,016	3,86	0,012	3,52	0,012	3,53	0,009
	28	4,60	0,005	4,39	0,012	4,11	0,008	3,82	0,021	3,52	0,012	3,53	0,009
	43	4,41	0,014	4,24	0,017	3,91	0,022	3,73	0,008	3,52	0,012	3,53	0,009
	44	4,39	0,012	4,24	0,017	3,89	0,016	3,72	0,012	3,52	0,012	3,53	0,009
	45	4,38	0,012	4,22	0,017	3,89	0,016	3,71	0,005	3,52	0,012	3,53	0,009
46	4,38	0,012	4,22	0,017	3,89	0,016	3,71	0,005	3,52	0,012	3,53	0,009	
47	4,38	0,012	4,22	0,017	3,89	0,016	3,71	0,005	3,52	0,012	3,53	0,009	
48	4,38	0,012	4,22	0,017	3,89	0,016	3,71	0,005	3,52	0,012	3,53	0,009	

Fuente: elaboración propia, a partir de valores del apéndice 12.

Apéndice 28. **Coefficiente de variación del pH de la hidrólisis de 9 % de rodajas de papa en 1 000mL durante 48 horas, a 65°C**

		Porcentaje de enzima (%)					
Tiempo (h)		0,25	0,50	1,00	1,50	1,75	2,00
CV	0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	1	0,46	0,20	0,32	0,40	0,40	0,27
	2	0,22	0,23	0,33	0,41	0,22	0,28
	3	0,26	0,27	0,27	0,57	0,29	0,15
	4	0,08	0,48	0,41	0,77	0,30	0,54
	5	0,21	0,29	0,36	0,30	0,48	0,42
	19	0,48	0,25	0,43	0,37	0,47	0,23
	20	0,33	0,25	0,61	0,22	0,61	0,35
	21	0,25	0,35	0,41	0,38	0,35	0,27
	22	0,17	0,17	0,37	0,45	0,35	0,27
	23	0,26	0,30	0,48	0,49	0,35	0,27
	24	0,26	0,44	0,60	0,50	0,35	0,27
	25	0,36	0,36	0,57	0,42	0,35	0,27
	26	0,35	0,45	0,48	0,12	0,35	0,27
	27	0,27	0,28	0,39	0,32	0,35	0,27
	28	0,10	0,28	0,20	0,54	0,35	0,27
	43	0,32	0,40	0,55	0,22	0,35	0,27
	44	0,28	0,40	0,42	0,33	0,35	0,27
	45	0,28	0,40	0,42	0,13	0,35	0,27
46	0,28	0,40	0,42	0,13	0,35	0,27	
47	0,28	0,40	0,42	0,13	0,35	0,27	
48	0,28	0,40	0,42	0,13	0,35	0,27	

Fuente: elaboración propia, a partir de valores del apéndice 27.

Apéndice 29. **Tiempo de fermentación, utilizando 3g de levadura por cada 100mL de hidrolizado**

Porcentaje de enzima (%)	Repetición	Tiempo de fermentación (h)		
		10 % de harina de papa	15 % de harina de papa	Rodajas de papa
0,25	1	3	3	4,5
	2	3	3	4,5
	3	3	3	4,5
0,50	1	3	3	4,5
	2	3	3	4,5
	3	3	3	4,5
1,00	1	3	3	4,5
	2	3	3	4,5
	3	3	3	4,5
1,50	1	3	3	4,5
	2	3	3	4,5
	3	3	3	4,5
1,75	1	3	3	4,5
	2	3	3	4,5
	3	3	3	4,5
2,00	1	3	3	4,5
	2	3	3	4,5
	3	3	3	4,5

Fuente: elaboración propia.

Apéndice 30.

Porcentaje de bioetanol de 10 % de harina de papa

Porcentaje de enzima (%)	Repetición	Densidad	% Bioetanol (%)	\bar{x}	S	CV
0,25	1	0,989	5,5	5,5	0,000	0,00
	2	0,989	5,5			
	3	0,989	5,5			
0,50	1	0,988	6,1	7,0	0,660	9,38
	2	0,986	7,5			
	3	0,986	7,5			
1,00	1	0,982	10,2	10,2	0,000	0,00
	2	0,982	10,2			
	3	0,982	10,2			
1,50	1	0,980	11,7	11,7	0,000	0,00
	2	0,980	11,7			
	3	0,980	11,7			
1,75	1	0,980	11,7	11,7	0,000	0,00
	2	0,980	11,7			
	3	0,980	11,7			
2,00	1	0,980	11,7	11,7	0,000	0,00
	2	0,980	11,7			
	3	0,980	11,7			

Fuente: elaboración propia.

Apéndice 31. **Porcentaje de bioetanol de 15 % de harina de papa**

Porcentaje de enzima (%)	Repetición	Densidad	% Bioetanol (%)	\bar{x}	S	CV
0,25	1	0,989	5,5	5,3	0,283	5,34
	2	0,989	5,5			
	3	0,990	4,9			
0,50	1	0,987	6,8	6,8	0,572	8,41
	2	0,988	6,1			
	3	0,986	7,5			
1,00	1	0,983	9,5	10,0	0,330	3,31
	2	0,982	10,2			
	3	0,982	10,2			
1,50	1	0,981	10,9	10,7	0,330	3,09
	2	0,982	10,2			
	3	0,981	10,9			
1,75	1	0,980	11,7	11,7	0,000	0,00
	2	0,980	11,7			
	3	0,980	11,7			
2,00	1	0,980	11,7	11,7	0,000	0,00
	2	0,980	11,7			
	3	0,980	11,7			

Fuente: elaboración propia.

Apéndice 32. **Porcentaje de bioetanol de 9 % de rodajas de papa**

Porcentaje de enzima (%)	Repetición	Densidad	% Bioetanol (%)	\bar{x}	S	CV
0,25	1	0,986	7,5	7,7	0,283	3,67
	2	0,986	7,5			
	3	0,985	8,1			
0,50	1	0,980	11,7	11,9	0,330	2,77
	2	0,979	12,4			
	3	0,980	11,7			
1,00	1	0,972	17,8	17,8	0,000	0,00
	2	0,972	17,8			
	3	0,972	17,8			
1,50	1	0,971	18,6	18,3	0,377	2,06
	2	0,972	17,8			
	3	0,971	18,6			
1,75	1	0,971	18,6	18,6	0,000	0,00
	2	0,971	18,6			
	3	0,971	18,6			
2,00	1	0,971	18,6	18,3	0,377	2,06
	2	0,972	17,8			
	3	0,971	18,6			

Fuente: elaboración propia.

Apéndice 33. **Análisis de varianza generalizada de la concentración en grados Brix de las soluciones con harina (10 %m/V y 15 %m/V)**

Fuente de variación	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Cuadrados medios	Valor F
Entre muestras (tratamiento)	0,0	1	0,0	0,4
Dentro de muestras (error)	1,4	18	0,1	
Variación total	1,4	19		

Fuente: elaboración propia, a partir de valores de los apéndices 17 y 19.

Apéndice 34. **Análisis de varianza generalizada de la concentración en grados Brix de la solución con harina (15 %m/V) y de la solución con rodajas de papa (9 %m/V)**

Fuente de variación	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Cuadrados medios	Valor F
Entre muestras (tratamiento)	31,5	1	31,5	592,5
Dentro de muestras (error)	1,0	18	0,1	
Variación total	32,5	19		

Fuente: elaboración propia, a partir de valores de los apéndices 19 y 21.

Apéndice 35. **Análisis de varianza generalizada del pH de las soluciones con harina (10 %m/V y 15 %m/V)**

Fuente de variación	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Cuadrados medios	Valor F
Entre muestras (tratamiento)	0,12	1	0,12	17,32
Dentro de muestras (error)	0,12	18	0,01	
Variación total	0,24	19		

Fuente: elaboración propia, a partir de valores de los apéndices 23 y 25.

Apéndice 36. **Análisis de varianza generalizada del pH de la solución con harina (15 %m/V) y de la solución con rodajas de papa (9 %m/V)**

Fuente de variación	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Cuadrados medios	Valor F
Entre muestras (tratamiento)	0,39	1	0,39	234,70
Dentro de muestras (error)	0,03	18	0,00	
Variación total	0,42	19		

Fuente: elaboración propia, a partir de valores de los apéndices 25 y 27.

Apéndice 37. **Análisis de varianza generalizada del bioetanol obtenido de las soluciones con harina (10 %m/V y 15 %m/V)**

Fuente de variación	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Cuadrados medios	Valor F
Entre muestras (tratamiento)	0,2	1	0,2	1,0
Dentro de muestras (error)	0,7	4	0,2	
Variación total	0,8	5		

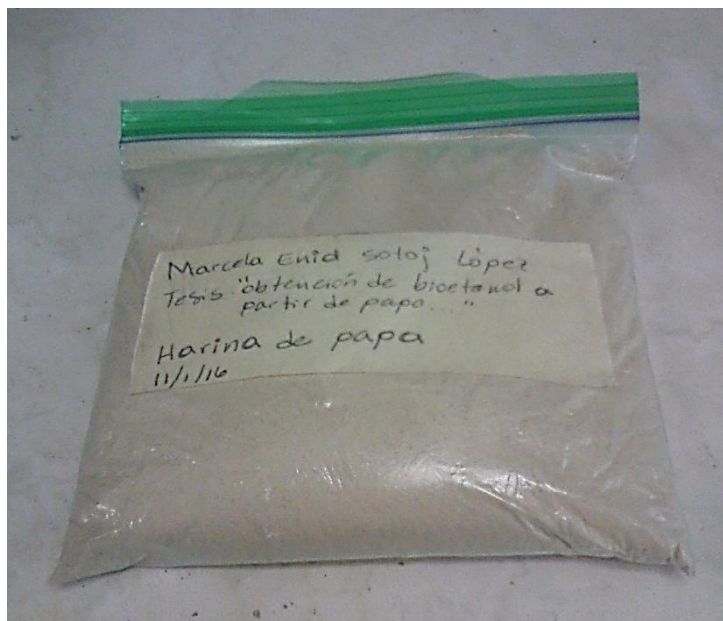
Fuente: elaboración propia, a partir de valores de los apéndices 30 y 31.

Apéndice 38. **Análisis de varianza generalizada del bioetanol obtenido de la solución con harina (15 %m/V) y de la solución con rodajas de papa (9 %m/V)**

Fuente de variación	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Cuadrados medios	Valor F
Entre muestras (tratamiento)	74,2	1	74,2	408,4
Dentro de muestras (error)	0,7	4	0,2	
Variación total	74,9	5		

Fuente: elaboración propia, a partir de valores de los apéndices 31 y 32.

Apéndice 39. **Fotografías de la harina de papa**



Fuente: Laboratorio Área de Química, Escuela de Ingeniería Química, Facultad de Ingeniería, Universidad de San Carlos de Guatemala.

Apéndice 40. **Fotografía de las papas utilizadas**



Fuente: Laboratorio Área de Química, Escuela de Ingeniería Química, Facultad de Ingeniería, Universidad de San Carlos de Guatemala.

Apéndice 41. **Fotografía de la gelatinización de las rodajas de papa**



Fuente: Laboratorio Área de Química, Escuela de Ingeniería Química, Facultad de Ingeniería, Universidad de San Carlos de Guatemala.

Apéndice 42.

Fotografías de la gelatinización de la harina de papa



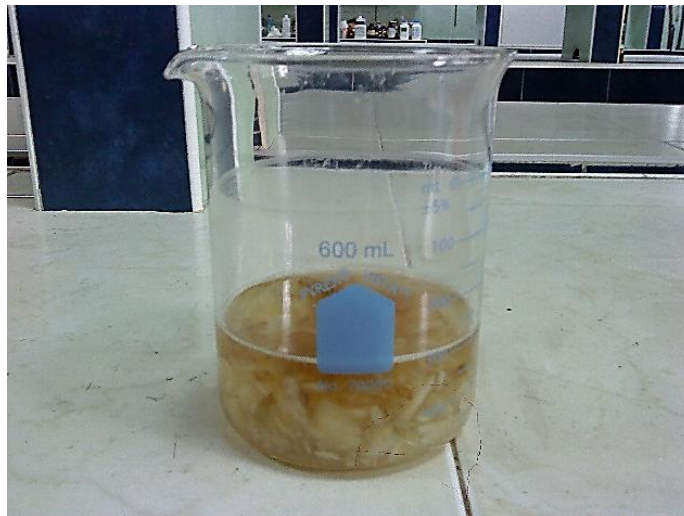
Fuente: Laboratorio Área de Química, Escuela de Ingeniería Química, Facultad de Ingeniería, Universidad de San Carlos de Guatemala.

Apéndice 43. **Fotografías de la hidrólisis de la harina de papa**



Fuente: Laboratorio Área de Química, Escuela de Ingeniería Química, Facultad de Ingeniería, Universidad de San Carlos de Guatemala.

Apéndice 44. **Fotografía de la hidrólisis de las rodajas de papa**



Fuente: Laboratorio Área de Química, Escuela de Ingeniería Química, Facultad de Ingeniería, Universidad de San Carlos de Guatemala.

Apéndice 45. **Fotografía de la enzima amilasa**



Fuente: Laboratorio Área de Química, Escuela de Ingeniería Química, Facultad de Ingeniería, Universidad de San Carlos de Guatemala.

Apéndice 46. **Fotografía de la prueba de almidón antes de la hidrólisis**



Fuente: Laboratorio Área de Química, Escuela de Ingeniería Química, Facultad de Ingeniería, Universidad de San Carlos de Guatemala.

Apéndice 47. **Fotografía de la prueba de almidón después de la hidrólisis**



Fuente: Laboratorio Área de Química, Escuela de Ingeniería Química, Facultad de Ingeniería, Universidad de San Carlos de Guatemala.

Apéndice 48. **Fotografía de la fermentación**



Fuente: Laboratorio Área de Química, Escuela de Ingeniería Química, Facultad de Ingeniería, Universidad de San Carlos de Guatemala.

Apéndice 49. **Fotografía de la levadura (*Saccharomyces cerevisiae*)**



Fuente: Laboratorio Área de Química, Escuela de Ingeniería Química, Facultad de Ingeniería, Universidad de San Carlos de Guatemala.

Apéndice 50. **Fotografía de la prueba de Fehling para la harina, antes de la fermentación**



Fuente: Laboratorio Área de Química, Escuela de Ingeniería Química, Facultad de Ingeniería, Universidad de San Carlos de Guatemala.

Apéndice 51. **Fotografía de la prueba de Fehling para solución de rodajas de papa, antes de la fermentación**



Fuente: Laboratorio Área de Química, Escuela de Ingeniería Química, Facultad de Ingeniería, Universidad de San Carlos de Guatemala.

Apéndice 52.
fermentación

Fotografía de la prueba de Fehling después de la



Fuente: Laboratorio Área de Química, Escuela de Ingeniería Química, Facultad de Ingeniería,
Universidad de San Carlos de Guatemala.

Apéndice 53.

Fotografía del filtrado



Fuente: Laboratorio Área de Química, Escuela de Ingeniería Química, Facultad de Ingeniería,
Universidad de San Carlos de Guatemala.

Apéndice 54. **Fotografía del destilado**



Fuente: Laboratorio Área de Química, Escuela de Ingeniería Química, Facultad de Ingeniería,
Universidad de San Carlos de Guatemala.

Apéndice 55. **Fotografía de la prueba de sodio**



Fuente: Laboratorio Área de Química, Escuela de Ingeniería Química, Facultad de Ingeniería,
Universidad de San Carlos de Guatemala.

Apéndice 56. **Fotografía del sodio para la prueba de sodio**



Fuente: Laboratorio Área de Química, Escuela de Ingeniería Química, Facultad de Ingeniería, Universidad de San Carlos de Guatemala.

Apéndice 57. **Fotografía de la medición de la concentración en grados Brix**



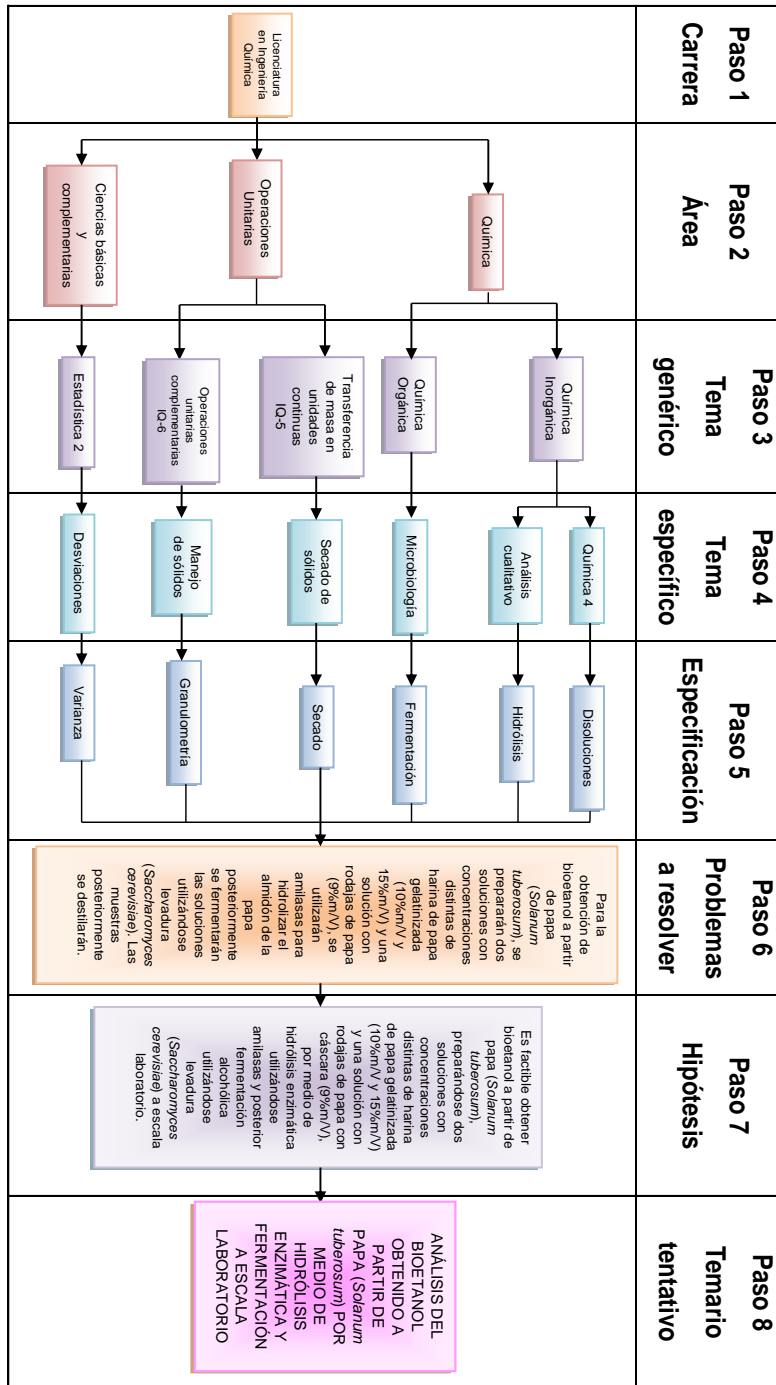
Fuente: Laboratorio Área de Química, Escuela de Ingeniería Química, Facultad de Ingeniería, Universidad de San Carlos de Guatemala.

Apéndice 58. **Fotografía de la medición de pH**



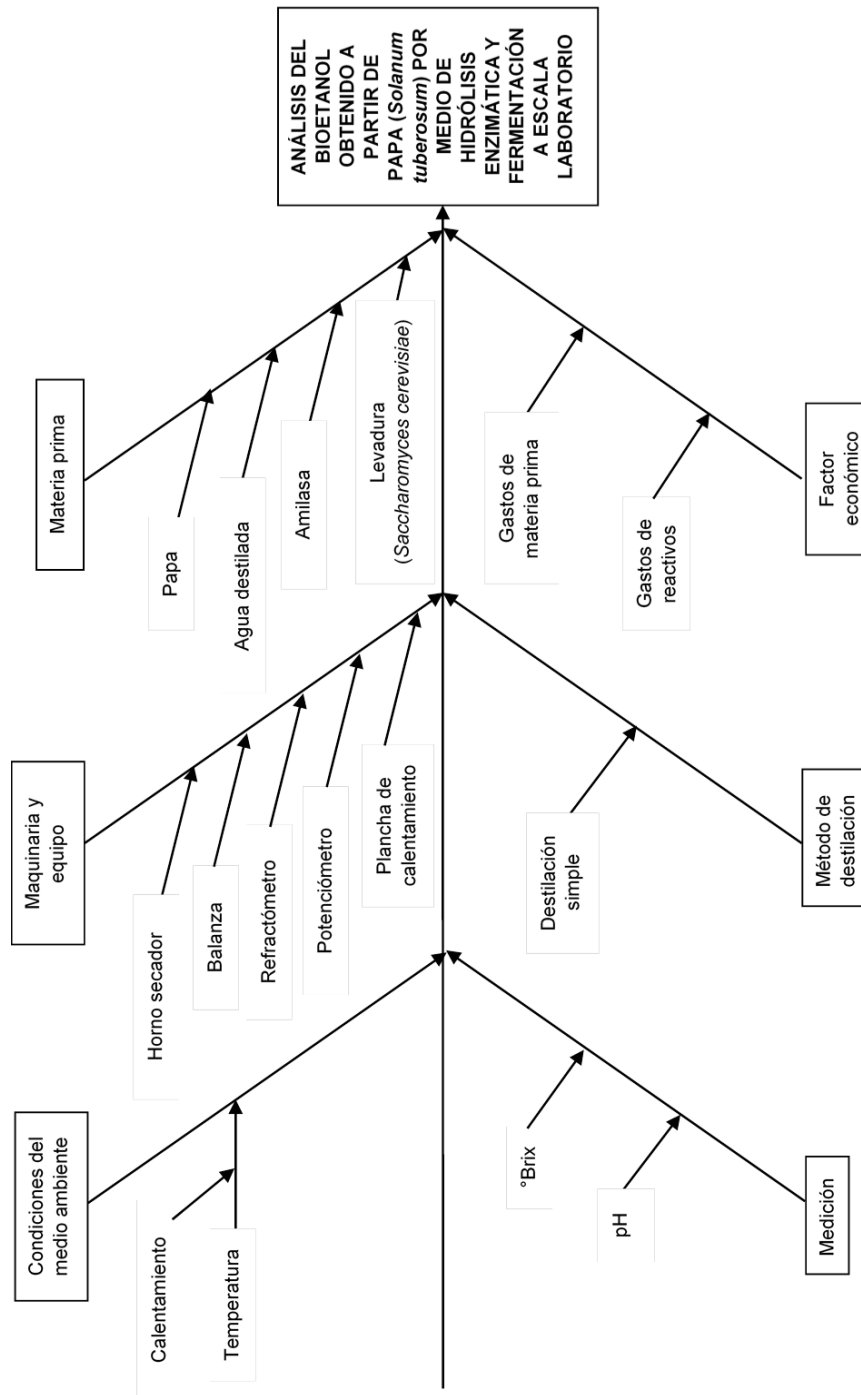
Fuente: Laboratorio Área de Química, Escuela de Ingeniería Química, Facultad de Ingeniería, Universidad de San Carlos de Guatemala.

Apéndice 59. Requisitos académicos



Fuente: elaboración propia.

Apéndice 60. Diagrama de Ishikawa



Fuente: elaboración propia.

ANEXOS

Anexo 1. Densidades de mezclas de C₂H₅OH y H₂O a 20°C

% de alcohol en peso	Décimas de %									
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
0	0,99823	804	785	766	748	729	710	692	673	655
1	636	618	599	581	562	544	525	507	489	471
2	453	435	417	399	381	363	345	327	310	292
3	275	257	240	222	205	188	171	154	137	120
4	103	087	070	053	037	020	003	*987	*971	*954
5	0,98938	922	906	890	874	859	843	827	811	796
6	780	765	749	734	718	703	688	673	658	642
7	627	612	597	582	567	553	538	523	508	493
8	478	463	449	434	419	404	389	374	360	345
9	331	316	301	287	273	258	244	229	215	201
10	187	172	158	144	130	117	103	089	075	061
11	047	033	019	006	*992	*978	*964	*951	*937	*923
12	0,97910	896	883	869	855	842	828	815	801	788
13	775	761	748	735	722	709	696	683	670	657
14	643	630	617	604	591	578	565	552	539	526
15	514	501	488	475	462	450	438	425	412	400
16	387	374	361	349	336	323	310	297	284	272
17	259	246	233	220	207	194	181	168	155	142
18	129	116	103	089	076	063	050	037	024	010
19	0,96997	984	971	957	944	931	917	904	891	877

Fuente: PERRY, Robert H. y GREEN, Don W. *Manual del Ingeniero Químico*. p 2-120.

