



Universidad de San Carlos de Guatemala

Facultad de Ingeniería

Escuela de Ingeniería Química

EVALUACIÓN DE RESIDUALES DE ACEITE CRUDO DE PALMA EN FIBRA FINA DE PALMA ACEITERA (*Elaies guineensis*, VARIEDAD IRHO) PROVENIENTES DEL PROCESO DE EXTRACCIÓN MECÁNICA MEDIANTE EL USO DE COADYUVANTE ENZIMÁTICO DEL TIPO DE GLUCOSIDASA (CARBOHIDRASA) REALIZADA A NIVEL LABORATORIO

Erick Gustavo Girón Beherens

Asesorado por el Ing. Ronal Adolfo Herrera Orozco

Guatemala, febrero de 2017

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

EVALUACIÓN DE RESIDUALES DE ACEITE CRUDO DE PALMA EN FIBRA FINA DE PALMA ACEITERA (*Elaies guineensis*, VARIEDAD IRHO) PROVENIENTES DEL PROCESO DE EXTRACCIÓN MECÁNICA MEDIANTE EL USO DE COADYUVANTE ENZIMÁTICO DEL TIPO DE GLUCOSIDASA (CARBOHIDRASA) REALIZADA A NIVEL LABORATORIO

TRABAJO DE GRADUACIÓN

PRESENTADO A LA JUNTA DIRECTIVA DE LA
FACULTAD DE INGENIERÍA
POR

ERICK GUSTAVO GIRÓN BEHERENS

ASESORADO POR EL ING. RONAL ADOLFO HERRERA OROZCO

AL CONFERÍRSELE EL TÍTULO DE

INGENIERO QUÍMICO

GUATEMALA, FEBRERO DE 2017

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. Jurgen Andoni Ramírez Ramírez
VOCAL V	Br. Oscar Humberto Galicia Nuñez
SECRETARIA	Inga. Lesbia Magalí Herrera López

TRIBUNAL QUE PRACTICÓ EL EXAMEN GENERAL PRIVADO

DECANO	Ing. Murphy Olympo Paiz Recinos
EXAMINADOR	Ing. Jorge Emilio Godínez Lemus
EXAMINADOR	Ing. Jorge Mario Estrada Asturias
EXAMINADOR	Ing. Víctor Manuel Monzón Valdez
SECRETARIO	Ing. Hugo Humberto Rivera Pérez

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:

EVALUACIÓN DE RESIDUALES DE ACEITE CRUDO DE PALMA EN FIBRA FINA DE PALMA ACEITERA (*Elaeis guineensis*, VARIEDAD IRHO) PROVENIENTES DEL PROCESO DE EXTRACCIÓN MECÁNICA MEDIANTE EL USO DE COADYUVANTE ENZIMÁTICO DEL TIPO DE GLUCOSIDASA (CARBOHIDRASA) REALIZADA A NIVEL LABORATORIO

Tema que me fuera asignado por la Dirección de la Escuela de Ingeniería Química, con fecha 13 de abril de 2015.

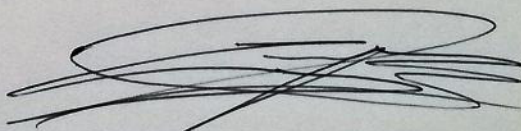
Erick Gustavo Girón Beherens

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:

EVALUACIÓN DE RESIDUALES DE ACEITE CRUDO DE PALMA EN FIBRA FINA DE PALMA ACEITERA (*Elaies guineensis*, VARIEDAD IRHO) PROVENIENTES DEL PROCESO DE EXTRACCIÓN MECÁNICA MEDIANTE EL USO DE COADYUVANTE ENZIMÁTICO DEL TIPO DE GLUCOSIDASA (CARBOHIDRASA) REALIZADA A NIVEL LABORATORIO

Tema que me fuera asignado por la Dirección de la Escuela de Ingeniería Química, con fecha 13 de abril de 2015.



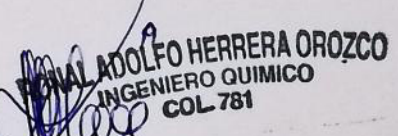
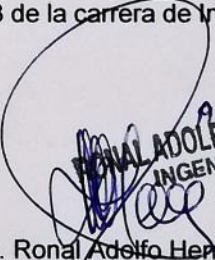
Erick Gustavo Girón Beherens

Guatemala, 6 de octubre del 2016

Ingeniero Químico
Carlos Salvador Wong Davi
Director de Escuela de Ingeniería Química
Facultad de Ingeniería
Universidad de San Carlos de Guatemala

Le saludo cordialmente, por medio de la presente le informo que apruebo el informe final de trabajo de graduación titulado "EVALUACIÓN DE RESIDUALES DE ACEITE CRUDO DE PALMA EN FIBRA FINA DE PALMA ACEITERA (*Elaeis guineensis*, VARIEDAD IRHO) PROVENIENTES DEL PROCESO DE EXTRACCIÓN MECÁNICA MEDIANTE EL USO DE COADYUVANTE ENZIMÁTICO DEL TIPO DE GLUCOSIDASA (CARBOHIDRASA) REALIZADA A NIVEL LABORATORIO" elaborado por el estudiante Erick Gustavo Girón Beherens quién se identifica con el carnet No. 2001-12913 de la carrera de Ingeniería Química.

Atentamente



Ing. Qco. Ronald Adolfo Herrera Orozco
Colegiado No. 781



Guatemala, 21 de noviembre de 2016.
Ref. EIQ.TG-IF.069.2016.

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 **081-2015** 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 el estudiante universitario: **Erick Gustavo Girón Beherens**.
Identificado con número de carné: **2001-12913**.
Previo a optar al título de **INGENIERO QUÍMICO**.

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:

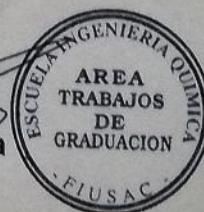
EVALUACIÓN DE RESIDUALES DE ACEITE CRUDO DE PALMA EN FIBRA FINA DE PALMA ACEITERA (*Elaeis guineensis*, VARIEDAD IRHO) PROVENIENTES DEL PROCESO DE EXTRACCIÓN MECÁNICA MEDIANTE EL USO DE COADYUVANTE ENZIMÁTICO DEL TIPO DE GLUCOSIDASA (CARBOHIDRASA) REALIZADA A NIVEL LABORATORIO

El Trabajo de Graduación ha sido asesorado por el Ingeniero Químico: **Ronal Adolfo Herrera Orozco**.

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 ENSEÑADA A TODOS"

Ing. César Alfonso García Guerra
COORDINADOR DE TERNA
Tribunal de Revisión
Trabajo de Graduación



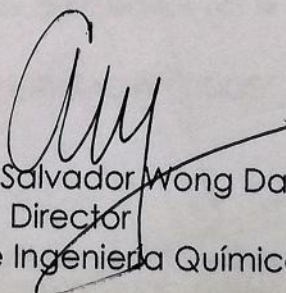
C.c.: archivo



Ref.EIQ.TG.003.2017

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, **ERICK GUSTAVO GIRÓN BEHERENS** titulado: **"EVALUACIÓN DE RESIDUALES DE ACEITE CRUDO DE PALMA EN FIBRA FINA DE PALMA ACEITERA (*Elaeis guineensis*, VARIEDAD IRHO) PROVENIENTES DEL PROCESO DE EXTRACCIÓN MECÁNICA MEDIANTE EL USO DE COADYUVANTE ENZIMÁTICO DEL TIPO DE GLUCOSIDASA (CARBOHIDRASA) REALIZADA A NIVEL 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, febrero 2017

Cc: Archivo
CSWD/ale

Universidad de San Carlos
de Guatemala

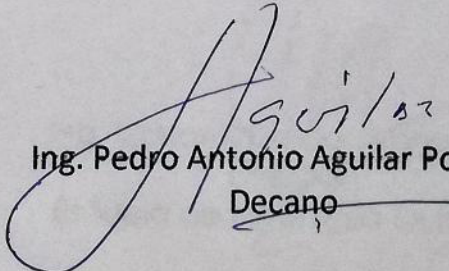


Facultad de Ingeniería
Decanato

DTG. 080.2017

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: **EVALUACIÓN DE RESIDUALES DE ACEITE CRUDO DE PALMA EN FIBRA FINA DE PALMA ACEITERA (*Elaeis guineensis*, VARIEDAD IRHO) PROVENIENTES DEL PROCESO DE EXTRACCIÓN MECÁNICA MEDIANTE EL USO DE COADYUVANTE ENZIMÁTICO DEL TIPO DE GLUCOSIDASA (CARBOHIDRASA) REALIZADA A NIVEL LABORATORIO**, presentado por el estudiante universitario: **Erick Gustavo Girón Beherens**, 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, febrero de 2017

/gdech

ACTO QUE DEDICO A:

Trinidad Divina	Dios Padre por tu inmenso amor, Jesucristo por tu entrega incondicional, Espíritu Santo por tu inspiración.
Mis padres	Por su amor trascendental, apoyo, educación y porque constantemente han creído en mí.
Mis hermanos	Les amo con todo el corazón.
Mi esposa	Por su alegría de vivir; Ame, eres el amor de mi vida.
Mi bebé	Por ser la Victoria de un amor invencible.
Mis abuelos	Por sus consejos, cuidados y cariño.
Mi tía Olga	Por amarme como a un hijo.
Mis primos	Fernando, Luis Abad, Raizha Reyes por su apoyo y cariño, Osman te llevamos en nuestros corazones.
Mis amigos	Por su apoyo y ánimo, por permitirme ser su amigo.

AGRADECIMIENTOS A:

**Universidad de San
Carlos de Guatemala**

Por brindarme los conocimientos necesarios para mi formación profesional, “Id y enseñad a todos”

Ing. Ronal Herrera

Por su confianza y motivación.

**Ing. Alexander
Gómez**

Por darme la oportunidad, guiarme y asesorarme para crecer profesionalmente.

**Equipo de
Aseguramiento de la
Calidad REPSA**

Por el apoyo de sus miembros para elaborar la investigación.

**Hemm-Tech
Guatemala**

Por el apoyo y confianza brindados especialmente por los ingenieros Efrén Menchú y Karina Paredes.

**Agroindustrias
HAME**

Por permitirme llevar a cabo la investigación en sus instalaciones.

ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES	V
LISTA DE SÍMBOLOS	VII
GLOSARIO	IX
RESUMEN	XV
OBJETIVOS.....	XVII
Hipótesis	XVIII
INTRODUCCIÓN	XIX
1. ANTECEDENTES	1
1.1. Experimentos de diseño por parte de empresas fabricantes	1
1.2. Tesis realizada en 2013 por Florencia Verónica Grasso	3
2. MARCO TEÓRICO.....	5
2.1. Palma aceitera.....	5
2.2. Aceites vegetales.....	7
2.3. Aceite crudo de palma	7
2.4. Extracción del aceite crudo de palma africana	8
2.5. Enzimología.....	11
2.6. Especificidad.....	12
2.7. Nomenclatura	13
2.8. Inactivación, inhibición y antienzimas	13
2.9. Enzimas como proteínas	14
2.10. Formación y acción de las enzimas.....	16
2.11. Clasificación de enzimas	18
2.11.1. Enzimas oxidorreductasas.....	18

2.11.2.	Enzimas transferasas	19
2.11.3.	Enzimas hidrolasas	20
2.11.4.	Enzimas liasas	20
2.11.5.	Enzimas isomerasas	20
2.11.6.	Enzimas ligasas	21
2.12.	Enzimas industriales	21
2.12.1.	Características generales de las enzimas industriales	23
2.12.2.	Unidades de actividad	23
2.12.3.	Influencia del pH.....	24
2.12.4.	Temperatura	26
2.12.5.	Concentración enzimática y tiempo de reacción	28
2.12.6.	Inhibición y activación de las enzimas.....	29
3.	DISEÑO METODOLÓGICO.....	33
3.1.	Variables	33
3.1.1.	Variables independientes	33
3.1.2.	Variable dependiente.....	34
3.2.	Delimitación de campo de estudio.....	34
3.3.	Recursos humanos disponibles.....	34
3.4.	Recursos materiales disponibles.....	35
3.4.1.	Cristalería y equipo.....	35
3.4.1.1.	Instrumentos de medición	35
3.4.1.2.	Equipo auxiliar.....	35
3.4.1.3.	Materiales diversos.....	35
3.4.1.4.	Cristalería.....	36
3.4.2.	Reactivos y materia prima	36
3.5.	Técnica cuantitativa.....	36
3.5.1.	Diagrama de flujo de la técnica cuantitativa	37

3.5.2.	Diagrama de flujo del proceso de extracción de aceite crudo de palma aceitera utilizado para la investigación.....	38
3.6.	Recolección y ordenamiento de la información	39
3.7.	Tabulación, ordenamiento y procesamiento de la información..	40
3.7.1.	Residual de aceite crudo de palma en fibra fina	40
3.8.	Análisis estadístico	40
4.	RESULTADOS	43
5.	INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS.....	51
	CONCLUSIONES	53
	RECOMENDACIONES.....	55
	BIBLIOGRAFÍA.....	57
	APÉNDICES	59

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

FIGURAS

1.	Estructura del fruto de palma aceitera.....	6
2.	Fibra fina de palma aceitera.....	6
3.	Fruta de palma.....	9
4.	Esterilización de fruta.....	9
5.	Interior de un digestor fruta palma.....	10
6.	Prensa mecánica de doble tornillo con contrapresión.....	10
7.	Curvas de actividad de un preparado de α -amilasa bacteriana en función del pH.....	25
8.	Comparación de las curvas de actividad y temperatura para tiempos de reacción de una hora y de dieciocho horas.....	27
9.	Temperatura de inactivación para la poligalacturonasa y la pectinesterasa de un preparado enzimático comercial.....	28
10.	Diagrama de Shewhart de resultados de residuales de aceite crudo de palma en fibra fina procedente del proceso extractivo mecánico-convencional.....	45
11.	Diagrama de Shewhart de resultados de residuales de aceite crudo de palma en fibra fina procedente del proceso extractivo mecánico-hidrolítico.....	46
12.	Comparación de diagrama de Shewhart de resultados de residuales de aceite crudo de palma en fibra fina procedente del proceso extractivo mecánico-convencional y del proceso extractivo mecánico-hidrolítico.....	47

13. Diagrama de distribución normal de resultados de residuales de aceite crudo de palma en fibra fina procedente del proceso extractivo mecánico-convencional y del proceso extractivo mecánico-hidrolítico. 48

TABLAS

I.	Formato para recolección de datos para calcular el residual de aceite crudo de palma en fibra fina	40
II.	Contenido de aceite residual en fibra fina de palma procedente del proceso extractivo mecánico-convencional y del proceso extractivo mecánico-hidrolítico	43
III.	Diferencia entre residuales de aceite crudo de palma en fibra fina procedente del proceso extractivo mecánico-convencional y del proceso extractivo mecánico-hidrolítico	44
IV.	Resultados de análisis estadísticos	49

LISTA DE SÍMBOLOS

Símbolo	Significado
°C	Grados Celsius
%	Por ciento
#	Número
α	Alfa
F	Valor de prueba para un análisis de varianzas. Su nombre viene de Fisher-Snedecor.
g	Gramo
h	Hora
kg	Kilogramo
mL	Mililitro
mm	Milímetro
No.	Número
pH	Coeficiente que indica el grado de acidez o basicidad de una solución acuosa.
s	Segundo
t	Valor de prueba para el análisis estadístico usando la distribución de Student.

GLOSARIO

α-amilasa	Enzima cuyo EC es 3.2.1.1 que cataliza la hidrólisis de los enlaces alfa-glucosídicos, de los polisacáridos alfa glucosídicos de alto peso molecular liberando glucosa y maltosa.
ACP	Aceite crudo de palma.
Anova	ANalysis Of VAriance traducido al español: análisis de varianza. Es un método estadístico.
Antienzimas	Sustancias inactivadoras.
Apoenzima	Enzima inactiva.
Biomasa	Materia orgánica susceptible de ser aprovechada energéticamente.
Carbohidrasa	Enzima que cataliza la hidrólisis de los carbohidratos superiores, para convertirlos en azúcares simples.
CAS	Chemical Abstracts Service, traducido al español: servicio de sustancias químicas. El número de registro CAS es una identificación numérica única

para compuestos químicos.

Celulasa	Enzima que degrada la celulosa en glucosa.
Coadyuvante	Sustancia que se añade a un proceso para acelerarlo.
Coenzima	Molécula orgánica que se requiere junto con la enzima para catalizar una reacción bioquímica.
Glucoamilasa	También conocida como amiloglucosidasa, es un tipo de enzima digestiva que desprende una molécula de glucosa de las cadenas formadas a partir de azúcares complejos que forman el almidón o de un azúcar más simple como la maltosa.
Glucósidas o glucósido hidrolasas	Enzimas que catalizan la hidrólisis de enlaces glucosídicos para generar glúcidos menores.
Desnaturalización	Estado de la molécula en que ya no posee una estructura nativa, es decir ninguna estructura tridimensional fija.
EC	Enzyme Clasification, traducido al español: clasificación de enzimas. Es una identificación numérica usada para la nomenclatura de enzimas.
Enzima	Proteína que favorece y regula las reacciones

químicas en los seres vivos.

Expandido	Parte del proceso de extracción de aceite de soja en que la soja es calentada a vapor.
Hemicelulasa	Es una enzima que hidroliza la hemicelulosa.
Hidrolizado	Sustancia que ha sido separada en sus partes constituyentes por acción del agua, algún ácido o de un fermento.
Holoenzima	Enzima activa.
Inhibición	Supresión parcial de la actividad enzimática mediante un proceso que no se encamina a la destrucción de la enzima.
Inactivación	Supresión de la actividad enzimática que puede ser parcial o total, reversible o irreversible.
Laminado	Parte del proceso de extracción de aceite de soja que consiste en pasar el grano de soja por laminadoras para facilitar el proceso de extracción.
Mesocarpio	En los frutos, es la capa intermedia del pericarpio, que es la parte carnosa de los frutos. Se le suele llamar pulpa.
Estearina	Fracción sólida del aceite de palma.

Oleína	Fracción líquida del aceite de palma.
Pectinasa	Enzima capaz de separar grupos pectinos (sustratos de polisacáridos encontrados en la pared celular de las plantas).
Pectinesterasa	Enzima asociada a la pared celular que facilita la modificación de la pared celular de la planta y su subsiguiente descomposición.
Poligalacturonasa	Enzima hidrolasa que degrada la pared celular presente en microorganismos y vegetales superiores.
POP	Triglicérido cuya nomenclatura es 1-palmitoil-2-oleoil-3-estearoilglicerol.
POO	Triglicérido cuya nomenclatura es 1-palmitoil-2,3-dioleoil-sn-glicerol.
Proteasa	Enzima que rompe los enlaces de las proteínas.
Raquis	Tallo del fruto de la palma aceitera.
Refinar	Procesos que buscan eliminar ácidos grasos, gomas, compuestos volátiles y otros contaminantes del aceite.

Soluto	Sustancia que se disuelve.
Solvente	Sustancia que disuelve al soluto.
Substrato	Sustancia química sobre la que actúa una enzima.

RESUMEN

La investigación fue realizada debido a que actualmente se desconoce si las enzimas glucosidasas son efectivas para disminuir las pérdidas de aceite crudo de palma utilizando las condiciones de producción reales nacionales.

A través de pruebas a escala laboratorio se validó la hipótesis alternativa que planteó lo siguiente: el porcentaje de aceite crudo de palma residual en la fibra fina al añadir enzimas glucosidasas al proceso de digestión de fruta de palma aceitera, manteniendo constantes el tiempo, la temperatura y la concentración de enzimas glucosidasas, es menor que el residual sin añadir enzimas al proceso.

Al realizar las pruebas se evaluó la efectividad de las enzimas y se determinó que la diferencia entre el proceso mecánico-convencional mecánico y el proceso alternativo mecánico-hidrolítico es significativa.

OBJETIVOS

General

Evaluar la efectividad del proceso de extracción mecánico-hidrolítico al añadir enzimas glucosidasas al proceso de extracción mecánico-convencional de aceite crudo de palma (*Elaies guineensis*, variedad IRHO) en base al análisis de aceite residual extraído mediante técnica de extracción sólido-líquido tipo Soxleth a nivel laboratorio.

Específicos

1. Determinar el rendimiento de extracción en prensa mecánica de aceite residual en fibra fina de palma utilizando técnica de extracción sólido-líquido tipo Soxleth.
2. Comparar el contenido de aceite residual en fibra fina tratada enzimáticamente en relación al contenido de aceite residual en fibra fina no tratada mediante técnica de extracción sólido-líquido tipo Soxleth.
3. Evaluar la diferencia significativa entre los rendimientos de extracción mecánico-hidrolítico y mecánico-convencional en relación a los contenidos de aceite residual obtenidos mediante técnica Soxleth.

Hipótesis

Hipótesis nula

No es posible mejorar la recuperación de aceite residual en fibra fina proveniente del proceso mecánico-convencional de digestión de fruta de palma aceitera al añadirle enzimas glucosidasas como coadyuvante a nivel laboratorio.

Hipótesis alternativa

Es posible mejorar la recuperación de aceite residual en fibra fina proveniente del proceso mecánico-convencional de digestión de fruta de palma aceitera al añadirle enzimas glucosidasas como coadyuvante a nivel laboratorio.

INTRODUCCIÓN

Durante los últimos treinta años se ha incrementado el cultivo de palma aceitera en Guatemala, de igual manera, las industrias extractoras de aceite crudo de palma aceitera se han aumentado y, a la vez, optimizando sus procesos de extracción.

El fruto de la palma aceitera tiene un porcentaje promedio de fracción lipídica del 22 %, lo cual indica que por cada tonelada métrica procesada de fruta de palma aceitera se obtienen teóricamente 0,22 toneladas métricas de aceite crudo de palma (ACP). Sin embargo, este porcentaje tiende a ser menor debido a la pérdida de ACP durante el proceso de extracción mecánica.

Las empresas extractoras buscan diariamente reducir los porcentajes de pérdida de ACP realizando mantenimientos correctivos y preventivos o mediante operaciones mecánicas como el incremento en el tiempo de cocción de la fruta o aumentando la contrapresión en las prensas mecánicas, pese a ello, no siempre se logra alcanzar este objetivo pues atrasa la velocidad de producción e incrementa los costos de operación, por lo que no es viable realizar estas modificaciones frecuentemente.

El presente trabajo de graduación tiene como objetivo general evaluar el efecto de añadir enzimas glucosidasas al proceso de extracción mecánica de aceite crudo de palma. Las enzimas por utilizar (Celulasas EC 3.2.1.4 CAS 9012-54-8) tienen como función principal degradar la celulosa del fruto de la palma minimizando el esfuerzo mecánico empleado para extraer el aceite durante el proceso de extracción.

Debido a que no fue posible realizar pruebas a escala industrial sin comprometer el producto final, se evaluó a escala laboratorio utilizando una cantidad menor de materia prima y adecuando la investigación a los tiempos y temperaturas normales del proceso industrial. La eficiencia de las enzimas fue reflejada en la disminución en las pérdidas de ACP en la fibra fina obtenida y en el incremento del porcentaje de extracción.

Los resultados obtenidos se compararon y se comprobó la hipótesis alternativa del trabajo de graduación: el porcentaje de aceite crudo de palma residual en la fibra fina al añadir enzimas glucosidasas al proceso de digestión de fruta de palma aceitera, manteniendo constantes el tiempo, la temperatura y la concentración de enzimas glucosidasas, es menor que el residual sin añadir enzimas al proceso.

1. ANTECEDENTES

1.1. Experimentos de diseño por parte de empresas fabricantes

Debido a la creciente demanda de ACP y sus derivados, la empresa HEMMTECH ha realizado experimentos en condiciones de laboratorio que no coinciden con los procesos de extracción utilizados en la industria guatemalteca como el que a continuación se describe:

- El experimento se realizó obteniendo dos muestras de 140 gramos de fruta cruda, de estas muestras, una se utiliza como muestra control y a la otra se le aplicó la enzima que va a ser evaluada, cada muestra fue sometida a cocimiento durante 90 minutos a una temperatura de 146 °C. Al salir del cocimiento se introdujeron a un mezclador para iniciar la digestión de fruta de palma aceitera. A la muestra control se le agregó únicamente 140 mililitros de agua y se mantiene la digestión a 55°C durante 2 horas; a la muestra de prueba se le agregaron 140 mililitros de agua que contenía la enzima¹ incubando a una temperatura de 55°C durante 2 horas.
- Al cumplirse el tiempo de digestión se aumentó la temperatura, en ambas muestras, a 90°C durante 10 minutos, con el objetivo de anular el efecto de la enzima en la muestra de prueba.

¹El proveedor recomienda utilizar una concentración 1 % peso/volumen

- La mezcla se sometió a filtración, de lo cual se obtienen dos fases, líquida y sólida. La fase líquida se centrifugó manteniendo la temperatura a 90°C obteniendo sedimentos, aceite crudo de palma y una capa líquida compuesta de lodos y agua. Los sedimentos se sometieron a lavado con agua caliente y centrifugado para extraer lo último de aceite que quedó en ellos.

La fase sólida, obtenida de la primera filtración, está compuesta por fibra y semillas las cuales se someten a lavado con agua caliente y centrifugado para extraer lo último de aceite que quede contenido en la sección extracelular, tanto de la fibra como de las semillas, lo cual se suma al producto obtenido de la fase líquida.

El resultado de la muestra de control es una extracción de entre 14,5 % a 21,4 % de aceite crudo de palma en relación al racimo de fruto fresco; en la muestra tratada se obtuvo una extracción de entre 28,9 % a 38,0 % de aceite crudo de palma en relación al racimo de fruto fresco. En base a los resultados se pudo concluir que el tratamiento utilizando la celulasa otorga una mejora de 11,75 % a la extracción de aceite crudo de palma, entre sus conclusiones se encuentra ajustar el procedimiento a procesos industriales para obtener resultados acordes con el proceso real.

1.2. Tesis realizada en 2013 por Florencia Verónica Grasso

En esta tesis presentada para obtener el grado de doctor en Ingeniería en el departamento de Ingeniería Química de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Nacional de la Plata, titulada *Diseño del proceso: pre-tratamiento enzimático para extracción de aceites vegetales en un extractor de columna* se realizó la exploración y el estudio de un tratamiento enzimático en semillas de soja, previo a la extracción del aceite, con el fin de mejorar el rendimiento de extracción.

Para ello se emplearon sólidos de soja con distinto grado de preparación, seleccionando las condiciones óptimas de pH, tiempo y temperatura de incubación y combinación de actividades enzimáticas, para maximizar el rendimiento de la extracción de aceite. Se evaluó la influencia del tratamiento enzimático sobre el transporte difusivo que ocurre durante la extracción del aceite, determinando experimentalmente coeficientes de difusión para cada sólido.

El pretratamiento enzimático para alcanzar el máximo rendimiento de aceite se obtuvo por incubación con una mezcla enzimática de celulasa, proteasa neutra, α -amilasa, pectinasa, hemicelulasa y glucoamilasa. La calidad del aceite obtenido fue similar a la obtenida para un aceite de soja crudo, sin refinar. La optimización de variables determinó incubación a pH 5,4 y 38 °C durante 9,7 h para laminado de soja y a pH 5,8 y 43,5 °C durante 5,8 h para expandido de soja. Se obtuvieron rendimientos de aceite mayores: 27,59 % y 26,64 % para laminado y expandido hidrolizados, respectivamente.

En conclusión, la incubación enzimática podría emplearse como pre-tratamiento antes de la extracción para aumentar el rendimiento en aceite, obtener mayores velocidades de extracción y/o emplear menores cantidades de solvente.

2. MARCO TEÓRICO

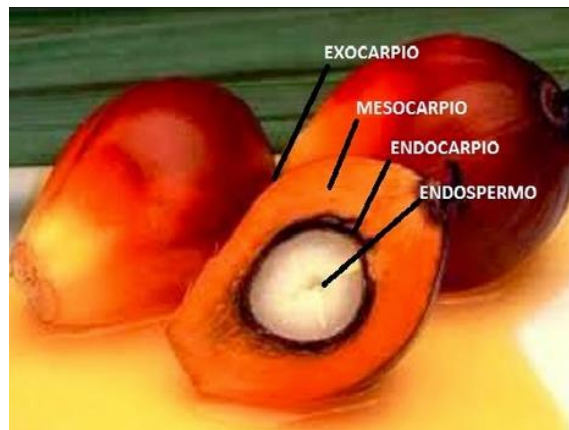
2.1. Palma aceitera

La palma africana (*Elaies guineensis*) crece en las regiones tropicales de Asia, África y recientemente en la zona tropical de América, las condiciones ideales incluyen regiones con más de 1 000 mm de lluvia anual, 2 000 h de luz solar anual y un clima moderado entre los 25 °C y 33 °C. Los principales productores mundiales son Malasia e Indonesia, en Guatemala se comenzó el cultivo de palma aceitera durante la década de 1980 llegando a ser uno de los principales cultivos del país y una parte importante del producto interno bruto nacional.

Actualmente, se producen en promedio 24 toneladas métricas de fruto fresco de palma aceitera por hectárea sembrada. El fruto está compuesto de racimos con un peso de 4 kg a 30 kg y de 200 a 2 000 frutillos según la edad de la plantación, el fruto tiene un porcentaje en peso de 15 % a 25 % de aceite crudo de palma (ACP) el resto son subproductos principales como la nuez o palmiste del cual se extrae harina y aceite, fibra fina utilizada en caldera de biomasa y raquis utilizado como abono orgánico y biomasa; constantemente se invierte en estudios dirigidos a optimizar y aumentar la extracción del aceite crudo de palma y aceite crudo de palmiste los cuales son los principales productos que se obtienen del cultivo de la palma aceitera.

La fibra fina es el subproducto obtenido después de digerir y prensar el exocarpio y el mesocarpio del fruto de la palma aceitera para ser extraído el aceite crudo de palma.

Figura 1. Estructura del fruto de palma aceitera



Fuente: <http://palmiculturaorganica.blogspot.com/2015/02/el-cultivo-de-la-palma-de-aceite.html>.

Consulta: abril de 2016.

Figura 2. Fibra fina de palma aceitera



Fuente: Reforestadora de Palmas del Petén S.A.

2.2. Aceites vegetales

Los aceites vegetales son un producto importante y significativo utilizado en distintos sectores como la agricultura, industrias de refinación y procesamiento e industrias de alimentos. Su elaboración y uso se basa en una amplia gama de ciencias entre ellas la física, química, bioquímica, agricultura, biología molecular, ingeniería, nutrición, medicina, entre otras.

La humanidad depende principalmente de cinco aceites vegetales provenientes de cuatro fuentes fundamentales (soya, palma aceitera, canola y girasol) los cuales anualmente presentan incrementos en la producción y usos en la dieta humana, debido a ellos es que constantemente los métodos de extracción y modificación se van desarrollando para optimizar extracción y la calidad de los aceites vegetales.

2.3. Aceite crudo de palma

El aceite crudo de palma africana (ACP) es la segunda fuente de aceite vegetal en el mundo, se extrae del mesocarpio del fruto de la palma aceitera, debido a su punto de fusión, entre 21 °C-27 °C. Tiene un aspecto semisólido a temperatura ambiente y debido a la gran cantidad de carotenos presenta una coloración roja, muy característica de este aceite. Contiene proporciones similares de ácidos grasos saturados (palmítico 48 % y esteárico 4 %) y ácidos grasos insaturados (oleico 37 % y linoleico 10 %) los triglicéridos que presenta en mayores proporciones son el POP (30 % a 40 %) y POO (20 % a 30 %), además, es una fuente considerable de Caroteno, Tocoferoles y vitamina E (tocotrienoles).

El ACP puede ser dividido en dos componentes principales, la estearina de palma, 30 %-35 % en peso, con un punto de fusión entre 48 °C-50 °C y la oleína de palma, 65 %-70 % en peso, con un punto de fusión entre 18 °C-20 °C, debido a ello es que el uso en la industria alimenticia es muy amplio pudiéndose utilizar para elaborar aceites y grasas entre otros productos alimenticios.

La disponibilidad de ACP se ha incrementado considerablemente a partir de la década de 1980, durante los años 2001 y 2002 la producción mundial fue de 24 millones de toneladas métricas. Debido a la tasa de crecimiento mundial se estimó que para el año 2015 excedió a la producción de aceite de soya, teniendo un aproximado de 37 millones de toneladas métricas anuales producidas. El ACP es utilizado, sobre todo, en la industria de alimentos, sin embargo, puede ser utilizado en otro tipo de industrias como la producción de biodiesel.

2.4. Extracción del aceite crudo de palma africana

La extracción industrial del aceite crudo de palma aceitera básicamente se realiza cociendo los racimos de fruta fresca en los esterilizadores, los cuales pueden ser de cocimiento continuo o intermitente. Al estar cocidos los racimos estos se trasladan al tambor desfrutador, en este punto se separa el fruto cocido de palma aceitera del raquis del racimo. El fruto cocido es trasladado a los digestores en donde la fruta es macerada durante aproximadamente cincuenta minutos.

Figura 3. Fruta de palma



Fuente: <http://aceitedepalma1.blogspot.com/>
aceite de palma. Consulta: abril de 2016.

Figura 4. Esterilización de fruta



Fuente: <http://www.cenipalma.org/capacitaciones-al-personal-tecnico-de-las-plantas-de-beneficio>. Consulta: abril de 2016.

La fruta macerada cae en las prensas dobles con contrapresión, en donde se realiza la extracción del aceite crudo de palma y lodos que son arrastrados dentro del aceite de la fibra del fruto de palma aceitera. La fase líquida que contiene aceite y lodos pasa por un tamiz en el cual se retiran los sólidos más gruesos y para poder eliminar el lodo fino se traslada el aceite a los tanques primarios en donde por temperatura y diferencia de densidades el aceite es recuperado con un porcentaje de impureza menor al 0,10 %. Después de pasar por los tanques primarios el aceite pasa por el desecador, este se mantiene al

vacío para poder extraer el máximo de humedad del aceite para luego poder ser enviado a los tanques de almacenamiento de producto final.

Figura 5. Interior de un digestor fruta palma



Fuente: Reforestadora de Palmas del Petén S.A.

Figura 6. Prensa mecánica de doble tornillo con contrapresión



Fuente: Reforestadora de Palmas del Petén S.A.

2.5. Enzimología

Todo cuerpo vivo se vale de ciertas reacciones bioquímicas para efectuar sus funciones vitales. Cuando se imitan estas reacciones en el laboratorio, ya sea in vitro o exvivo, se observa que solo se desarrollan con razonable rapidez a temperaturas altas o con reactivos muy potentes. Ninguna de estas circunstancias es compatible con la vida de la célula. Para hacer frente a esta contingencia, la célula viva produce ciertos agentes catalizadores cuya finalidad es acelerar las reacciones que se producen en las circunstancias de la materia viva, como una temperatura compatible con la vida, presencia de agua y, por lo general, pH casi neutro.

Estos biocatalizadores se conocen con el nombre general de enzimas o “fermentos”, y solo son producidos por las células vivas, todas las cuales los contienen, pero a menudo pueden ser extraídos y refinados de ellas y aprovechados para catalizar reacciones químicas “in vitro”. Todos los procesos fisiológicos de las plantas y animales dependen de la catálisis enzimática. De ahí que el interés que tienen su acrecentamiento y su mengua se concentre principalmente en la comprensión de los sistemas enzimáticos que con ellos se relacionan.

Después de hacer un estudio detenido de las enzimas, se sabe que estas no solo tienen la propiedad de acelerar reacciones bioquímicas, sino que también tienen la virtud de efectuar la catálisis selectiva de una reacción con preferencia a otras posibles reacciones que podrían producirse entre las mismas sustancias. De esta suerte las enzimas gobiernan las reacciones, a esta acción directriz se le da el nombre de especificidad, la cual no es en manera alguna privativa de catalizadores enzimáticos.

Las reacciones catalizadas por enzimas conducen a cierto equilibrio, aunque la reacción haya avanzado tanto hacia un sentido que parezca una reacción completa. La reacción se puede efectuar en uno y otro sentido, según la concentración de enzimas utilizada. Muchas sustancias, especialmente grasas y glicósidos, han sido sintetizadas en el laboratorio mediante la acción de las mismas enzimas que en otras circunstancias de concentración las habrían hidrolizado.

2.6. Especificidad

La especificidad enzimática es un parámetro de mucho interés para los catalizadores enzimáticos, la mejor descripción que se conoce de la especificidad enzimática es la de Emil Fischer, quien comparó el substrato y la enzima a la cerradura y la llave.

Se conocen muchos ejemplos de la especificidad de enzimas para el isómero óptico natural. Evidentemente, una enzima tiene la propiedad de distinguir entre la estructura de dos moléculas cuando una es la “imagen en el espejo” de la otra. Esto indica no solo una compleja estructura molecular de la propia enzima, sino también que su actividad es consecuencia de alguna de esas complejidades estructurales. Los conceptos de bioquímica son hoy los más útiles cuando se trata de concebir la acción enzimática.

2.7. Nomenclatura

Una enzima es un verdadero agente catalizador producido por una célula viva, puesto que la célula elabora la enzima para acelerar una sola reacción, la enzima es un catalizador específico. Cuando se pueden efectuar varias reacciones entre dos sustancias en una célula, la enzima acelera una de ellas, de suerte que las demás quedan virtualmente rezagadas; la enzima, es pues, además de un catalizador específico, un catalizador directivo. Las enzimas cuya acción ocasiona la desintegración de un enlace de carbono a carbono en el sustrato, con lo cual origina la desnaturalización y/o hidrólisis de su esqueleto de carbono, se llaman desmolases.

En una reacción típica participan generalmente dos sustancias, a las sustancias cuya transformación química es acelerada por influjo de una enzima, se les llama sustrato.

Existen sustancias que aumentan o disminuyen la acción de una enzima, se les conoce como grupo prostético o cofactor. Un grupo prostético es una molécula orgánica que participa en la reacción adhiriéndose a la enzima, con lo cual hace que esta sea activa. Cualquier otra sustancia que acrecienta la actividad enzimática es un activador, sin embargo, algunas veces se aplican indistintamente ambos términos. Una holoenzima (enzima activa) es cuando una apoenzima (enzima inactiva) se une al grupo prostético correspondiente.

2.8. Inactivación, inhibición y antienzimas

La acción de una enzima se puede disminuir o suprimir de diversas maneras, algunas de las cuales se tratarán a continuación. No se deben utilizar las palabras “inhibición” e “inactivación” como sinónimos, La inhibición es la

supresión parcial de la actividad mediante un proceso que no se encamina a la destrucción de la enzima, los productos finales de la reacción pueden obrar como inhibidores. La inactivación es más amplia, puede ser parcial o total, reversible o irreversible.

Puesto que las enzimas son proteínas, es probable que los reactivos de las proteínas reduzcan o destruyan la actividad enzimática, efecto que produce todo aquello que origina desnaturalización. Esto explica el efecto que producen el calor, un ácido o álcali o la vibración supersónica y la presión hidrostática muy fuerte. Tales métodos de inactivación se aplican en principio a todas las enzimas, pero se pueden aplicar métodos especiales a enzimas determinadas en virtud de alguna peculiaridad de su propia estructura.

Las antienzimas son sustancias inactivadoras que solo se hallan en la naturaleza y cuyos efectos son específicos o casi específicos. Hay dos clases de antienzimas: las que se hallan en tejidos normales y las que son producidas en el organismo por influjo de un estímulo artificial, como la inyección de la propia enzima.

2.9. Enzimas como proteínas

No todas las enzimas pertenecen a un mismo grupo de proteínas, según la clasificación de que estas se hacen, también es sumamente variable el peso molecular de las enzimas; algunas de las enzimas que ya han sido aisladas parecen ser proteínas sencillas. No obstante su extraordinaria propiedad catalítica (a diferencia de las proteínas ordinarias) en su composición conocida no hay nada que sea inusitado. Otras enzimas que también han sido aisladas, en particular las que se relacionan con la oxidación y la reducción, son proteínas complejas que contienen metales.

Hay, además, otras enzimas que contienen una proteína químicamente combinada con un grupo relativamente pequeño no proteínico, que no es realmente parte integral de la proteína, sino que está simplemente enlazado a ella, algunas de estas enzimas contienen también un metal.

Al grupo no proteínico se le llama prostético o coenzima y es interesante observar que los grupos protéticos en proteínas enzimáticas con frecuencia tienen relación con una de las vitaminas conocidas. Se puede, lógicamente, suponer que una de las razones de que las vitaminas sean necesarias en el régimen alimenticio es que permiten al organismo incorporar complementos de las enzimas que le son necesarias y que de otra manera no podrían obtener.

Las enzimas, al igual que otras proteínas, pueden experimentar desnaturalización, por lo cual pierden su actividad y cuando vuelven a manifestarla, algunas veces sucede, es indicación de que la proteína recobra su forma nativa.

Al igual que otras proteínas, también las enzimas tienen punto isoeléctrico y no es de sorprender que la carga eléctrica de la proteína modifique su actividad catalítica. Por consiguiente, en determinadas circunstancias hay cierto pH en que la enzima tiene actividad máxima; tal es el llamado pH óptimo, que también depende del medio y del substrato, y si bien no es un medio de identificación de la enzima, puede servir para diferenciar algunas enzimas de otras. Ciertas enzimas tienen pH óptimo muy preciso y otras tienen actividad máxima en un intervalo muy amplio de pH. El pH de actividad máxima no es necesariamente aquel en que la proteína es más estable.

2.10. Formación y acción de las enzimas

No se sabe que las enzimas sean auto reproductoras y uno de los puntos más importantes que la fisiología está por resolver es la manera como se forman, la hipótesis actual es que se originan de algo que funciona como patrón, quizá en las unidades biológicas de la herencia llamadas genes. Se tienen muy pocos conocimientos exactos acerca de las reacciones que experimentan las enzimas en su papel de catalizadores. Sin embargo, ha nacido un concepto importante de las investigaciones de los últimos 50 años, y es que la enzima se combina con su sustrato.

Esta conclusión nació de las observaciones de lo que sucede cuando una enzima obra sobre diversas concentraciones del sustrato. Cuanto mayor es la concentración de este, tanto más rápidamente desintegra una concentración determinada de enzima, pero solo hasta cierto punto. Más allá de este punto, en el cual se puede considerar que la enzima está saturada de sustrato, no aumenta la velocidad al aumentar la concentración de sustrato.

Las mediciones de la variación de velocidad de reacción, según varía la concentración del sustrato, concuerdan cuantitativamente con la suposición de que un compuesto disociable de enzima y sustrato se forma con arreglo a la ley de acción de las masas y que la actividad de la enzima en cualquier momento depende de la cantidad del compuesto disociable, existente en ese momento particular.

Si se admite que la enzima se combina con el sustrato, es que entre ellos debe haber cierta “afinidad”. Es importante conocer la medida de esa afinidad, porque determina la eficiencia de la enzima, ya que es disociable el compuesto de enzima y sustrato. Esta afinidad se expresa ordinariamente por la

concentración de sustrato en que la enzima obra como si estuviese medio saturada de sustrato. Esto es que la concentración de sustrato en este punto es igual a una constante que expresa la afinidad de una enzima por su sustrato y se puede derivar matemáticamente de las anteriores suposiciones.

En algunos casos se ha demostrado que una enzima tiene afinidad por los productos finales de la reacción que modifica. Aunque esta afinidad suele ser menor que la de la enzima por el sustrato, a menudo basta una combinación con los productos finales. Luego que se forma cantidad considerable de estos, para retardar la acción de la enzima. Probablemente, la enzima continúa combinándose con los productos finales, pues estos tienen cierta semejanza estructural con el sustrato original.

De esta manera se produce la llamada “inhibición por competencia” lo que implica que dos o más sustancias compiten entre sí para adquirir un lugar en el centro activo de la enzima. Sin embargo, no es preciso que las sustancias competidoras sean productos finales de la reacción. Cualquier sustancia cuya configuración sea adecuada para combinarse con la enzima y de esa manera bloquear su superficie activa, puede servir de inhibidor competitivo. Algunas veces es tan fuerte la afinidad entre una enzima y un inhibidor que se efectúa la combinación con más facilidad que entre enzima y sustrato y de esa suerte impide la formación del complejo enzima-sustrato.

Por supuesto, hay otras formas de inhibición, muchas de las cuales se deben a alteraciones químicas radicales que se efectúan en la proteína enzimática, otras probablemente no tengan ninguna relación con las reacciones químicas de la enzima. Las acciones enzimáticas a menudo son retardadas por el alcohol o por concentraciones considerables de sales, pero se reavivan cuando se suprime el inhibidor.

La reacción en que participa la acción enzimática es siempre más rápida cuando aumenta la temperatura. La regla general es que el aumento de 10 °C duplica, poco más o menos, la velocidad de la reacción. Como las enzimas son también menos estables y se desnaturalizan más rápidamente a mayores temperaturas, las más veces, cuando se aplican temperaturas de más de 45 °C, la velocidad que resulta es un término medio entre la aceleración debida a la mayor temperatura y la reducción de la cantidad de enzima existente a causa de su desnaturalización más rápida a esa temperatura. De esta manera, en intervalos cortos es posible que la actividad enzimática a temperaturas altas alcance valores sorprendentemente altos hasta que es destruida la enzima.

2.11. Clasificación de enzimas

Hasta hace poco tiempo las enzimas se clasificaban según su función, y este continúa siendo el método más generalizado, sin embargo, se empieza ya a clasificar también las enzimas por su naturaleza proteínica, ya sea que sean proteínas simples, que contengan metales, que oren con coenzimas u otros.

Cuando se clasifican por la función, la mayoría de las enzimas entran en alguno de seis grandes grupos, que representan seis tipos muy comunes de reacciones bioquímicas; los seis grupos son:

2.11.1. Enzimas oxidoreductasas

Se utilizan para catalizar reacciones de reducción-oxidación (redox) en las que se cambia el estado de oxidación de uno o más átomos de la molécula, la reacción redox en sistemas biológicos involucra una o más reacciones de transferencia acompañada de reducciones de oxígeno e hidrógeno en la

molécula. Entre los ejemplos de las enzimas oxidorreductasas se encuentran las reductasas y las deshidrogenasas.

2.11.2. Enzimas transferasas

Estas enzimas también son llamadas de transferencia y se debe a que transfieren grupos moleculares de una molécula donadora a una molécula receptora. Entre estos grupos están el amino, el carboxilo, el carbonilo, el metilo, el fosforilo y el acilo. Los nombres de las transferasas a menudo incluyen el prefijo “*trans*” por ejemplo las transcarboxilasas, las transmetilasas y las transaminasas. Conviene, sin embargo, agrupar algunas enzimas de transferencia en una misma clase cuando la propia transferencia es lo que atrae la atención.

- Transferencia de grupos aminos. Las transaminasas (aminoferasas) son enzimas que se facilitan la transferencia de un grupo amino de un α -aminoácidos a un α -cetoácido para formar un nuevo aminoácido y un nuevo cetoácido.
- Transferencia de fosfato. Esta transferencia es de suma importancia como medio para transportar energía en sistemas bioquímicos y como uno de los tiempos de la síntesis del almidón o del glucógeno.
- Fosforilasa. Las fosforilasas en realidad transportan glucosa, por consiguiente, la fosforilasa puede degradar la porción de amilosa del almidón. La desintegración de la cadena de amilosa o de otras cadenas de hidratos de carbono mediante la introducción de un grupo fosfato, que

luego se vuelve parte de los productos de desintegración, es análoga a la hidrólisis, en que el agua es insertada y permanece combinada.

2.11.3. Enzimas hidrolasas

Estas enzimas catalizan reacciones desnaturalizando enlaces carbono-nitrógeno, oxígeno-fósforo y carbono-oxígeno por la adición de agua. Entre las hidrolasas están las esterasas, las fosfatasas y las peptidasas, las lipasas, la tanasa, la sulfatasa, la clorofilasa, la fitasa, la colinesterasa y la fosfatasa, entre otras.

Se conocen unas cuantas enzimas hidrolasas que añaden agua a sus sustratos sin causar su desnaturalización, es decir, son enzimas hidratantes. Las enzimas utilizadas para mejorar el proceso de extracción de aceite pertenecen a esta categoría.

2.11.4. Enzimas liasas

Catalizan reacciones en las que se eliminan algunas moléculas como agua, dióxido de carbono y amoníaco para dar paso a la formación de un doble enlace o se añaden a un doble enlace existente. Algunos ejemplos son las descarboxilasas, las hidratasas, las deshidratasas, las desaminasas y las sintetetasas.

2.11.5. Enzimas isomerasas

Catalizan varios tipos de reordenamientos intramoleculares, se trata de un grupo heterogéneo de enzimas por ejemplo las mutasas catalizan la

transferencia intramolecular de grupos funcionales, varias de estas participan en el metabolismo de los hidratos de carbono y las epimerasas catalizan la inversión de átomos de carbono asimétricos.

2.11.6. Enzimas ligasas

Catalizan la formación de enlaces entre dos moléculas de sustrato, algunas otras ligasas se denominan carboxilasas. Un claro ejemplo de estas es la ligasa de DNA la cual une entre sí fragmentos de cadenas de DNA.

2.12. Enzimas industriales

La producción de enzimas para empleo industrial y como alimento se ha desarrollado en forma independiente en diversas industrias. La fuente original de enzimas de cereales, principalmente de las distintas clases de maltas, es la industria de la malta de cebada. Las proteasas de las plantas, como la papaína, bromelaina y ficina, que se emplean en Estados Unidos de América son de importación y generalmente los importadores tienen poco control sobre las condiciones del proceso de producción. La industria empacadora de carnes es la fuente principal de las enzimas derivadas del páncreas, estomago e hígado de los animales. Finalmente, las enzimas de fuentes microbiológicas: bacterias, hongos y levaduras se producen en las industrias de la fermentación.

Los procesos microbianos en los que el hombre controla las condiciones del desarrollo microbiológico, se llaman fermentaciones. Ejemplo de fermentaciones industriales son la producción de queso y de vino; en la agricultura están la preparación de productos de ensilaje y el enriamiento del lino, y en el campo farmacéutico la producción de antibióticos.

En todas las fermentaciones, las enzimas son los catalizadores activos que dirigen la cadena de reacciones químicas complejas. Las fermentaciones se controlan escogiendo los microorganismos y el medio adecuados, de modo que se produzca en abundancia una enzima en particular o un grupo de enzimas. Esta es la fuente de las enzimas que provienen de preparados industriales de origen microbiano. Las enzimas son agentes catalizadores producidos únicamente por organismos vivos: animales, plantas y microorganismos. Algunas enzimas se han obtenido puras en forma de cristales y todas las que se han cristalizado son proteínas.

La actividad catalítica de las enzimas puede destruirse por el calor, generalmente de modo irreversible, por desnaturalización de la proteína de la enzima. La temperatura óptima de las enzimas es cercana a la temperatura del cuerpo de los animales de sangre caliente y a niveles de pH no muy apartados del neutro, como puede suponerse si se considera que el lugar natural de acción de las enzimas está en los tejidos y en las secreciones. Por supuesto, hay excepciones notables. Por ejemplo: el pH óptimo de la pepsina, que se segrega en el medio de ácido clorhídrico del estómago, es menor de 2; y la temperatura óptima de las enzimas de algunas bacterias termófilas es cercana a 80 °C.

Todos los procesos metabólicos y catabólicos dependen de la “dirección” que las enzimas ejercen sobre las reacciones químicas, y generalmente es muy grande el número de sistemas enzimáticos que intervienen en cualquier síntesis o fraccionamiento.

Como contraste, las enzimas que se emplean en los procesos industriales son las más sencillas: enzimas hidrolíticas – proteasas, glucosidasas y lipasas- que dividen los coloides alimenticios de gran peso molecular en componentes

de peso molecular menor. Este empleo de las enzimas hidrolíticas se debe, probablemente, al hecho de que se encuentran en abundancia fuera de los tejidos vivos, ya que se segregan en el tracto intestinal (animales) o en el medio líquido ambiente (microorganismos). Son relativamente fáciles de aislar.

2.12.1. Características generales de las enzimas industriales

En el campo de las enzimas industriales, el conocimiento de la reacción enzimática generalmente es menos exacto y con frecuencia no lo hay. Esto se debe al desarrollo empírico de las aplicaciones industriales y al hecho de que la mayoría de los preparados de que dispone la industria son mezclas de enzimas que se aplican a mezclas de substratos a menudo muy complejas. Sin embargo, la mayoría de los preparados industriales de enzimas se caracteriza por la actividad particular de la enzima deseada, medida en unidades arbitrarias, y por el efecto del pH, temperatura, tiempo de reacción, concentraciones de la enzima y del substrato, y el efecto de los inhibidores o de los activadores que pueden presentarse en las aplicaciones industriales.

2.12.2. Unidades de actividad

La mayoría de los preparados industriales de enzimas contienen solo una pequeña concentración de la enzima que determina su empleo. En un preparado, la cantidad de esta enzima solo puede determinarse midiendo su efecto catalítico. La terminación de las llamadas unidades de actividad es una especificación del código enzimático para la expresión cuantitativa de la actividad catalítica de una enzima. Esta especificación del código enzimático se emplea en el campo bioquímico siempre que no puede determinarse la concentración real del ingrediente activo.

Por supuesto, el concepto de “unidad de actividad”, generalmente, se usa en bioquímica para todas las sustancias cuyo principio activo no se ha aislado en forma pura, o bien cuando se acepta el concepto de unidad de actividad por razones de comodidad o de tradición. La expresión de la actividad de las vitaminas y de las hormonas en unidades es el ejemplo más común.

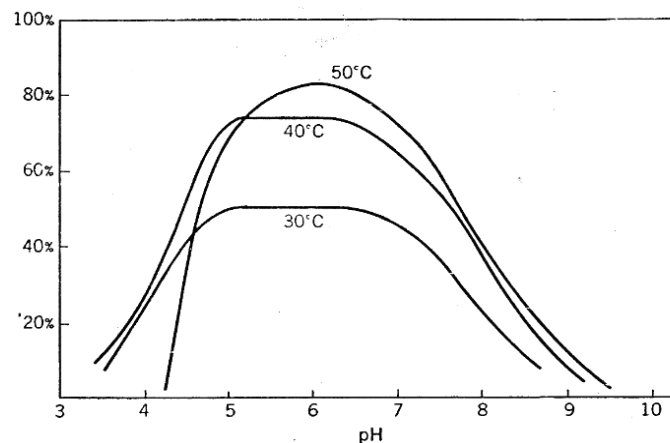
En algunos casos, las enzimas se han aislado puras en forma cristalina, y en un preparado industrial la concentración real de una alfa-amilasa de hongos podría expresarse en tanto por ciento en comparación con la actividad del compuesto cristalino. Actualmente, este método para expresar el contenido enzimático no se emplea para los preparados industriales. Las razones son que es bastante difícil cristalizar enzimas y que, frecuentemente, hay dudas sobre la pureza del compuesto cristalino. En el caso de las vitaminas se han hecho algunos cambios, y aunque los frascos de capsulas multivitaminicas todavía indican el contenido de vitaminas A y D en unidades de actividad, las vitaminas B1 y B2 se expresan en microgramos.

2.12.3. Influencia del pH

El ejemplo clásico que demuestra la influencia del pH es el fraccionamiento de las proteínas alimenticias en el tracto digestivo; esto es la hidrólisis de los enlaces peptídicos que unen los aminoácidos de la gran molécula proteínica. La pepsina, que se segrega en la pared gástrica, cataliza la proteólisis en medio fuertemente ácido (la secreción de ácido clorhídrico mantiene en el estómago el pH por debajo de 2). La anterior proteólisis tiene lugar en el intestino delgado mediante la tripsina a un pH comprendido en la zona alcalina.

La figura No.7 muestra curvas de actividad de un preparado de α -amilasa bacteriana en función del pH. La actividad catalítica es óptima en pH6, descendiende lentamente del lado alcalino y más rápidamente del lado ácido. La forma general de estas curvas de actividad es semejante a la de las otras enzimas, aunque pueden diferir el pH de actividad óptima y el ancho de la curva.

Figura 7. **Curvas de actividad de un preparado de α -amilasa bacteriana en función del pH**



Fuente: MCKEE, Trudy; MCKEE, James R. *Bioquímica: las bases moleculares de la vida*, p 468.

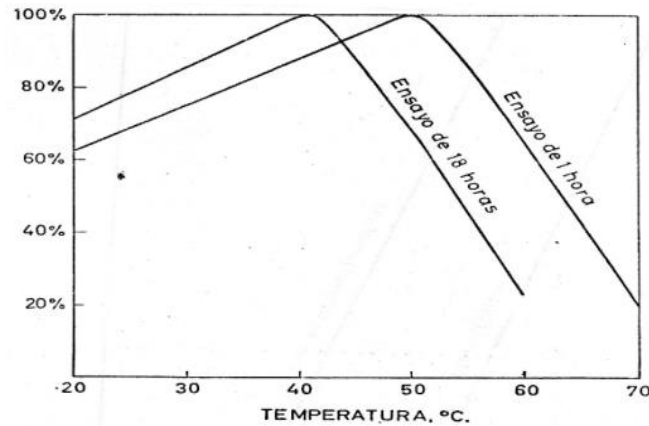
En la curva de actividad del pH influyen la temperatura en que se hace la determinación y el tiempo de reacción. Las temperaturas elevadas y los períodos largos de reacción afectan la estabilidad de la enzima en forma distinta a distintos niveles de pH; por regla general, la curva de actividad del pH tiene una cresta más aguda si las lecturas se toman a temperaturas más altas. En la figura No.7 la curva a 50 °C. También indica que la amilasa bacteriana tiene poca estabilidad a volares de pH menores de 5,0.

2.12.4. Temperatura

Lo mismo que en otras reacciones químicas, en las reacciones catalizadas con enzimas, pueden determinarse un cociente de temperatura para cada 10 °C de aumento en la escala centígrada. En general, para las reacciones enzimáticas se encuentra aproximadamente entre 1,5 y 2. La figura No.8 muestra curvas de actividad y temperatura de la enzima sacarificante de un preparado micético. La rama ascendente de la curva permite un cálculo aproximado del cociente de temperatura de la reacción. Por encima de los 50 °C, la curva desciende rápidamente debido a la inactivación de la enzima por el calor.

Por lo tanto, la curva completa representa a cualquier temperatura la actividad enzimática como función de la temperatura y la eliminación de la enzima por inactivación. El punto de temperatura óptima se alcanza cuando el grado de inactivación equilibra el efecto de velocidades mayores de reacción a temperaturas superiores. Es claro que el tiempo de reacción tiene un efecto apreciable en la temperatura óptima por la inactivación continua de la enzima a temperaturas elevadas. Cuanto más prolongado es el tiempo de reacción, menor es la temperatura óptima. Esto puede verse en la figura No.8, comparando las curvas de actividad y temperatura para tiempos de reacción de una hora y de dieciocho horas.

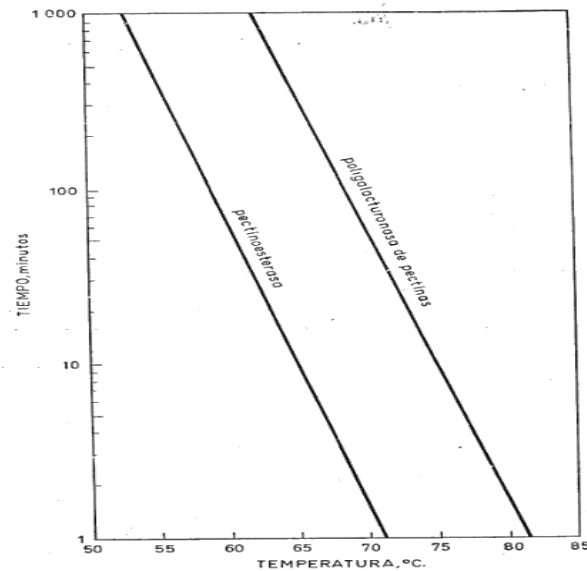
Figura 8. Comparación de las curvas de actividad y temperatura para tiempos de reacción de una hora y de dieciocho horas



Fuente: MCKEE, Trudy; MCKEE, James R. *Bioquímica: las bases moleculares de la vida*, p 470.

En los preparados industriales de enzimas, la temperatura de inactivación es solo una indicación poco precisa de las temperaturas en que tiene lugar alguna inactivación, sin referirse al verdadero índice de inactivación. Hay pocos datos que indiquen el tiempo necesario para la inactivación completa como función de la temperatura. La figura No.9 muestra tales datos en forma de gráfica para la poligalacturonasa y la pectinesterasa de un preparado enzimático comercial. La relación entre la temperatura y el logaritmo del tiempo de exposición está expresada por una línea recta.

Figura 9. **Temperatura de inactivación para la poligalacturonasa y la pectinesterasa de un preparado enzimático comercial**



Fuente: MCKEE, Trudy; MCKEE, James R. *Bioquímica: las bases moleculares de la vida*, p 472.

2.12.5. Concentración enzimática y tiempo de reacción

Con concentraciones bajas de enzima y en presencia de un exceso de sustrato, el grado de activación enzimática es proporcional a la concentración de la enzima y al tiempo; esto es: entre ciertos límites, el producto del tiempo y la concentración de la enzima es constante en cualquier grado de hidrólisis. Sin embargo, si la concentración del sustrato disminuye por la acción continua de la enzima, la velocidad de actividad enzimática disminuye. Con el tiempo, el sistema alcanza el equilibrio, conforme a la ley de acción de masas, a menos que el producto final de la actividad enzimática se vaya eliminando continuamente (por ejemplo, difundiendo los productos finales de la hidrólisis a través de una membrana semipermeable).

En las cervecerías y en las industrias de destilación se encuentra un ejemplo práctico en la eliminación constante de la maltosa como producto final de la hidrólisis del almidón. En este caso, la hidrólisis de los granos de almidón a maltosa mediante las enzimas de la malta, prosigue casi hasta ser completa, debido a la eliminación constante de la maltosa por fermentación simultánea con levadura.

2.12.6. Inhibición y activación de las enzimas

Al considerar la inhibición de las enzimas es conveniente distinguir entre la inhibición de la velocidad de reacción, inhibición por cambios en el substrato que lo hacen menos disponible para el ataque enzimático y, finalmente, inhibición por cambios en la misma enzima. Se pueden dar ejemplos industriales prácticos para ilustrar cada caso.

Frecuentemente se provoca un descenso en la velocidad de reacción cuando la concentración del soluto se hace tan grande que la difusión de la enzima en la solución disminuye. Esto sucede, por ejemplo, en la producción de concentración de jugo de manzana a partir del jugo. Tales concentrados, con 72 % de sólidos, más o menos, principalmente azúcares, se usan mucho en la producción de jaleas. Es conveniente embarcar y utilizar estos concentrados en forma líquida. Esto hace necesario la eliminación de la pectina (que causaría gelatinización) por medio de una enzima péptica comercial. La enzima se agrega al jugo de manzana y se deja reaccionar durante varias horas; después de filtrado, el jugo de manzana se concentra.

Se puede lograr un ahorro muy grande de espacio de almacenamiento, si se concentra el jugo antes de añadir la enzima. Esto resulta práctico después de la concentración parcial del jugo a no más de 40 % de sólidos. A

concentraciones mayores de azúcares sólidos, la velocidad de reacción enzimática disminuye rápidamente y a 72 % de sólidos es despreciable.

El efecto de la inhibición enzimática por modificación del sustrato se demuestra con un ejemplo de la industria panificadora. Es frecuente en panificación agregar enzimas proteolíticas de origen micético a la masa en fermentación, para hidrolizar ligeramente el gluten, la principal proteína de la harina. Los beneficios de este tratamiento se ven fácilmente en los cambios de las propiedades elásticas de la masa.

Esta proteólisis se inhibe con la sal, y ya que el pan generalmente contiene de 1 % a 2 % de sal, debe añadirse esta sustancia al final del período de fermentación y no al principio, de modo que se obtenga una proteólisis satisfactoria. El efecto de la sal está en su acción sobre el mismo gluten, esto es, sobre el sustrato, pues la sal no inhibe la acción de la enzima en otros sustratos proteicos, como la gelatina.

Finalmente, hay inhibidores específicos que actúan directamente sobre la enzima. Uno de los ejemplos más importantes es la presencia de un inhibidor de la tripsina es la harina cruda de soja, el cual impide la digestión en el intestino de la proteína de soja, a menos que la harina se caliente en autoclave antes de emplearla como alimento. El inhibidor es una proteína que se ha aislado en forma cristalina y que pierde su actividad por desnaturalización mediante el calor. Inhibe la acción enzimática porque forma un compuesto de adición con la tripsina. La acción inhibidora es bastante específica, pues no inhibe la digestión de la proteína de la soja por una proteasa micética.

El asunto de los activadores enzimáticos puede ser considerado de modo análogo, determinando el efecto de un activador sobre la velocidad de reacción,

sobre la misma enzima y sobre el substrato. Aparte de la activación de una proteasa vegetal, la papaína, mediante cisteína u otros agentes reductores, la activación enzimática ha recibido poca atención en el campo de las enzimas industriales. Por supuesto, en su sentido más amplio, la estabilización de las enzimas puede considerarse como activación. Una aplicación industrial muy conocida es la adición de sales solubles de calcio a las amilasas bacterianas.

3. DISEÑO METODOLÓGICO

3.1. Variables

La hipótesis contiene una variable independiente y una dependiente, que se definen a continuación.

3.1.1. Variables independientes

- Concentración de enzima glucosidasa: proporción o relación que hay entre la cantidad de soluto (enzima) y solvente (agua). El resultado es una suspensión coloidal medida en porcentaje volumen/volumen, correspondiente a 0,33 % para el estudio.
- Tiempo: duración total de la digestión de la fruta de palma aceitera. Correspondiente a 50 minutos para cada corrida.
- Temperatura de digestión: magnitud física que expresa el nivel de calor de la maceración de la fruta de palma aceitera en un *beacker*. En un rango entre 50 °C y 55 °C.
- Temperatura de desnaturalización proteica de la enzima: magnitud física que expresa el nivel de calor al cual se eleva la solución para desactivar la acción de la enzima sobre la solución. en un rango entre 85 °C y 90 °C, durante 10 minutos.

3.1.2. Variable dependiente

- Porcentaje de aceite crudo de palma residual en la fibra: cantidad de aceite crudo de palma aceitera que permanece entre el tejido fibroso desechado. Se calcula dividiendo el peso de aceite crudo de palma recuperado de la fibra entre el peso de la muestra aceitosa.

3.2. Delimitación de campo de estudio

- Campo: alimentos.
- Área: grasas y aceites.
- Línea: extracción de aceite crudo de palma aceitera.
- Proyecto: disminuir pérdida de aceite residual de palma aceitera proveniente del proceso extractivo mecánico.
- Ubicación: Reforestadora de Palmas del Petén S.A., km 355 ruta a Sayaxché, Petén.

3.3. Recursos humanos disponibles

Investigador: Erick Gustavo Girón Beherens

Asesor: Ing. Ronal Adolfo Herrera Orozco

Colaboradores: Ervin Morales, Gabriel Izaguirre

3.4. Recursos materiales disponibles

3.4.1. Cristalería y equipo

A continuación, se detalla la cristalería y equipo utilizado en la fase experimental.

3.4.1.1 Instrumentos de medición

- 1 balanza analítica Rice Lake, modelo TA-220, 220 g de capacidad y 0,0001g de precisión.
- 1 balanza semi-analítica Sartorius, modelo TE4101, 4 100 g de capacidad y 0,1 g de precisión.
- cronometro digital marca Casio, rango 10 horas, 0,01 s de precisión.
- termómetro digital de vástago marca Traceable, rango de -50 °C a 150 °C, 0,1 °C de precisión.

3.4.1.2 Equipo auxiliar

- 6 hornillas de extracción Soxhlet
- 1 horno de convección por gravedad
- 1 molino manual
- 1 plancha de calentamiento con agitación magnética

3.4.1.3 Materiales diversos

- 4 bandejas de aluminio de 1 500 mL
- 1 colador tamiz 10

- 1 espátula
- 1 magneto de 25 mm de longitud
- 5 pliegos de papel filtro

3.4.1.4 Cristalería

- 6 balones fondo plano de 250 mL boca 24/40
- 4 *beacker* de 1 000 mL
- 6 cápsulas de porcelana de 125 mL
- 6 condensadores de bolas boca 45/50
- 4 *earlenmeyer* de 250 mL
- 6 extractores Soxhlet bocas 24/40 y 45/50

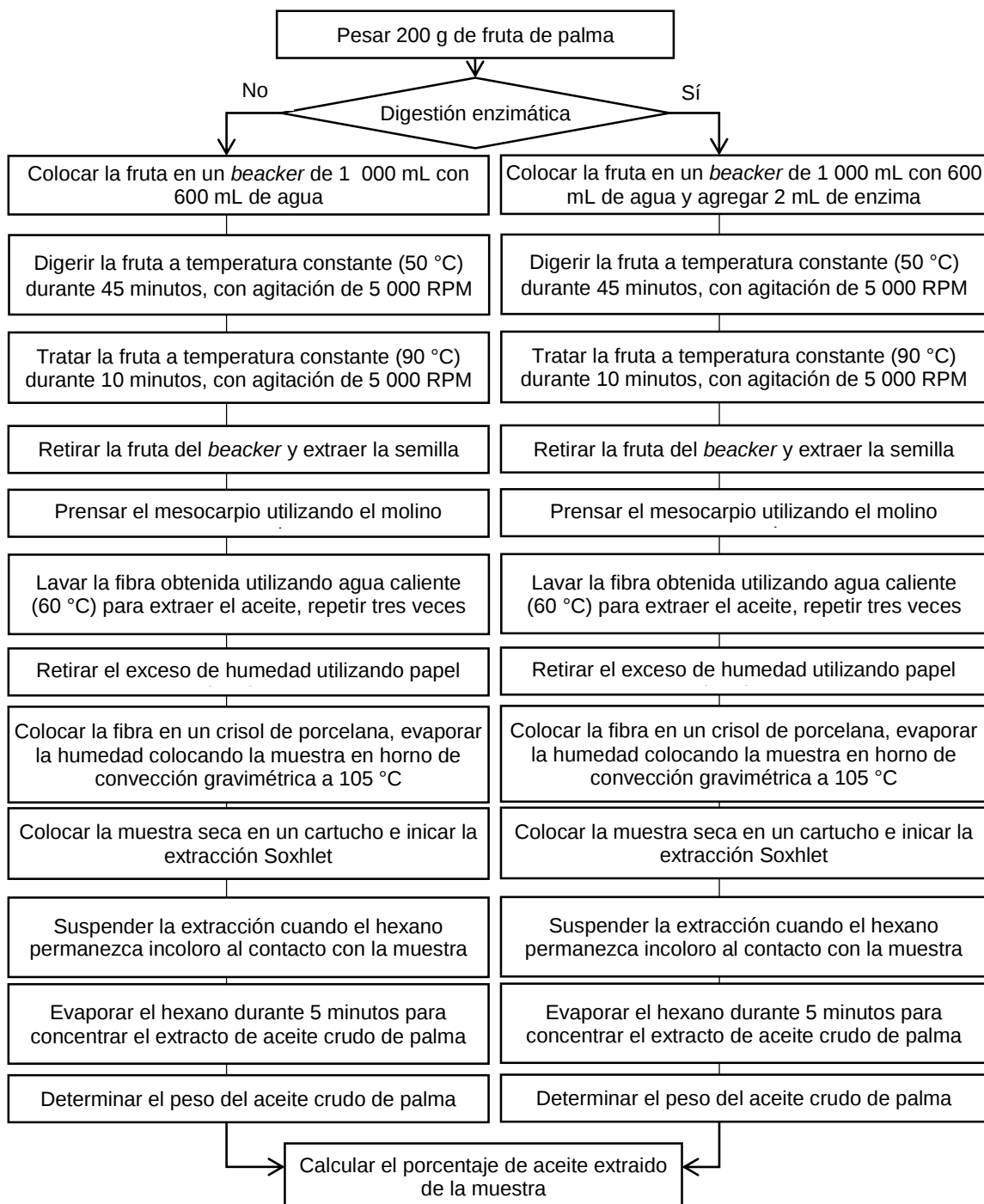
3.4.2. Reactivos y materia prima

- 200 mL de enzima celulasa
- 2 kg de fruta de palma
- 2 galones de hexano grado industrial

3.5. Técnica cuantitativa

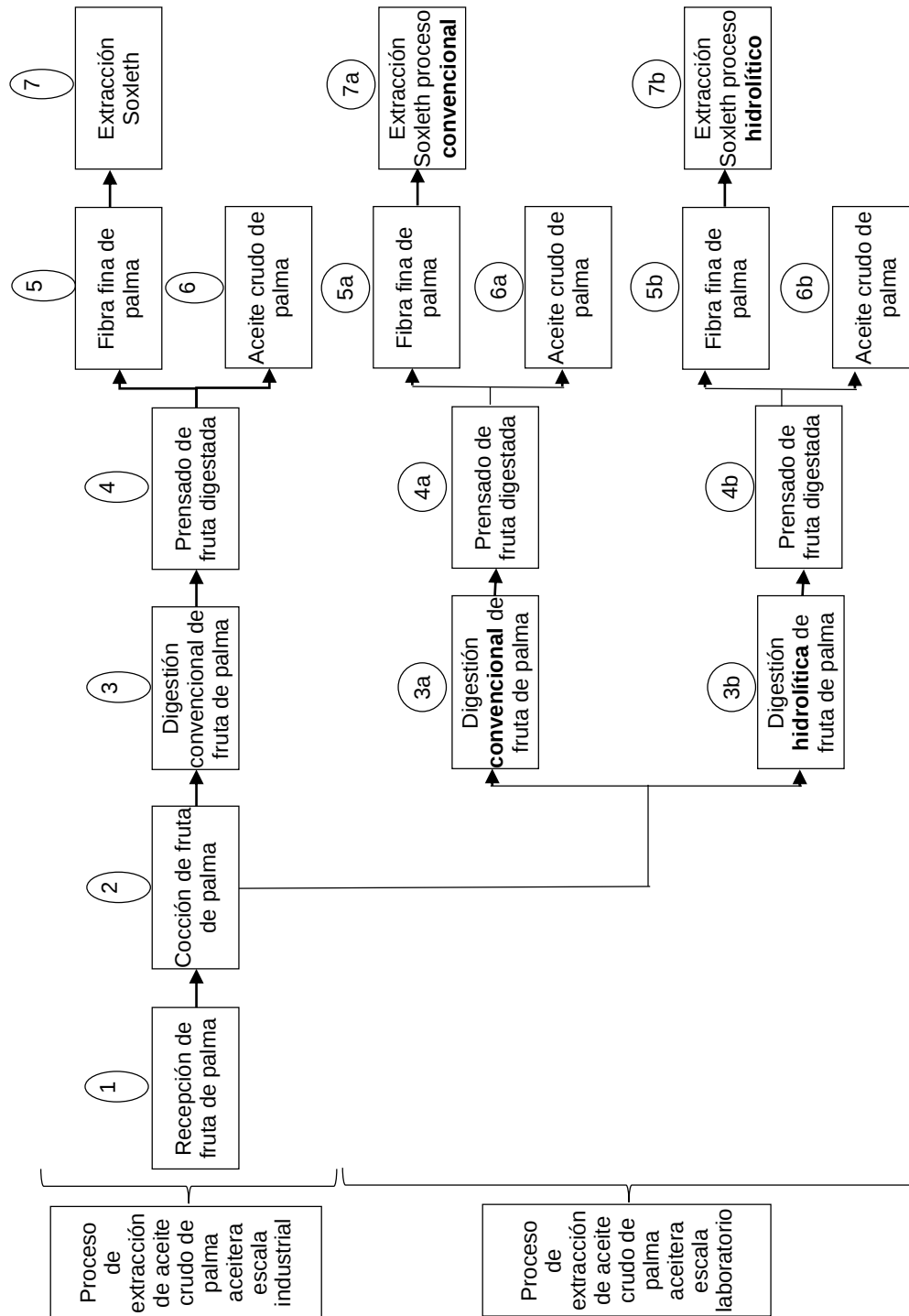
Se evaluará la disminución de residual de aceite crudo de palma en la fibra fina obtenida después del proceso de prensado mecánico. Para comparar resultados se analizarán muestras de control sin utilizar enzima y muestras de fruta empleando enzimas durante el proceso de digestión. A la fibra obtenida de ambos tipos de muestra se le someterá a extracción líquido-sólido utilizando hexano como solvente y se comparará la cantidad de aceite extraído en porcentaje al peso original de muestra.

3.5.1. Diagrama de flujo de la técnica cuantitativa



Fuente: elaboración propia.

3.5.2. Diagrama de flujo del proceso de extracción de aceite crudo de palma aceitera utilizado para la investigación



Fuente: elaboración propia.

- Recepción de fruta de palma (1): ingresan los racimos de fruta fresca a las instalaciones de la extractora.
- Cocción de fruta de palma (2): se usa vapor para cocer los racimos de fruta fresca y lograr separa las semillas de fruta de palma aceitera de los racimos en los cuales crecen.
- Digestión convencional de fruta de palma (3, 3a): las semillas de fruta de palma aceitera cocida se ingresan a digestores en donde son maceradas mediante agitación y agua caliente para separar el mesocarpio de la semilla y facilitar la extracción del aceite crudo de palma.
- Digestión hidrolítica de fruta de palma (3b): las semillas de fruta de palma aceitera cocida se ingresan a digestores en donde son maceradas mediante agitación, agua caliente y enzimas glucosidasas para separar el mesocarpio de la semilla y facilitar la extracción del aceite crudo de palma.
- Prensado de fruta digestada (4, 4a, 4b): las semillas de fruta digestada son extruidas en prensas de tornillo sin fin con contrapresión para extraer el aceite crudo de palma y la fibra fina.
- Fibra fina de palma (5, 5a, 5b): es el mesocarpio de la fruta de palma a la cual se le ha extraído el aceite crudo de palma, aun posee aceite crudo de palma residual que no pudo ser obtenido mediante prensado.
- Aceite crudo de palma (6, 6a, 6b): aceite obtenido después de los procesos de cocción, digestión y prensado.
- Extracción Soxleth (7, 7a, 7b): una muestra de la fibra fina es sometida a extracción sólido-líquido tipo Soxleth para saber la cantidad de aceite crudo de palma residual que no se pudo extraer utilizando el proceso de prensado.

3.6. Recolección y ordenamiento de la información

- Aceite crudo de palma residual fibra fina

3.7. Tabulación, ordenamiento y procesamiento de la información

A continuación, se muestra el formato utilizado para la recolección de datos.

3.7.1. Residual de aceite crudo de palma en fibra fina

El formato que se utilizó para recolectar los datos necesarios para calcular el residual de aceite crudo de palma en fibra fina requiere información sobre cada muestra, indicando datos del recipiente y los pesos durante las diversas etapas del proceso de extracción.

Tabla I. **Formato para recolección de datos para calcular el residual de aceite crudo de palma en fibra fina**

RESPONSABLE: _____

FECHA: _____

No. MUESTRA	PESOS EN GRAMOS								
	SECADO DE MUESTRA SOLIDA				CARTUCHO		EXTRACCION SOXHLET		
	RECIPIENTE VACIO		RECIPIENTE + M UESTRA	RECIPIENTE CON MUESTRA SALIDO DE DESECADORA	PAPEL FILTRO	PAPEL FILTRO + MUESTRA	BALON VACIO		BALON CON ACEITE
	No.	PESO					No.	PESO	
1									
2									
3									
4									
5									

Fuente: elaboración propia.

3.8. Análisis estadístico

Para poder comparar y concluir si existió diferencia significativa entre el comportamiento del residual de aceite crudo de palma utilizando el método de digestión convencional y el comportamiento del residual de aceite crudo de

palma utilizando el método de digestión hidrolítico se empleó un análisis de varianza (Anova).

Se normalizaron los resultados del aceite residual obtenido del método de digestión convencional y los resultados del aceite residual obtenido del método de digestión hidrolítico para realizar una comparación gráfica de la distribución normal de ambos grupos de datos. Estas gráficas proporcionaron información para predecir el comportamiento del método de digestión convencional y del método de digestión hidrolítico. Para validar la hipótesis nula se realizó la prueba de “t de student” debido a que la muestra fue menor a treinta datos para cada método evaluado.

4. RESULTADOS

Tabla II. **Contenido de aceite residual en fibra fina de palma procedente del proceso extractivo mecánico-convencional y del proceso extractivo mecánico-hidrolítico**

Semana	Muestra	Porcentaje de aceite residual sin enzima	Porcentaje de aceite residual con enzima
Semana No.1	lunes 1	37,02	15,91
	lunes 2	37,44	14,94
	martes 1	28,55	19,56
	martes 2	31,09	17,03
	miércoles 1	26,23	19,39
	miércoles 2	22,24	14,00
	jueves 1	29,07	22,10
	jueves 2	21,13	15,35
	viernes 1	23,78	12,31
	viernes 2	26,53	17,27
Semana No.2	lunes 1	24,62	15,20
	lunes 2	24,88	15,37
	martes 1	31,42	20,21
	martes 2	33,07	25,67
	miércoles 1	31,45	20,51
	miércoles 2	30,80	21,39
	jueves 1	29,30	17,74
	jueves 2	32,64	18,08
	viernes 1	26,91	13,62
	viernes 2	28,69	14,72
Semana No.3	lunes 1	28,10	21,24
	martes 1	22,44	16,45
	miércoles 1	23,32	13,79
	jueves 1	34,08	23,53
	viernes 1	22,36	15,20

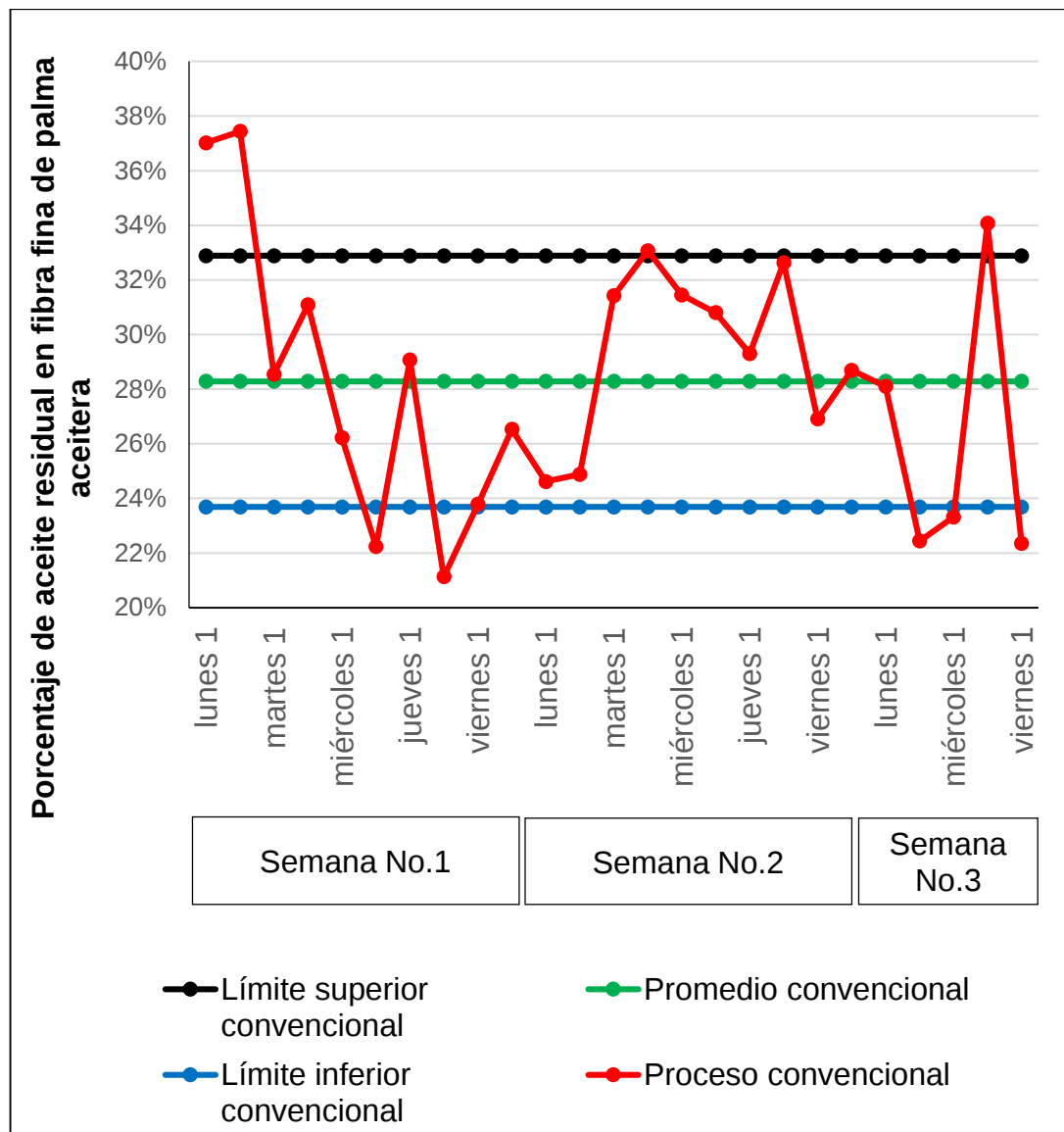
Fuente: elaboración propia

Tabla III. **Diferencia entre residuales de aceite crudo de palma en fibra fina procedente del proceso extractivo mecánico-convencional y del proceso extractivo mecánico-hidrolítico**

Semana	Muestra	Aceite residual sin tratamiento (%)	Aceite residual con tratamiento (%)	Diferencia de remanente de aceite residual (%)
Semana No.1	lunes 1	37,02	15,91	21,12
	lunes 2	37,44	14,94	22,50
	martes 1	28,55	19,56	8,98
	martes 2	31,09	17,03	14,05
	miércoles 1	26,23	19,39	6,84
	miércoles 2	22,24	14,00	8,23
	jueves 1	29,07	22,10	6,98
	jueves 2	21,13	15,35	5,78
	viernes 1	23,78	12,31	11,47
	viernes 2	26,53	17,27	9,26
Semana No.2	lunes 1	24,62	15,20	9,42
	lunes 2	24,88	15,37	9,52
	martes 1	31,42	20,21	11,21
	martes 2	33,07	25,67	7,40
	miércoles 1	31,45	20,51	10,94
	miércoles 2	30,80	21,39	9,41
	jueves 1	29,30	17,74	11,56
	jueves 2	32,64	18,08	14,56
	viernes 1	26,91	13,62	13,29
	viernes 2	28,69	14,72	13,98
Semana No.3	lunes 1	28,10	21,24	6,86
	martes 1	22,44	16,45	6,00
	miércoles 1	23,32	13,79	9,53
	jueves 1	34,08	23,53	10,55
	viernes 1	22,36	15,20	7,15
Promedio		28,29	17,62	10,66
Desviación estándar		4,60	3,44	

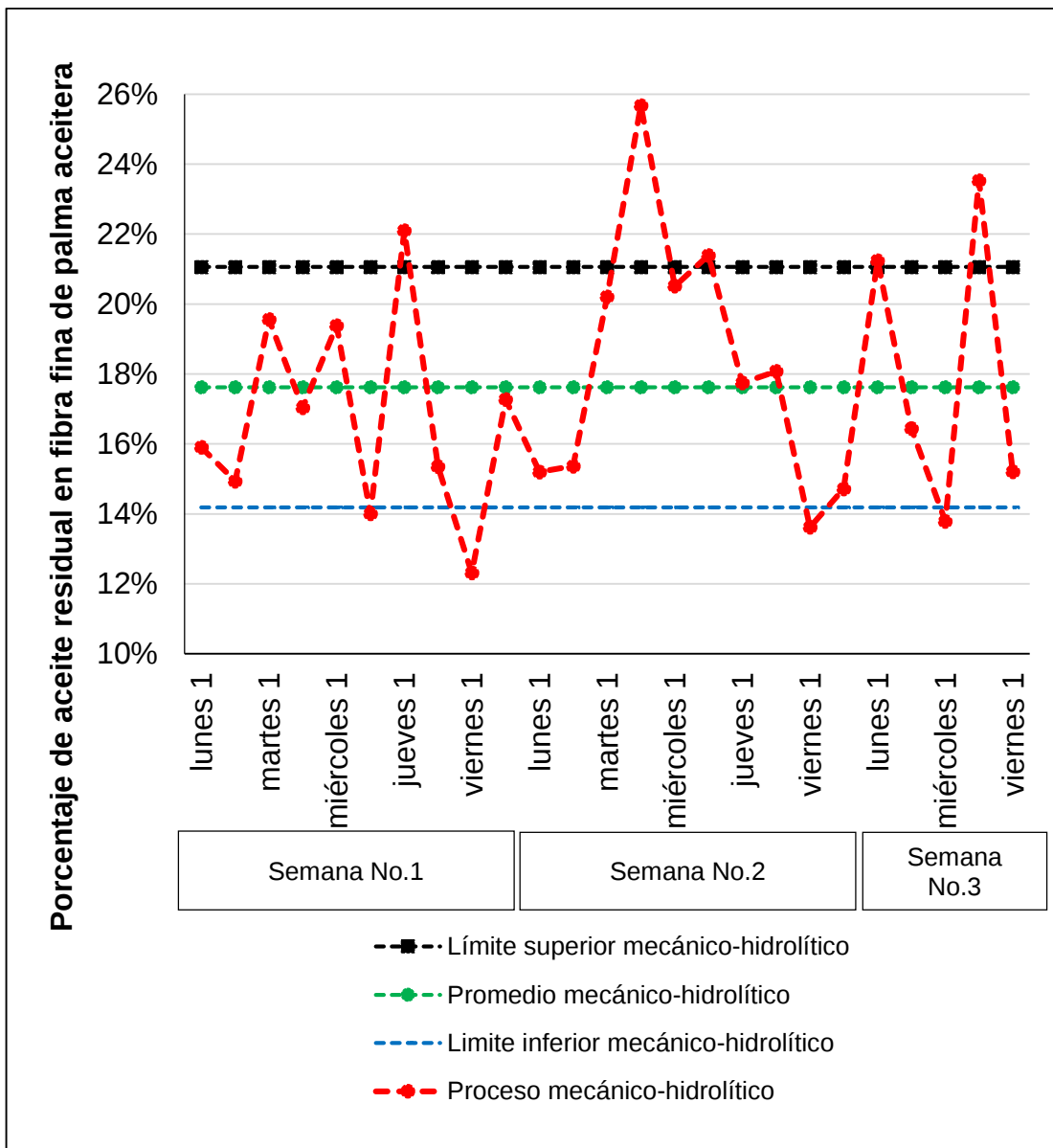
Fuente: elaboración propia.

Figura 10. Diagrama de Shewhart de resultados de residuales de aceite crudo de palma en fibra fina procedente del proceso extractivo mecánico-convencional



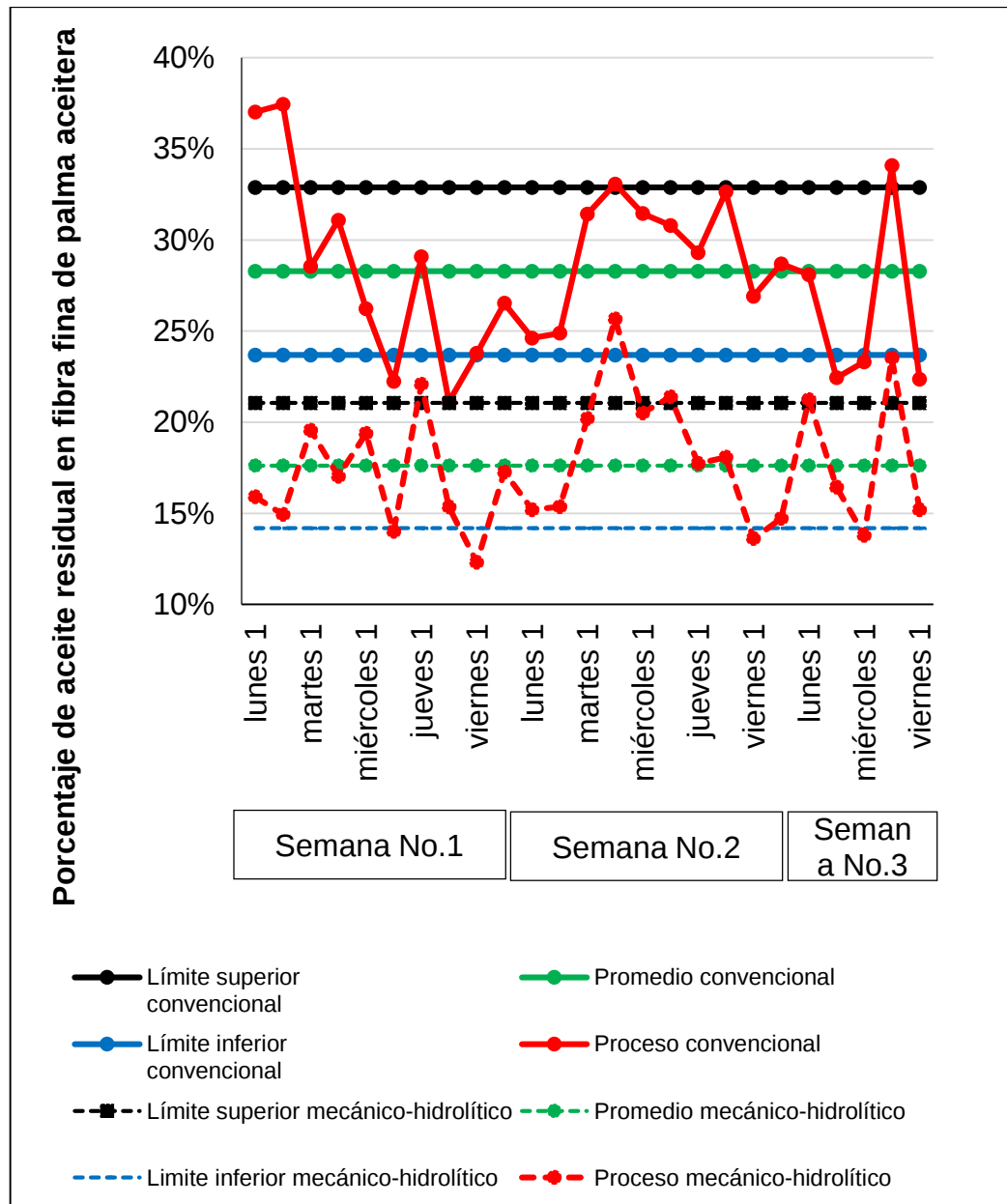
Fuente: elaboración propia.

Figura 11. Diagrama de Shewhart de resultados de residuales de aceite crudo de palma en fibra fina procedente del proceso extractivo mecánico-hidrolítico



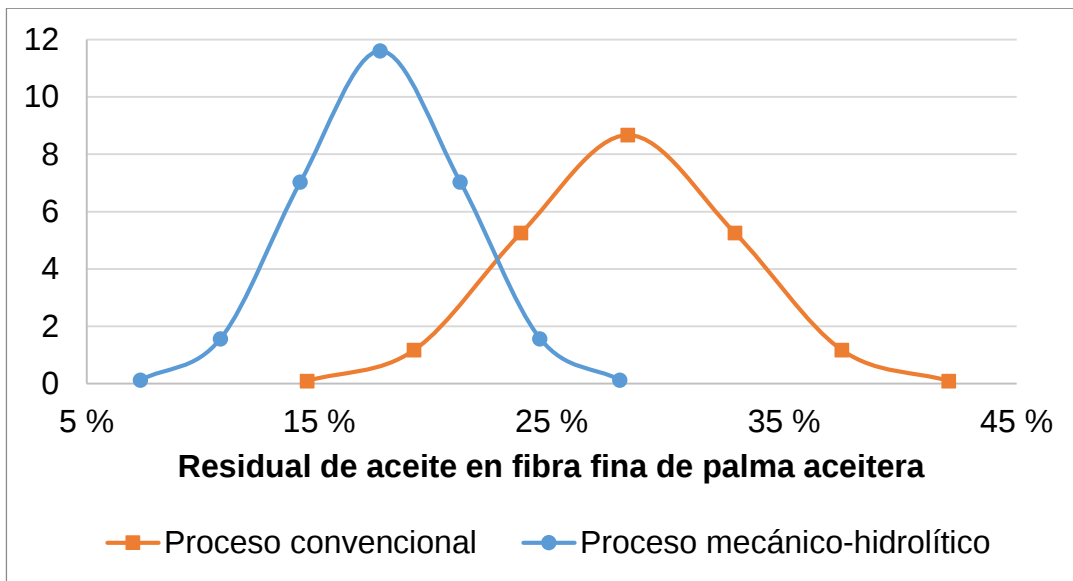
Fuente: elaboración propia.

Figura 12. Comparación de diagramas de Shewhart de resultados de residuales de aceite crudo de palma en fibra fina procedente del proceso extractivo mecánico-convencional y del proceso extractivo mecánico-hidrolítico



Fuente: elaboración propia.

Figura 13. **Diagrama de distribución normal de resultados de residuales de aceite crudo de palma en fibra fina procedente del proceso extractivo mecánico-convencional y del proceso extractivo mecánico-hidrolítico**



Fuente: elaboración propia.

Tabla IV. **Resultados de análisis estadísticos**

Variable	Proceso mecánico-convencional	Proceso mecánico-hidrolítico
Promedio	28,29 %	17,62 %
Desviación estándar	4,60 %	3,44 %
Resultados prueba de hipótesis t de student		
	t prueba	t crítica
t student	9,29	-2,31
Resultados de análisis de varianza (ANOVA)		
	F del análisis	F crítico
F de Fisher	86,21	4,04

Fuente: elaboración propia.

5. INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS

El proceso de extracción mecánico-convencional en promedio presentó un 28,29 por ciento en peso de aceite crudo de palma residual en la fibra fina la cual es utilizada como combustible para las calderas de biomasa. Este porcentaje residual está influenciado por factores como la maduración de la fruta, el proceso de cocción de la fruta, el tiempo y temperatura de digestión de la fruta, la contra-presión utilizada en las prensas mecánicas de extracción y el estado físico de las piezas mecánicas de la prensa.

El proceso de extracción mecánico-hidrolítico en promedio presentó un 17,62 por ciento en peso de aceite crudo de palma residual en la fibra fina manteniendo constantes las condiciones en la maduración de fruta, cocción de fruta, tiempo y temperatura de digestión de la fruta, contra-presión en prensas mecánicas y el estado físico de las piezas mecánicas de la prensa.

Utilizando la prueba de hipótesis “t de student” se rechazó la hipótesis nula debido a que el valor “t” de la prueba fue mayor al valor “t” crítico, por lo tanto, se aceptó la hipótesis alternativa la cual indica que: es posible mejorar la recuperación de aceite residual en fibra fina proveniente del proceso convencional de digestión de fruta de palma aceitera al añadirle enzimas glucosidasas como coadyuvante a nivel laboratorio. Al comparar el comportamiento experimental de las gráficas de Shewhart se pudo observar que siempre los valores de aceite crudo de palma residual para el proceso mecánico-hidrolítico son menores al proceso mecánico-convencional presentando una diferencia promedio de 10,66 por ciento en peso.

Para verificar si la diferencia fue significativa entre el proceso mecánico-convencional y el proceso mecánico-hidrolítico se realizó un análisis de varianza (Anova) en el cual el valor “F” del análisis fue mayor que el valor “F” crítico.

Al comparar las gráficas de distribución normal para ambos métodos de extracción se pudo evidenciar que en el proceso mecánico-hidrolítico oscila en un rango de porcentaje de aceite crudo de palma residual en fibra fina menor al de la curva del proceso mecánico-convencional. Además, la amplitud de la curva del proceso mecánico-hidrolítico es mayor debido a que la desviación estándar es menor en comparación con la del proceso mecánico-convencional.

A nivel industrial, en la extractora en donde se realizó el estudio, diariamente se procesa en promedio 800 toneladas métricas (TM) de fruta de palma, de las cuales se extraen 96,00 TM de fibra fina correspondiente al 12,00 por ciento en peso de fruta de palma, de las 96,00 TM de fibra fina el 43,68 por ciento en peso en promedio es humedad por lo que el resto es fibra fina seca aceitosa correspondiente a 41,93 TM.

Teniendo en cuenta los porcentajes anteriormente descritos, a la fibra fina seca aceitosa le correspondería un total de 11,86 TM de aceite crudo de palma residual utilizando el proceso mecánico-convencional de extracción y 7,39 TM de aceite crudo de palma residual utilizando el proceso mecánico-hidrolítico propuesto, con lo cual diariamente se tendría una extracción extra promedio de 4,47 TM de aceite crudo de palma.

CONCLUSIONES

1. Fue posible hidrolizar la fruta de palma añadiendo enzimas glucosidasas al proceso de extracción mecánica-convencional sin necesidad de variar las condiciones del proceso.
2. Se aceptó la hipótesis alternativa que establece que: es posible mejorar la recuperación de aceite residual en fibra fina proveniente del proceso mecánico-convencional de digestión de fruta de palma aceitera al añadirle enzimas glucosidasas como coadyuvante a nivel laboratorio.
3. La extracción de aceite crudo de palma residual en la fibra fina obtenida de la fruta de palma utilizando el proceso mecánico-convencional fue de $28,29 \% \pm 4,60 \%$ en peso.
4. La extracción de aceite crudo de palma residual en la fibra fina obtenida de la fruta de palma utilizando el proceso mecánico-hidrolítico fue de $17,62 \% \pm 3,44 \%$ en peso.
5. Existe diferencia significativa en el análisis de varianza simple entre los resultados de recuperación de aceite crudo de palma residual del proceso mecánico-hidrolítico.

RECOMENDACIONES

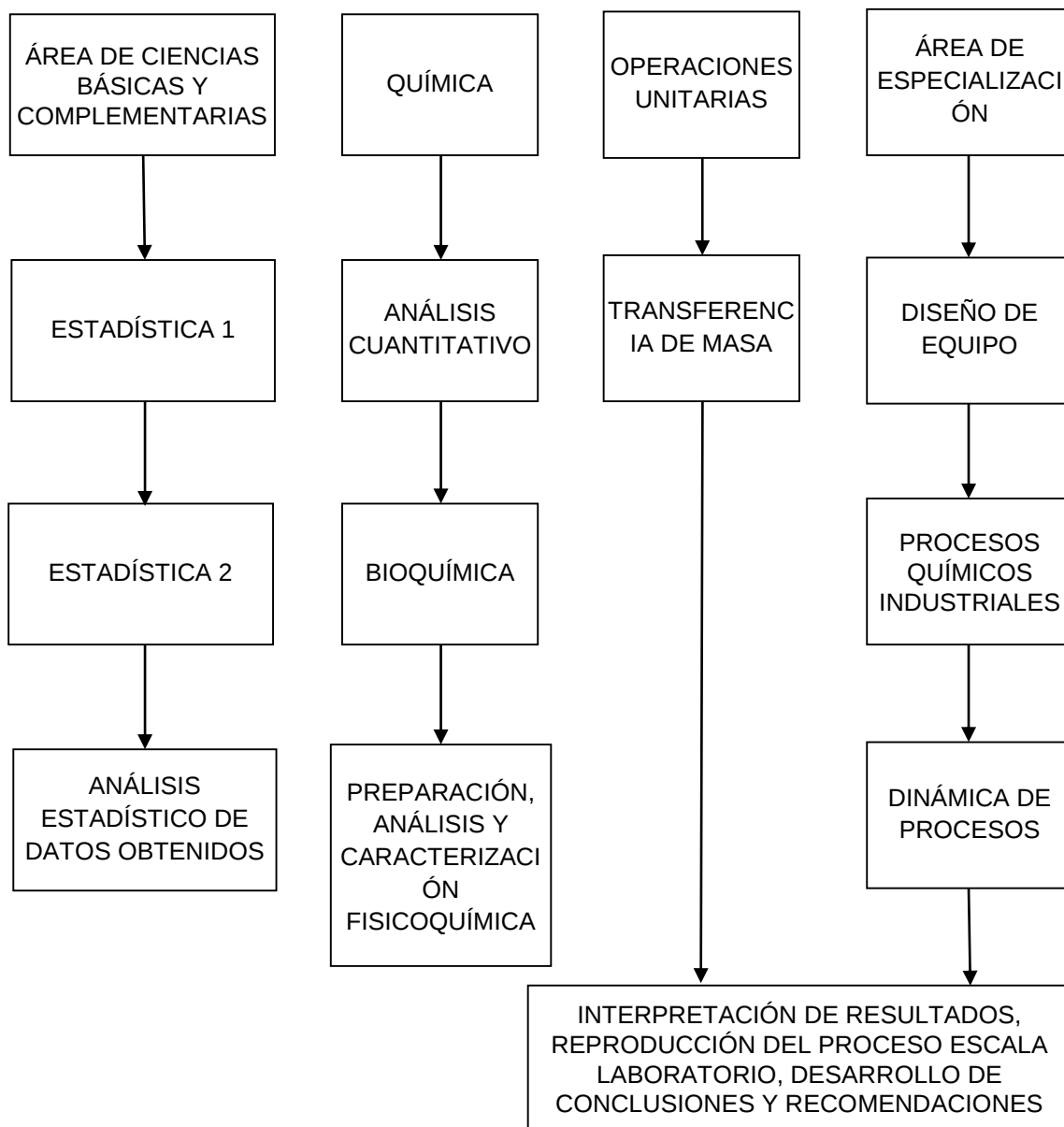
1. Realizar pruebas a escala laboratorio variando la temperatura de hidrolisis usando la misma concentración enzimática empleada en esta investigación, con el fin de determinar la temperatura óptima de digestión.
2. Realizar pruebas a escala laboratorio variando el tiempo de hidrolisis usando la misma concentración enzimática de esta investigación con el fin de determinar el tiempo óptimo de digestión.
3. Realizar pruebas a escala laboratorio empleando la temperatura y tiempo óptimos y variando las concentraciones de enzima por utilizar para determinar la concentración óptima para el proceso de extracción mecánico-hidrolítico.
4. Realizar caracterizaciones del aceite crudo de palma recuperado utilizando el proceso de extracción mecánico-hidrolítico.
5. Ubicar a escala industrial los resultados obtenidos a escala laboratorio y poder identificar los parámetros por modificar para lograr resultados óptimos en el proceso de extracción.

BIBLIOGRAFÍA

1. GUNSTONE, Frank D. *Vegetable Oils in Food Technology*. 2a ed. Reino Unido: Blackwell Publishing, 2002. 355 p.
2. HILDITCH, Thomas Percy.; WILLIAMS, Percy Noel. *The Chemical Constitution of Natural Fats*. 4a ed. Reino Unido: Chapman and Hall, 1964. 745 p.
3. MCKEE, Trudy; MCKEE, James R. *Bioquímica: las bases moleculares de la vida*. 4a ed. Estados Unidos de América: McGraw Hill, 2009. 736 p.
4. ROSSELL, J. Barry. *Analysis of Oilseeds, Fats and Fatty Foods*. Reino Unido: Elsevier Applied Science, 1991. 558 p.

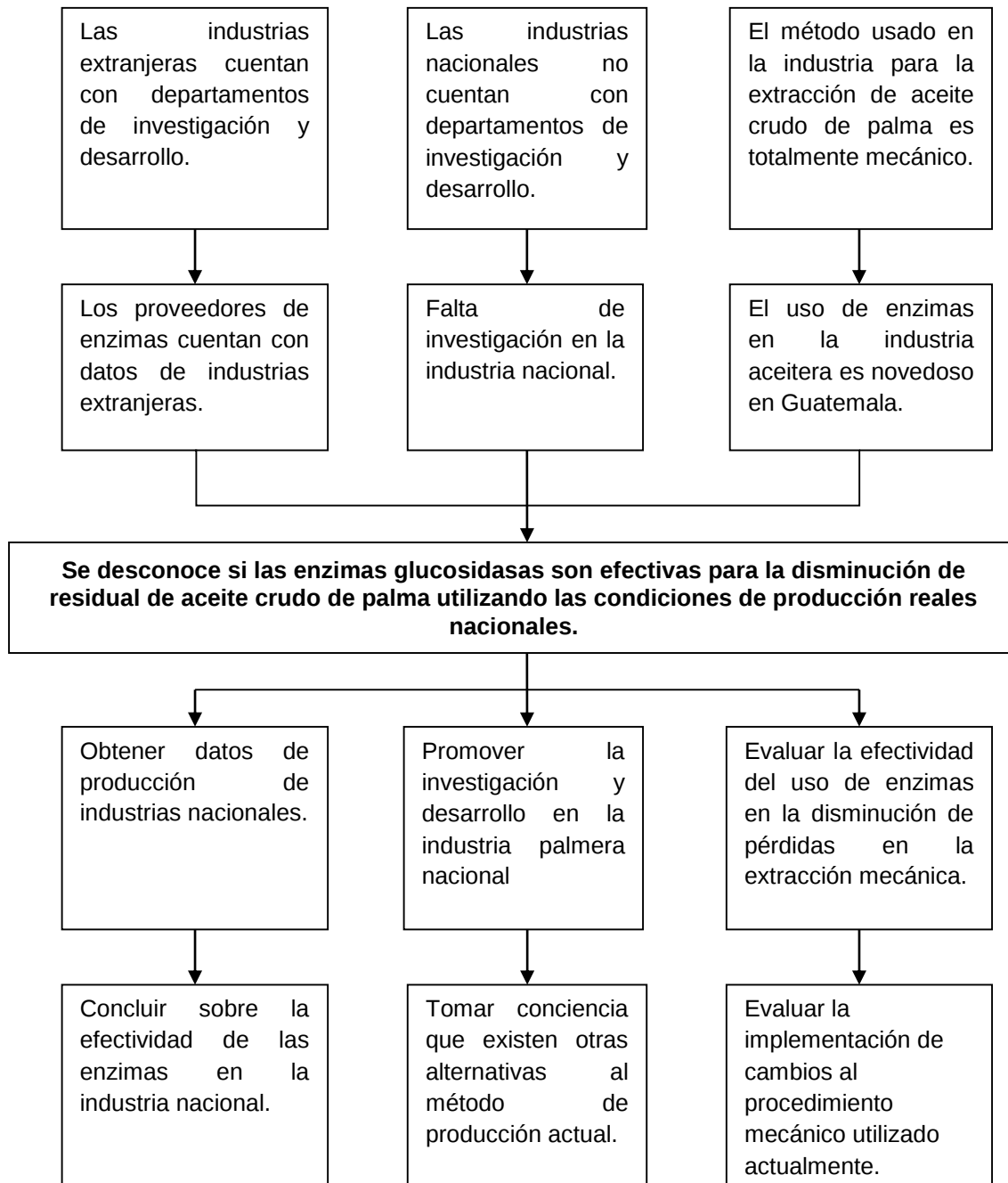
APÉNDICES

Apéndice 1. **Tabla de requisitos académicos**



Fuente: elaboración propia.

Apéndice 2. Árbol de problemas



Fuente: elaboración propia.