

**Procedimiento de extracción de palma africana por medio de método
seco y método húmedo en la planta de aceites ubicada en el Laboratorio
de Operaciones Unitarias**

UNIVERSIDAD DEL VALLE DE GUATEMALA

Facultad de Ingeniería

**Procedimiento de extracción de palma africana por medio de método
seco y método húmedo en la planta de aceites ubicada en el Laboratorio
de Operaciones Unitarias**

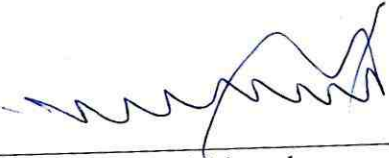
**Trabajo de investigación presentado por
Pedro Pablo Rossi Solís
para optar el grado académico de
Ingeniería Química**

Guatemala

2010

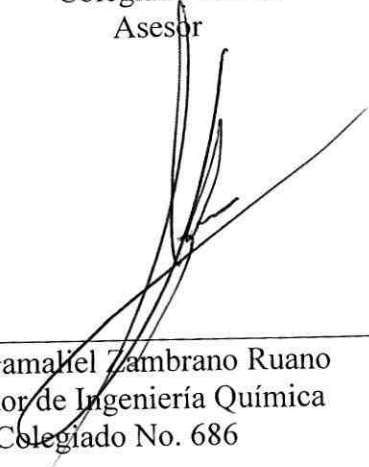
BIBLIOTECA
UNIVERSIDAD DEL VALLE DE GUATEMALA

Vo.Bo.:

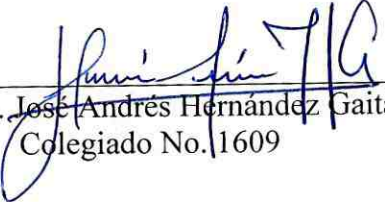
(f) 

Ing. Oscar Armando Maldonado
Colegiado No. 90
Asesor

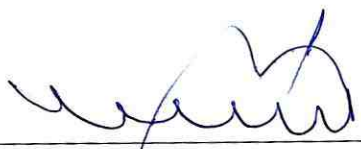
Tribunal:

(f) 

Ing. Gamaliel Zambrano Ruano
Director de Ingeniería Química
Colegiado No. 686

(f) 

Ing. José Andrés Hernández Gaitán
Colegiado No. 1609

(f) 

Ing. Oscar Armando Maldonado
Colegiado No. 90

Fecha de aprobación: 8 de Diciembre 2010

PREFACIO

El motivo de este trabajo de investigación se inició con el fin evaluar la extracción del aceite rojo de palma africana y determinar si los métodos empleados para la extracción son viables. Esto debido a que se hicieron estudios en el país, para determinar si Guatemala cuenta con la extensión territorial suficiente para el cultivo de palma africana y así lograr eliminar todas las importaciones de aceite de palma.

El aceite rojo de palma es la materia prima para muchas de las industrias de refinación de aceites debido por lo que fue necesario realizar este estudio para determinar si alguno de los métodos empleados para la extracción tiene algún beneficio.

Se agradece a la Universidad del Valle de Guatemala, en particular al Laboratorio de Operaciones Unitarias y personal por el apoyo en prestar sus instalaciones y por su ayuda económica en la realización de las pruebas. Así también se agradece al personal del Laboratorio de Alimentos y del Laboratorio de Instrumental Avanzado por el apoyo en prestar sus instalaciones para la realización de pruebas analíticas.

TABLA DE CONTENIDO

PREFACIO.....	v
LISTA DE CUADROS.....	viii
LISTA DE TABLAS.....	ix
LISTA DE FIGURAS.....	xi
LISTA DE IMÁGENES.....	xii
GLOSARIO.....	xiii
RESUMEN.....	xvii
ABSTRACT.....	xviii
I. INTRODUCCIÓN.....	1
II. ANTECEDENTES.....	3
A. Lípidos.....	3
B. Ácidos grasos saturados	3
C. Ácidos grasos insaturados	4
D. Propiedades químicas de los ácidos grasos	5
E. Triglicéridos	6
F. Palma.....	12
G. Aceite	15
H. Extracción.....	21
III. JUSTIFICACIÓN.....	33
IV. OBJETIVOS.....	35
A. Generales.....	35
B. Específicos	35
V. PROBLEMA A RESOLVER.....	36
VI. METODOLOGÍA	37
A. Secuencia de actividades.....	37
B. Equipo utilizado para la extracción de aceite de palma africana.....	37
C. Obtención de aceite rojo de palma a nivel planta piloto.....	38
D. Materiales y métodos para obtener el índice de acidez de los aceites.....	42

E.	Materiales y métodos para obtener el índice de peróxidos de los aceites	42
F.	Materiales y métodos para obtener el índice de yodo de los aceites	43
G.	Materiales y métodos para cromatografía de gases	45
VII.	RESULTADOS	46
VIII.	DISCUSIÓN DE RESULTADOS	61
A.	Extracción preliminar	61
B.	Esterilización y molienda de fruto de palma africana	61
C.	Método seco	64
D.	Método húmedo	67
E.	Método húmedo con arrastre de vapor	70
F.	Comparación de métodos	71
IX.	CONCLUSIONES	73
X.	RECOMENDACIONES	75
XI.	BIBLIOGRAFÍA	76
XII.	APÉNDICE	78
A.	Datos originales	79
B.	Cálculos de muestra	81
C.	Datos calculados	89
D.	Análisis de error	92
E.	Imágenes	93

LISTA DE CUADROS

Cuadro No.	Página No
Cuadro 1: Ácidos grasos saturados más comunes.....	4
Cuadro 2: Ácidos grasos insaturados más comunes en alimentos.....	5
Cuadro 3: Composición de triglicéridos en el aceite de palma	7
Cuadro 4: Triglicéridos y su forma polimórfica.....	7
Cuadro 5: Promedio de ácidos grasos y triglicéridos (% en peso) en manteca de cacao, cebo y cebo de Borneo (sustituto de manteca de cacao).....	8
Cuadro 6: Características del aceite rojo de palma.....	16
Cuadro 7: Composición típica de triglicéridos en el aceite rojo de palma	17
Cuadro 8: Características de una aceite rojo de palma de excelente calidad.....	20
Cuadro 9: Porcentaje de exceso de soda caustica para el proceso de refinación química	27

LISTA DE TABLAS

Tabla No.	Página No
Tabla 1: Balance de materia para los procesos de esterilización y molienda de fruto de palma	46
Tabla 2: Balance de energía para los procesos de esterilización y molienda del fruto de palma	46
Tabla 3: Porcentaje de rendimiento en peso para la extracción de aceite rojo de palma empleando el método seco.....	46
Tabla 4: Balance de energía para la extracción de aceite rojo de palma, empleando el método seco.	47
Tabla 5: pruebas de caracterización de aceites realizadas para la muestra del aceite extraído empleando el método seco.....	48
Tabla 6: Composición de ácidos grasos en muestra de aceite extraído con método seco.	49
Tabla 7: Porcentaje de rendimiento en peso para la extracción de aceite rojo de palma empleando el método húmedo.....	49
Tabla 8: Balance de energía para la extracción de aceite rojo de palma, empleando el método húmedo.	49
Tabla 9: pruebas de caracterización de aceites realizadas para la muestra del aceite extraído empleando el método húmedo.....	49
Tabla 10: Composición de ácidos grasos en muestra de aceite extraído con método húmedo.....	52
Tabla 11: Porcentaje de rendimiento en peso para la extracción de aceite rojo de palma empleando variante de método húmedo, por medio de arrastre de vapor.....	56
Tabla 12: Balance de energía para la extracción de aceite rojo de palma, empleando variante de método húmedo, por medio de arrastre de vapor.....	56
Tabla 13: Balance de masa para la extracción preliminar de aceite rojo de palma africana.....	57
Tabla 14: Peso de la fruta de palma antes de la esterilización.....	79
Tabla 15: Peso después de molida la fruta	79
Tabla 16: consumo de energía.....	79
Tabla 17: Análisis de ácidos grasos libres para muestras de aceite extraído con método seco y húmedo	80
Tabla 18: Análisis de índice de peróxidos para muestras de aceite extraído con método seco y húmedo	80
Tabla 19: Análisis de índice de yodo para muestras de aceite extraído con método seco y húmedo	80
Tabla 20: Balance de materia del proceso de esterilización y molienda de aceite rojo de palma africana....	89
Tabla 21: Porcentajes de productos obtenidos después de la molienda del fruto de palma africana.....	89
Tabla 22: Volumen de diesel utilizado para la esterilización y calentamiento de agua	89
Tabla 23: Balance de energía del proceso de extracción de aceite rojo de palma para los tres diferentes métodos empleados.....	89
Tabla 24: Porcentaje de rendimiento para los tres diferentes métodos empleados para la extracción de aceite rojo de palma	89

Tabla 25: Pruebas de caracterización para las muestras tomadas de los dos distintos lotes de aceite.....	90
Tabla 26: Costos de operación para los distintos métodos de extracción de aceite de palma	90
Tabla 27: Costo de operación por kilogramo de producto terminado	90
Tabla 28: Volumen de aceite producido para cada uno de los diferentes métodos empleados para la extracción.	90
Tabla 29: Costo del galón de aceite para cada uno de los diferentes métodos empleados.	90
Tabla 30: Costo de pruebas de caracterización	90
Tabla 31: Costo del galón de aceite crudo analizado con las pruebas de caracterización (suponiendo una producción de 1,000 gal).....	91

LISTA DE FIGURAS

Figura No.	Página No
Figura 1: Tipos de ácidos grasos insaturados	4
Figura 2: Arreglo de β' y β para triglicéridos saturados, para la red cristalina	8
Figura 3: Cromatografía de gases de la solución estándar A.....	9
Figura 4: Cromatografía de gases de una muestra que contiene los siguientes estándares cromatográficos: palmitato, oleato de metilo, DL- α palmitina, dipalmitina y tripalmitina y tricaprina como estándar interno. 10	10
Figura 5: Cromatograma de la mezcla reaccionante de la reacción de metanólisis del aceite de palma. Relación molar metanol/aceite 6:1, catalizador 0.5% NaOH, temperatura 50° C	10
Figura 6: Cromatograma de la mezcla reaccionante de la reacción de etanólisis del aceite de palma. Relación molar etano/aceite 6:1, catalizador 0.5% NaOH, temperatura 60° C.	11
Figura 7: Inflorescencias de palma africana a) Inflorescencia masculina, b) inflorescencia femenina	13
Figura 8: Partes del fruto de palma africana.....	14
Figura 9: Fruto de palma africana, ya cortado.....	15
Figura 10: Diagrama de bloques del refinado de aceite	24
Figura 11: Diagrama de bloques del proceso de desgomado de aceite	26
Figura 12: Diagrama de bloques de la refinación química de aceites	28
Figura 13: Diagrama de bloques del proceso de blanqueo para los aceites.....	31
Figura 14: Diagrama de bloques para la extracción del aceite rojo de palma africana con método seco.....	38
Figura 15: Diagrama de bloques para la extracción del aceite rojo de palma africana con método húmedo	40
Figura 16: Cromatograma para la muestra tomada del lote de aceite extraído con método seco.....	50
Figura 17: Cromatograma para la muestra tomada del lote de aceite extraído con método húmedo	53
Figura 18: Diagrama de flujo del proceso de extracción de aceite rojo de palma africana, con el método húmedo.....	58
Figura 20: Diagrama de flujo del proceso de extracción de aceite rojo de palma africana, con el método seco	60

LISTA DE IMÁGENES

Imagen No.	Página No
Imagen 1: Molienda de fruto de palma africana, empleando prensa continua (Expeller)	47
Imagen 2: Prensado de manteca, utilizando prensa hidráulica	48
Imagen 3: Extracción de aceite rojo de palma empleando el método húmedo.....	52
Imagen 4: Extracción de aceite de rojo de palma empleando la variante del método húmedo por arrastre de vapor.....	56
Imagen 5: Plantación de Palma Africana en Finca Buena Vista	93
Imagen 6: Planta extractora de aceite crudo de palma africana, en finca Buena Vista	94
Imagen 7: Pesado de fruto de palma africana en Finca Buena Vista.....	94
Imagen 8: Fruto de palma africana.....	95
Imagen 9: Fibra y kernel extraídos en el proceso de molienda	96
Imagen 10: Manteca obtenida después de haber prensado el fruto de palma.....	97
Imagen 11: Prueba de índice de peróxidos.....	98
Imagen 12: Preparación de muestras para caracterización de aceites.	99
Imagen 13: Producción de palma africana en Guatemala	100
Imagen 14: Producción de palma africana en Guatemala	100
Imagen 15: Superficie cultivada de Palma Africana, por departamento y por municipio	101

GLOSARIO

- Ácidos Grasos

Es una biomolécula orgánica de naturaleza lipídica formada por una larga cadena hidrocarbonada lineal, de número par de átomos de carbono, en cuyo extremo hay un grupo carboxilo. En general (aunque a veces no), podemos escribir un ácido graso genérico como R-COOH, en donde R es la cadena hidrocarbonada que identifica al ácido en particular.

- Adsorbentes

Polvo insoluble, dividido en forma muy fina, inerte y que es capaz de adsorber impurezas y otras sustancias en su extensa área superficial.

- Carotenoides

Son pigmentos orgánicos que se encuentran de forma natural en plantas y otros organismos fotosintéticos como algas, algunas clases de hongos y bacterias. Su color, varía desde amarillo pálido, pasando por anaranjado, hasta rojo oscuro.

- Configuración

Forma tridimensional de una molécula en cualquier instante dado, suponiendo que no hay rotación de enlaces sencillos.

- Cromatograma

Es el resultado gráfico de la cromatografía. En el caso de separación óptima, los diferentes picos o manchas del cromatograma se corresponden a los componentes de la mezcla separada. En el eje X se representa el tiempo de retención, y en el eje Y una señal (obtenida, por ejemplo, a partir de un espectrofotómetro, un espectrómetro de masas o cualquier otro de los diversos detectores) correspondiente a la respuesta creada por los diferentes analitos existentes en la muestra. En el caso de un sistema óptimo, la señal es proporcional a la concentración del analito específico separado.

- Desgomado

La operación de desgomado consisten en hacer reacciona el aceite crudo con una solución caliente de acido fosfórico que precipita las gomas.

- Desodorización

Operación de remover el olor y el sabor del aceite después de haber pasado por la refinación.

- Digestión

Operación donde el fruto es depositado en un cilindro llamado digestor el cual presenta unas paletas en las cuales va a macerar el fruto por medio de la agitación circular, además se le aplica vapor a 45 psi, esto ayuda a que las células de aceite se desprendan del fruto y la recuperación del aceite en el momento del prensado sea eficiente

- Estearina

Es un gliceril éster de ácido esteárico, derivado de la grasa animal y vegetal creada como producto derivado del procesamiento de grasas y aceites. Es utilizado como cebo en la manufactura de velas y jabón.

- Expeller

Un Expeller es una máquina de tipo tornillo que prensa las semillas oleaginosas a través de una cavidad en forma de jaula. Las materias primas entran al principio de la prensa los residuos salen al final. La máquina utiliza la fricción y la presión continua de las unidades del tornillo para mover y comprimir las semillas. El aceite pasa a través de pequeñas aberturas que no permiten que las semillas ni la fibra pase.

Fraccionamiento

Operación de separar una solución en sus diferentes componentes a los cuales se les denomina fracciones.

- Grados Baume (Be)

Una escala usada en la medida de las concentraciones de ciertas soluciones (jarabes, ácidos). La graduación de un areómetro en grados Baumé se establece en referencia a una disolución acuosa de cloruro de sodio (NaCl) al 10% en masa y agua destilada. Se marca el valor 0 para el agua destilada y el valor 10 para la disolución al 10%, y se divide el espacio entre ambos en 10 grados Baumé. La escala se puede alargar por abajo para líquidos menos densos que el agua destilada ($\rho=1 \text{ g/cm}^3$). Para líquidos más densos que el agua la escala es un poco diferente: se mantiene el valor 0°Bé para el agua destilada y se pone el valor 15°Bé cuando el areómetro está dentro de una disolución al 15% de cloruro de sodio. Esto hace que las dos escalas no se correspondan; por ejemplo los 25°Bé (densidad alta) no coinciden con los 25°Bé (densidad baja). Por esta razón se la considera una escala confusa y que debe eliminarse.

- Índice de Peróxidos:

Es una medida de los productos iniciales de la oxidación lipídica e indica el estado actual de la oxidación de un aceite, como los peróxidos pueden descomponerse y formar otros productos antes de la determinación, debe tenerse cuidado al interpretar los datos del índice de peróxidos.

- Índice de Yodo

Es el número de gramos de yodo que reaccionan con 1 gramo de lípidos, y es una medida del promedio de insaturaciones que contienen los aceites y las grasas.

- Inflorescencia

Es la disposición de las flores sobre las ramas o la extremidad del tallo; su límite está determinado por una hoja normal. Los órganos constitutivos de las inflorescencias plurifloras son las flores provistas o no del pedicelo, el eje o receptáculo común, el pedúnculo y las brácteas. El pedicelo es la parte del tallo que sostiene la flor; a veces es muy corto, y otras veces es nulo, en cuyo caso la flor se dice sentada o sésil. El eje o raquis es la parte alargada del tallo que lleva las ramas floríferas; si es corto y está ensanchado en forma de plato se llama receptáculo común. El pedúnculo, es la parte del tallo que soporta el raquis o el receptáculo común. El eje que sale de la base arrosada de la planta o de un órgano subterráneo se llama escapo

- Kernel

Se refiere al núcleo de las frutas, es decir la semilla.

- Lipaza

Enzimas que atacan el aceite y lo desdoblan los triglicéridos en ácidos grasos libres

- Neutralización

Consiste en hacer reaccionar los ácidos grasos libres presentes en el aceite crudo con NaOH en solución, produciéndose lo que se denomina jaboncillo en el cual además de las sales neutras de sodio de los diferentes ácidos grasos

- Oleína

La oleína es la fracción líquida del aceite, que está compuesta principalmente por triglicéridos con alto contenido en ácido graso oleico.

- Porcentaje de Acidez

Respecto a la acidez es importante saber que el grado de acidez no se refiere a lo que la palabra ácido significa normalmente. Como parámetro químico, la acidez se refiere a la proporción de ácidos grasos libres que contiene el aceite, expresada en grados.

- Rancidez

Fenómenos complejos que sufren las grasas y aceites, por la acción del aire, el agua y las bacterias. Ocurren reacciones de hidrólisis lentas, catalizadas por enzimas, que dan lugar a la formación de aldehídos y cetonas. El oxígeno del aire ataca a los dobles enlaces y, en un proceso progresivo, termina por romper la cadena de carbonos produciendo compuestos de mal olor. En la manteca, esta alteración provoca la aparición del ácido butírico o butanóico, causante del sabor y del olor que toma esta sustancia cuando se altera.

- Triglicéridos

Son los acilglicéridos más abundantes en la naturaleza y los principales constituyentes de todas las grasas y los aceites.

- Tocoferoles

Vitaminas liposolubles que actúan como antioxidantes. Protege el tejido corporal o aceites del daño causado por sustancias inestables llamadas radicales libres.

RESUMEN

Este trabajo de investigación tiene como objetivo presentar el estudio sobre la extracción y caracterización del aceite de fruto de palma, a nivel de planta piloto en el Laboratorio de Operaciones Unitarias de la Universidad del Valle de Guatemala. Las pruebas de caracterización fueron realizadas en el Laboratorio de Alimentos y la cromatografía de gases fue realizada en el Laboratorio de Instrumental Avanzado de la Universidad del Valle de Guatemala.

Los métodos utilizados para la extracción fueron dos, método seco y método húmedo, además se trabajó una variante del método húmedo, siendo ésta con arrastre de vapor. Los tres métodos contaron con dos etapas en común que fue la esterilización y la molienda del fruto de palma africana. Con el método seco se trató de extraer el aceite por medio de una prensa hidráulica y un medio filtrante, que fueron dos bolsas de gabardina. Con el método húmedo se extrajo el aceite añadiéndole agua caliente a la manteca, reduciendo la viscosidad del aceite, logrando que se separe de la manteca y que flote el aceite por diferencia de densidades; por último con una variante de este método se le aplicó vapor a la manteca contenida en una bolsa de gabardina, y por arrastre de vapor el aceite se filtró.

Se encontró que el rendimiento de la extracción de aceite de palma varió para cada uno de los métodos empleados, para el método seco se obtuvo un porcentaje de rendimiento global de $6.9 \pm 0.70\%$ (en peso), siendo éste el método el más ineficiente, con el método húmedo se obtuvo un porcentaje de rendimiento global de $12.5 \pm 0.44\%$ (en peso), y para la variante del método húmedo (Método húmedo con arrastre de vapor) se obtuvo un porcentaje de rendimiento global de $15.8 \pm 0.19\%$ (en peso), siendo esta variante del método húmedo, la más eficiente (en relación a la materia prima utilizada) de los dos métodos ensayados.

Para poder analizar las muestras fue necesario separar el aceite obtenido por los diferentes métodos empleados. Las muestras tomadas para realizar el análisis de ácidos grasos fueron preparadas con el método de saponificación, con el fin de lograr romper los triglicéridos en ácidos grasos libres. Por medio del cromatograma obtenido con la técnica de cromatografía de gases se tuvo que el aceite que se extrajo con el método seco contiene 48.31% de ácidos grasos saturados y 50.96% de ácidos grasos insaturados, además se observa en el cromatograma 0.73% de otros compuestos. En el cromatograma del aceite que se extrajo con el método húmedo se tiene 44.02% de ácidos grasos saturados y 53.53% de ácidos grasos insaturados, además se observó 1.02% de metil-tetradecanoato y 1.43% de otros compuestos.

ABSTRACT

This research work aims to present the study on the extraction and characterization of palm oil, on a pilot plant in the Unit Operations Laboratory of the Universidad del Valle de Guatemala. Characterization tests were conducted at the Laboratory of Food and gas chromatography was performed at the Advanced Instrumentation Laboratory of the Universidad del Valle de Guatemala.

The methods used for the extraction were two; dry method and wet method and a variant of the wet method, with the steam drag. The three methods together have two processes in common that were the sterilization and milling of palm fruit. With the dry method is tried to extract the oil through a hydraulic press and a filter media, which were two raincoat bags. With the wet method the oil was extracted, reducing oil viscosity, by adding hot water making the oil to separate and float, and finally with a variant of this method oil was extracted by adding steam to the shortening contained in a raincoat bag.

It was found that the yield of palm oil extraction varied for each of the methods used. For dry method the total yield was of $6.9 \pm 0.70\%$ (w/w), being the least efficient, the wet method has a total yield of $12.5 \pm 0.44\%$ (w/w), and the variable of the wet method had a overall yield of $15.8 \pm 0.19\%$ (w/w), being this variant of the wet method, the most efficient (relative to the raw material used) of the two methods tested.

To analyze the samples was necessary to separate the oil obtained by different methods. The samples for fatty acid analysis were prepared from the saponification method, in order to break the triglycerides into free fatty acids. Through the chromatogram obtained with gas chromatography technique it is known that the oil extracted with the dry method contains 48.31% saturated fatty acids and 50.96% of unsaturated fatty acids, and 0.73% from other compounds. In the chromatogram of the oil extracted with the wet method it is shown that it contains 44.02% of saturated fatty acids and 53.53% of unsaturated fatty acids, it also contained 1.02% of methyl-tetradecanoate and 1.43% of other compounds.

I. INTRODUCCIÓN

El aceite de palma africana, es uno de los aceites más utilizados debido al alto contenido de aceite que tiene dicha planta, además de la palma se extraen dos tipos de aceite el del fruto y el del kernel que es un aceite muy valioso para la industria de cosméticos. El aceite de palma contiene igual porcentaje de ácidos grasos saturados e insaturados, y tiene un alto contenido de glicérido lo cual lo hace un aceite semisólido.

El cultivo de palma africana en Guatemala ha pasado a ser uno de los cultivos con mayor importancia, ya que es la planta con frutas oleaginosas con mayor contenido de aceite y mayor rendimiento de aceite por unidad de área (5 ton/ha año), además en Guatemala se cuenta con microclimas que son ideales para la producción de palma africana por lo que es la única planta aceitera que se cultiva.

El aceite rojo de palma es la materia prima para muchas de las industrias de refinación de aceites, ya que el aceite de palma crudo no está en la dieta de los consumidores, debido a que se acostumbra a basar su dieta en aceites con bajo color e inodoros, además la refinación aumenta la vida útil del aceite de palma. Éste no es el caso del aceite rojo de palma que es utilizado para la fabricación de biocombustibles y algunos otros productos derivados de los aceites y grasas.

En este trabajo de investigación se extrajo el aceite rojo de palma con dos diferentes métodos, método seco y método húmedo, además se probó una variante del método húmedo con arrastre de vapor. Se estudió los factores que fueron determinantes para el rendimiento de cada uno de los métodos y se realizaron pruebas de caracterización a los aceites obtenidos con los dos diferentes métodos. La extracción de aceite rojo de palma con los dos distintos métodos y su variante del método húmedo fueron realizadas en la planta piloto del Laboratorio de Operaciones Unitarias de la Universidad del Valle de Guatemala. Las pruebas de caracterización de aceites fueron realizadas en el laboratorio de alimentos de la Universidad del Valle de Guatemala y las pruebas cromatográficas fueron realizadas en el laboratorio de Análisis Instrumental Avanzado de la Universidad del Valle de Guatemala.

Las pruebas de caracterización realizadas a los aceites fueron las de porcentaje de acidez y el índice de peróxidos, para determinar si el aceite obtenido cumple con los parámetros que requiere una refinadora de aceite de palma. Las pruebas de ácidos grasos presentes en el aceite fueron hechas con la técnica de Cromatografía de gases, con el fin de determinar los porcentajes de ácidos grasos en las diferentes muestras y establecer si hay variaciones en los aceites extraídos con los dos diferentes métodos empleados.

Para el trabajo de investigación se realizó un estudio de costos, el cual ayudó a demostrar que método es más económico, además de brindar un costo del galón de aceite rojo de palma producido. Este estudio demuestra la importancia de un buen rendimiento en la extracción, ya que de no tener un buen rendimiento los costos se elevan haciendo el método menos eficiente.

II. ANTECEDENTES

A. Lípidos

Los lípidos se clasifican en dos tipos generales: los que son semejantes a las grasas y las ceras, los cuales contienen enlaces éster y pueden ser hidrolizados, y los que son semejantes al colesterol y otros esteroides, los cuales no tienen enlaces éster y no pueden ser hidrolizados (McMurry, 2004).

Las grasas animales y los aceites vegetales son lípidos que se encuentran con mayor abundancia en la naturaleza. Aunque ellos parecen diferentes, las grasas animales como la mantequilla y la manteca son sólidas, mientras que los aceites vegetales como el de maíz y el de cacahuate son líquidos, sus estructuras están estrechamente relacionadas. Desde el punto de vista químico, las grasas y los aceites son triglicéridos (triesteres) del glicerol con tres ácidos carboxílicos de cadena larga. La hidrólisis de una grasa o un aceite con NaOH acuoso produce glicerol y tres ácidos grasos. En general, los ácidos grasos son ramificados y contienen un número par de átomos de carbono, entre 12 y 20. Si hay dobles enlaces, por lo general tienen una geometría Z (cis) (McMurry, 2004).

B. Ácidos grasos saturados

Varían de 4 a 26 átomos de carbono y su temperatura o punto de fusión aumenta con el peso molecular o largo de la cadena; así, los de C₄ a C₈ son líquidos a 25° C, mientras que los de C₁₀ en adelante son sólidos, y su solubilidad en el agua es inversamente proporcional al peso molecular. El ácido palmítico, que se encuentra en la palma, y el ácido esteárico son los ácidos grasos saturados más abundantes. Los ácidos grasos saturados son mucho más estables a la oxidación; sin embargo, en condiciones de temperatura más alta (más de 180° C), como llega a suceder en el freído, y en presencia de oxígeno, pueden sufrir reacciones oxidativas (Badui, 2006).

Cuadro 1: Ácidos grasos saturados más comunes

Nombre trivial	Nombre científico	Fórmula	Punto de fusión (°C)	Punto de ebullición (°C)
Butírico	Butanoico	$\text{CH}_3(\text{CH}_2)_2\text{COOH}$	-5.9	164
Caproico	Hexanoico	$\text{CH}_3(\text{CH}_2)_4\text{COOH}$	-3.4	206
Caprílico	Octanoico	$\text{CH}_3(\text{CH}_2)_6\text{COOH}$	16.7	240
Cáprico	Decanoico	$\text{CH}_3(\text{CH}_2)_8\text{COOH}$	31.6	271
Láurico*	Dodecanoico	$\text{CH}_3(\text{CH}_2)_{10}\text{COOH}$	44.2	130
Mirístico*	Tetradecanoico	$\text{CH}_3(\text{CH}_2)_{12}\text{COOH}$	54.4	149
Palmítico*	Hexadecanoico	$\text{CH}_3(\text{CH}_2)_{14}\text{COOH}$	63.0	167
Estéarico*	Octadecanoico	$\text{CH}_3(\text{CH}_2)_{16}\text{COOH}$	69.4	184
Araquídico	Eicosanoico	$\text{CH}_3(\text{CH}_2)_{18}\text{COOH}$	76.0	204
Behénico	Docosanoico	$\text{CH}_3(\text{CH}_2)_{20}\text{COOH}$	79.9	—
Lignocérico	Tetracosanoico	$\text{CH}_3(\text{CH}_2)_{22}\text{COOH}$	84.2	—
Cerótico	Hexacosanoico	$\text{CH}_3(\text{CH}_2)_{24}\text{COOH}$	87.7	—

* Ácidos grasos saturados más comunes en alimentos.

(Badui, 2006)

C. Ácidos grasos insaturados

Debido a sus insaturaciones, estos compuestos tienen una gran reactividad química, ya que son propensos a la saturación y a transformaciones oxidativas y de isomerización. Son muy abundantes en los aceites vegetales y marinos. Los ácidos oleico y linoléico son los ácidos insaturados más abundantes. El ácido oleico es monoinsaturado, ya que solamente tiene un doble enlace; mientras que los ácidos linoléico, linolénico y araquidónico son ácidos grasos poliinsaturados, porque tienen más de un doble enlace (Badui, 2006).

Figura 1: Tipos de ácidos grasos insaturados



(Badui, 2006)

Los ácidos grasos insaturados tienen, por lo general, puntos de fusión más bajos que sus contrapartes saturadas; ésta es una tendencia que también se presenta en el caso de los triglicéridos. Debido a que, por lo general, en los aceites vegetales la proporción de ácidos grasos insaturados es más elevada que la de los ácidos grasos saturados, que en el caso de las grasas animales, ellos poseen puntos de fusión más bajos. La diferencia es una consecuencia de la estructura. Las grasas saturadas tienen una forma uniforme que les permite empacarse juntas eficientemente en un enrejado cristalino. Sin embargo, en los aceites vegetales insaturados, los dobles enlaces introducen vueltas y pliegues en las cadenas hidrocarbonadas, haciendo muy difícil la formación de cristales. Cuanto más dobles enlaces existan, más difícil será para la molécula que cristalicen y será más bajo su punto de fusión del aceite (McMurry, 2004).

La adición de un segundo doble enlace baja de nuevo el punto de fusión, y un tercer doble enlace lo baja todavía más. Los dobles enlaces trans tienen menor efecto sobre el punto de fusión que los dobles enlaces cis, ya que la geometría del doble enlace trans es semejante a la conformación en zigzag de un ácido saturado, y no dobla la cadena tanto como un doble enlace cis (Wade, 1993).

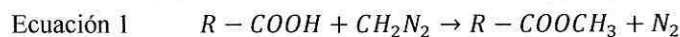
Cuadro 2: Ácidos grasos insaturados más comunes en alimentos

<i>Nombre trivial</i>	<i>Nombre científico</i>	<i>Fórmula</i>	<i>Punto de fusión (° C)</i>
Palmitoleico	Hexadeca-9-enoico	C ₁₅ H ₂₉ COOH	- 0.5
Oleico	Octadeca-9-enoico	C ₁₇ H ₃₃ COOH	13.0
Linoleico	Octadeca-9:12-dienoico	C ₁₇ H ₃₁ COOH	- 5.0
Linolénico	Octadeca-9:12:15-trienoico	C ₁₇ H ₂₉ COOH	-11.0
Araquidónico	Eicosa-5:8:11:14-tetraenoico	C ₁₉ H ₃₁ COOH	-49.5
Vaccénico	Octadeca-11-enoico	C ₁₇ H ₃₃ COOH	39.5
Gadoleico	Eicosa-11-enoico	C ₁₉ H ₃₇ COOH	23.5
Erúico	Docosa-13-enoico	C ₂₁ H ₄₀ COOH	38.0
Brasídico	Docosen-13-enoico	C ₂₁ H ₄₀ COOH	—
Cetoleico	Docosen-11-enoico	C ₂₁ H ₄₀ COOH	—

(Badui, 2006)

D. Propiedades químicas de los ácidos grasos

El grupo carboxilo tiene que ser despolarizado por metilación, para poder facilitar la cromatografía de gases o la destilación fraccionada. Para métodos analíticos se prefiere que la reacción se dé con diazometano. La hidrólisis da un compuesto gaseoso CH₂N₂ que es barrido por la corriente de nitrógeno, esta mezcla se pasa hasta el contenedor de la solución de ácidos grasos en éter metílico (Belitz, 2009).



Esta reacción se da a condiciones moderadas y no tiene subproductos, por lo que es de mucha confiabilidad. La cromatografía de gases también se puede hacer por medio de una esterificación de los

triglicéridos con un exceso de metanol, y en la presencia de un ácido de Lewis (BF_3) como catalizador; o la reacción de una sal de plata de un ácido graso con el yoduro de metilo (Belitz, 2009).

E. Triglicéridos

Son los acilglicéridos más abundantes en la naturaleza y los principales constituyentes de todas las grasas y los aceites, incluyendo el tejido adiposo de los mamíferos, ya que representan más del 95% de su composición. Las características físicas y químicas de los triacilglicéridos dependen del tipo, la concentración y la forma de distribución de sus ácidos grasos en las tres posiciones. Las posibles combinaciones de ubicación de los ácidos grasos en el glicerol son muy variadas; pero en la naturaleza no existe tan amplia variedad de ellos y, en este caso, el 67.5% corresponde a los disaturados palmítico-oleico-palmítico, palmítico-oleico-esteárico y esteárico-oleico-esteárico (Badui, 2006).

Existen ciertas tendencias naturales de distribución; en las grasas de origen animal, el palmítico y el esteárico están en las posiciones 1 y 3, mientras que la 2 contiene un insaturado; la excepción es la manteca de cerdo que concentra el palmítico en el carbono 2 el esteárico en el 1 y el linoléico y linolénico en el 3. En algunos aceites vegetales, los insaturados se presentan en la 2, mientras que los saturados se distribuyen entre la 1 y la 3, aunque esto no es una regla general (Badui, 2006).

Existe un número Z que da el número de diferentes posibilidades en que se pueden ordenar los ácidos grasos en el triglicérido, donde n es el número de ácidos grasos diferentes que pueden estar en el triglicérido (Belitz, 2009):

$$\text{Ecuación 2} \quad Z = \frac{n^3 + n^2}{2}$$

Para un triglicérido que solo puede tener 3 ácidos grasos hay 18 posibilidades de ordenamiento. Sin embargo, el caso en que el triglicérido solo pueda tener tres ácidos grasos distintos es muy raro en la naturaleza, la excepción es el Cebo de Borneo. El número Z también toma en cuenta los posibles isómeros que pueda tener el triglicérido, por ejemplo la combinación POE, PEO y EOP¹. Cuando solo se toma en cuenta la posición de los ácidos grasos surge el número Z' (Belitz, 2009):

$$\text{Ecuación 3} \quad Z' = \frac{n^3 + 3n^2 + 2n}{6}$$

Cada fracción de triglicéridos tiene una temperatura de fusión diferente, como por ejemplo, en el caso de la palma en que se han aislado seis grandes grupos mediante una cristalización controlada; el número de dichas fracciones depende de las condiciones de fraccionamiento (Badui, 2006).

¹ Esta es otra forma de nomenclatura para los triglicéridos donde solo se toma la primera letra de los ácidos grasos esenciales ejemplo: POS es un triglicérido que tiene en la primera posición a un ácido Palmítico, en la segunda posición un ácido Oleico y en la tercera posición un ácido esteárico.

Cuadro 3: Composición de triglicéridos en el aceite de palma

	Temperatura de fusión (°C)
Tripalmitina	65.0
Dipalmitoestearina	63.0
Dipalmitoleína	34.5
Oleopalmitoestearina	31.0
Palmitodioleína	18.0
Oleína y linoleína	15.0

(Badui, 2006)

1. Propiedades de cristalización. Las propiedades de cristalización de los triglicéridos (TG) se ven afectadas por la composición de los ácidos grasos y la distribución dentro de la molécula de glicérido. Los mono-, di- y triglicéridos son polimórficos al momento de cristalizar, y existen tres configuraciones en las cuales cristalizan denotadas como α , β' y β (Belitz, 2009).

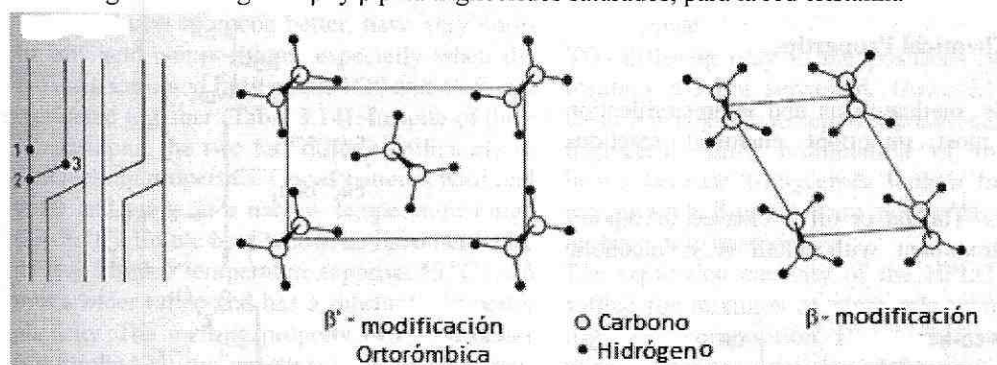
Cuadro 4: Triglicéridos y su forma polimórfica

Compuesto	Punto de Fusión de las formas polimórficas (°C)		
	α	β'	β
Triestearina	55	63.2	73.5
Tripalmitina	44.7	56.6	66.4
Trimiristirina	32.8	45	58.5
Trilaureína	15.2	34	46.5
Trioleína	-32	-12	4.5-5.7
1,2-Dipalmitooleína	18.5	29.8	34.8
1,3-Dipalmitooleína	20.8	33	37.3
1-Palmito-3-estero-2-oleína	18.2	33	39
1-Palmito-2-estero-3-oleína	26.3	40.2	
2-Palmito-1-estero-3-oleína	25.3	40.2	
1,2-Diacetopalmitina	20.5	21.6	42.3

(Belitz, 2009)

Estas formas difieren en sus puntos de cristalización. Durante el enfriamiento de los glicerolios fundidos, se da una de las tres configuraciones polimórficas. La configuración alfa es la que tiene el punto de cristalización más bajo, esta configuración es primero transformada en beta prima al ir añadiéndole calor y por último se transforma a la configuración beta, siendo esta la más estable de las tres configuraciones por lo que tiene el punto de cristalización más alto. Los ácidos grasos insaturados interfieren con la forma en que se empaquetan las moléculas en el cristal, causando que el punto de cristalización decrezca (Belitz, 2009).

Figura 2: Arreglo de β' y β para triglicéridos saturados, para la red cristalina



(Belitz, 2009)

2. Determinación de estructura. El análisis estructural de los triglicéridos es importante para poder entender la relación que existe entre las propiedades de cristalización, la estructura química y la consistencia. Un ejemplo de ello puede ser la composición entre la manteca de cacao y el cebo de res ya que poseen composiciones de ácidos grasos similares, debido a que sus dos ácidos grasos saturados principales son el 16:0 y el 18:0. A pesar de sus composiciones similares difieren en sus propiedades de punto de fusión, la cocoa es más dura y frágil y su rango de temperatura de punto de fusión es de (28-36° C), mientras que el cebo se funde a una temperatura más alta (45° C) y tiene una plasticidad dentro de un rango más amplio de temperatura. Las características de punto de fusión de la cocoa están controladas por los diferentes ordenamientos de los triglicéridos: SSS, SIS, SSI (Belitz, 2009).

Cuadro 5: Promedio de ácidos grasos y triglicéridos (% en peso) en manteca de cacao, cebo y cebo de Borneo (sustituto de manteca de cacao).

	Manteca de cacao	Sebo comestible	Sebo de Borneo
16:0	25	36	20
18:0	37	25	42
20:0	1		1
18:1 (9)	34	37	36
18:2 (9,12)	3	2	1
SSS ^b	2	29	4
SIS	81	33	80
SSI	1	16	1
SII	15	18	14
ISI		2	
III	1	2	1

^b S: saturados, I: ácidos grasos insaturados

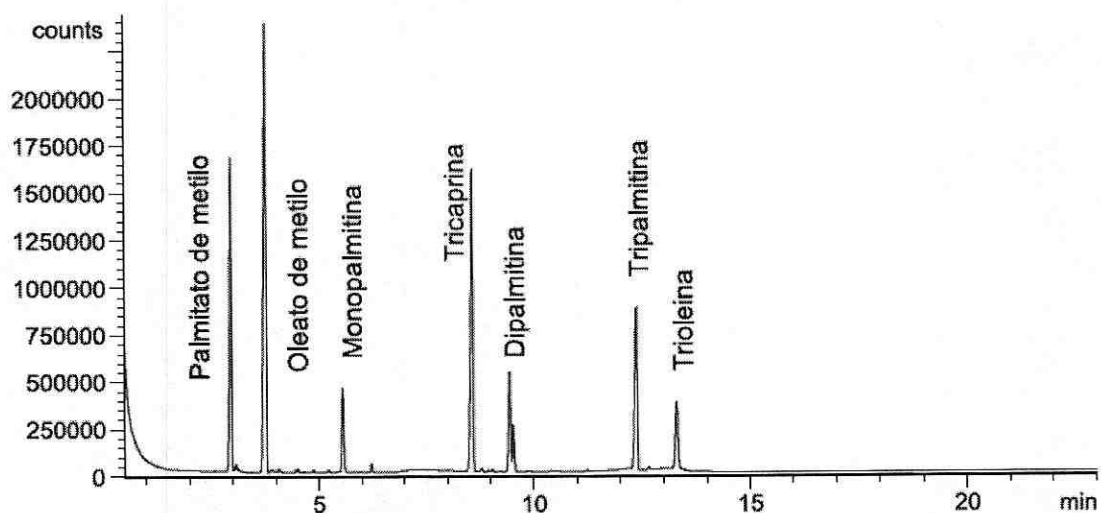
(Belitz, 2009)

La composición del Cebo de borneo es más parecida a la cocoa, incluso en la distribución de ácidos grasos en el triglicérido, por lo que el cebo es utilizado en muchas ocasiones como sustituto de la

cocoa. Para conocer la estructura de los triglicéridos se puede proceder a separarlos por una cromatografía líquida de alta eficiencia (HPLC). Sin embargo este tipo de cromatografía no puede ser aplicada para las grasas de plantas debida a su alta complejidad en la estructura de los triglicéridos (Belitz, 2009).

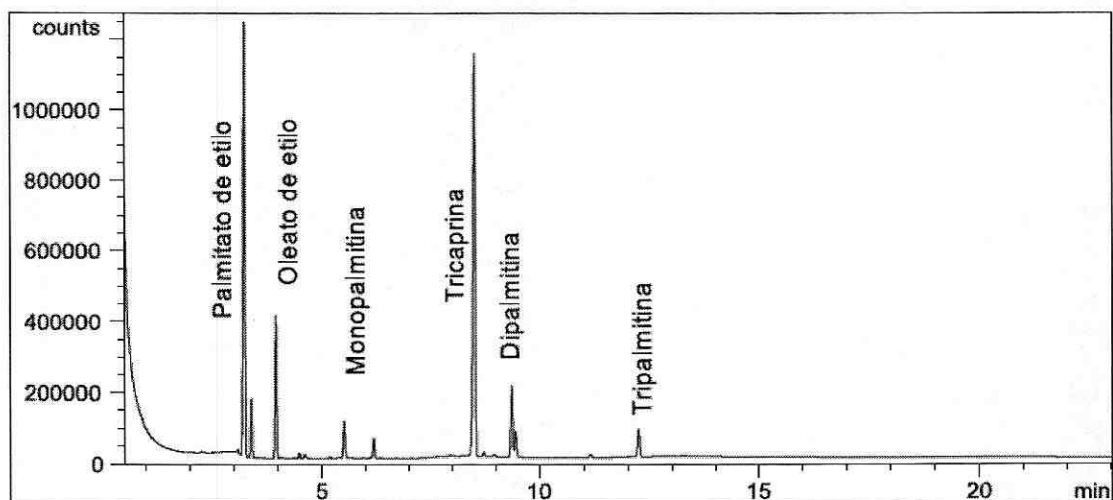
Para el análisis de los triglicéridos y ácidos grasos de una muestra de aceite vegetal se puede utilizar cromatografía de gases a alta temperatura. Esto se debe a que se deben evaporar los triglicéridos para que eluyan dentro de la columna. Para un análisis de aceite de palma se siguió el siguiente procedimiento: los primeros compuestos eluidos fueron los esteres metílicos, en su orden palmitato y oleato, seguidos por DL-amonopalmitina, tricaprina, dipalmitina, tripalmitina y trioleina, luego se eluyó la muestra de palma. Esto con el fin de tener un estándar con el cual comparar los diferentes picos (Narváez *et. al*, 2005).

Figura 3: Cromatografía de gases de la solución estándar A



(Narváez *et. al*, 2005)

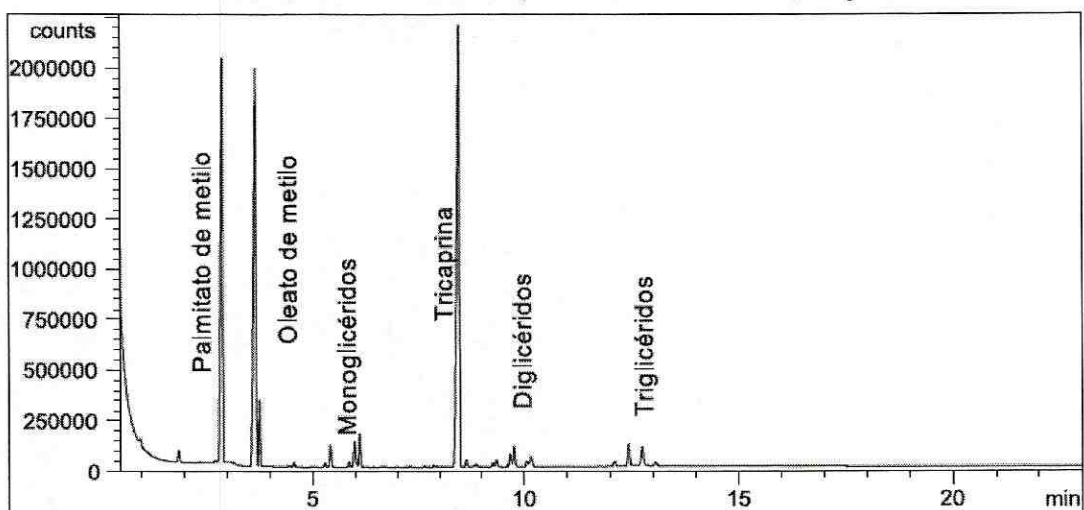
Figura 4: Cromatografía de gases de una muestra que contiene los siguientes estándares cromatográficos: palmitato, oleato de metilo, DL- α palmitina, dipalmitina y tripalmitina y tricaprina como estándar interno.



(Narváez *et. al.*, 2005)

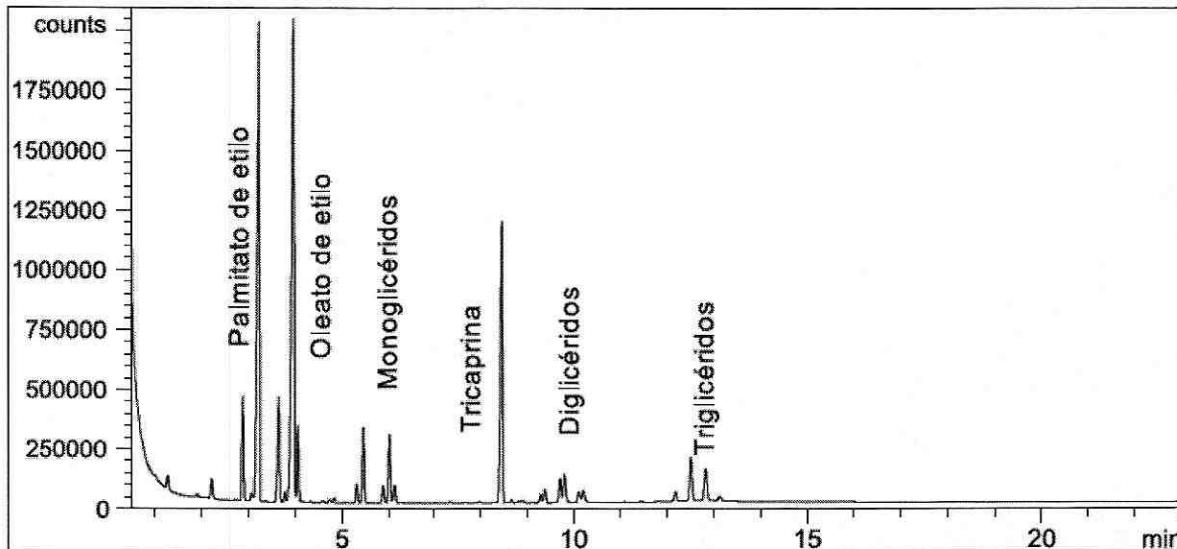
En la Figura 3 se muestran los esteres metílicos mientras que en la Figura 4 se muestran los esteres etílicos. Para los análisis cuantitativos se puede proceder a realizar calibraciones con diferentes soluciones y luego por medio de diferentes relaciones obtener la fracción en peso de cada uno de los triglicéridos, diglicéridos y monoglicéridos. El cromatograma de la muestra de palma es el siguiente (Narváez *et. al.*, 2005):

Figura 5: Cromatograma de la mezcla reaccionante de la reacción de metanólisis del aceite de palma. Relación molar metanol/aceite 6:1, catalizador 0.5% NaOH, temperatura 50° C



(Narváez *et. al.*, 2005)

Figura 6: Cromatograma de la mezcla reaccionante de la reacción de etanolisis del aceite de palma. Relación molar etano/aceite 6:1, catalizador 0.5% NaOH, temperatura 60° C.



(Narváez *et. al.*, 2005)

Para estos cromatogramas se debe tomar en cuenta que el aceite de palma utilizado ya estaba refinado, blanqueado y desodorizado grado comestible (Narváez *et. al.*, 2005).

3. Peroxidación de lípidos. La oxidación de los lípidos de los alimentos es una de las principales causas del deterioro de la calidad. La oxidación de lípidos (o peroxidación) provoca la aparición de sabores y olores desagradables, destruye las vitaminas sensibles y podría generar compuestos tóxicos. Si las condiciones son propicias, afecta a la mayoría de alimentos, incluso aquellos alimentos bajos en grasas. Los sabores y olores desagradables que se producen con frecuencia se caracterizan como “rancios”, de aquí el termino rancidez oxidativa.

Los ácidos grasos poliinsaturados son especialmente susceptibles a la peroxidación de los lípidos, debido a los dobles enlaces presentes en sus cadenas de hidrocarburo. Esto se debe a que la peroxidación de los lípidos se realiza a través de un mecanismo de radicales libres, y los ácidos grasos insaturados son particularmente susceptibles a ser atacados por dichos radicales.

F. Palma

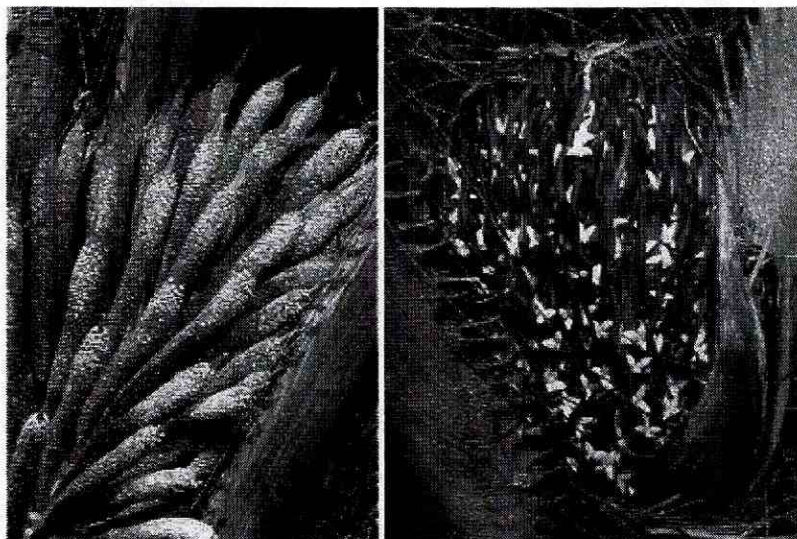
1. Aspectos agronómicos. Dentro las características más sobresalientes del cultivo de palma africana, se tiene que la cosecha comercial se hace cada 8-15 días, lo que significa que es un proceso continuo desde el inicio de la producción, lo que permite tener un flujo constante de caja para el productor. La producción comienza a partir de los 20 a 36 meses después de la siembra en campo, esto dependiendo del material genético utilizado, manejo de vivero y trasplante, la renovación de la plantación se hace cada 22 a 25 años (Amatller, 2000).

La especie que es utilizada en las plantaciones es *Elaeis guineensis* de origen africano, pero en programas de mejoramiento se han utilizado otras especies como la *Elaeis oleifera*, la cual es de origen americano. El cruzamiento de estas dos especies “Dura” y “Pisífera”, permitió obtener un tipo híbrido, las “Teneras”, que se utilizan comercialmente en la actualidad (Quesada, 1997).

Las especies de hoy en día se caracterizan por tener un alto rendimiento bajo condiciones climáticas ideales, lo cual hace que produzcan 20 toneladas de racimos/ha año, con un porcentaje de rendimiento de 25% la producción de aceite sería de 5 ton/ha año, pero este rendimiento varía dependiendo las condiciones climáticas (Poku, 2002).

2. Botánica. Físicamente la palma africana está compuesta por un tallo erecto de 40 a 45 centímetros de grosor, que crece de 35 a 70 centímetros por año, una corona formada por 40 a 45 hojas compuestas, las cuales emergen continuamente de 25 a 35 por año. Cada hoja consta de numerosos foliolos, unidos al raquis, que a su vez está unido al tallo por el peciolo. La palma aceitera es monoica, o sea produce inflorescencias masculinas femeninas en un mismo árbol. Sin embargo, la polinización es cruzada, ya que las flores de uno u otro sexo son producidas a tiempos diferentes en la misma planta. La producción de inflorescencias es continua a lo largo de todo el año, pero el sexo de sus flores es determinado por condiciones ambientales y por el estrés interno de la planta (Amatller, 2000).

Figura 7: Inflorescencias de palma africana a) Inflorescencia masculina, b) inflorescencia femenina

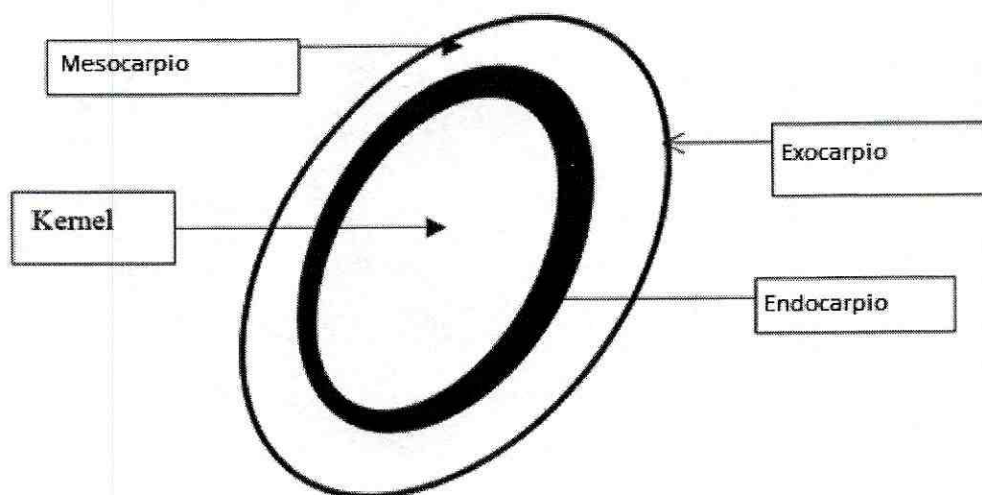


(Poku, 2002)

Una vez que las flores son fecundadas, se inicia el desarrollo del racimo, en donde los frutos alcanzan la madurez después de 5.5 a 6 meses. Por lo general cada racimo tiene de 600 a 1500 frutos. Estos frutos tienen una forma esférica a ovoide y tiene un color pardo en la punta y anaranjado en la parte media hacia la base; la longitud que alcanza es de dos a cinco centímetros, con un peso de tres a treinta gramos. Entre la cáscara y la semilla esta la pulpa o mesocarpio, que es de color anaranjado cuyo contenido de aceite varía entre 50 y 70%. La semilla o coquito también posee un porcentaje de aceite, al que se le conoce con el nombre de aceite de palmiste (Amatller, 2000).

Las partes del fruto son: exocarpio o epicarpio, mesocarpio o pulpa, endocarpio o cuesco, Kernel o almendra. El fruto maduro es de color rojo amarillento, con un peso de 10 g y forma ovalada, con una producción de 20 a 25% de aceite por racimo. A la edad de cinco años, se espera que una palma produzca catorce racimos por año, con un peso promedio de siete kg/racimo; a los ocho años se estima que el número de racimos producidos sea de ocho con un peso de 22 kg cada uno (Quesada, 1997).

Figura 8: Partes del fruto de palma africana



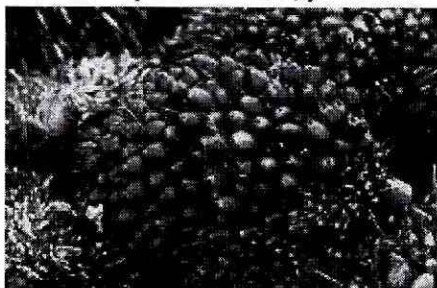
(Poku, 2002)

La palma africana tiene la más alta producción de aceite por unidad de área, comparada con cualquier otro tipo de cultivo, además produce dos tipos de aceite – aceite de palma y aceite de kernel – que son ampliamente utilizados en la industria (Poku, 2002).

- Producción de racimos 12 / año / palma (palma de 8 años).
- Peso del racimo 23 - 27 kg.
- Peso del fruto.10 gramos.
- Semilla (nuez) fruto. 5 - 8 %
- Producción de cáscaras (de semilla) 5 %
- Aceite / racimo 20 - 25 %.
- Producción de raquis (estopas) / racimo 22 %

Se debe aclarar que la fruta de palma contiene 56% de aceite, por lo que los porcentajes anteriores indican el porcentaje de aceite que se puede extraer de la planta, esto se debe a que el aceite que no se puede extraer es porque está metido dentro de las células vegetales y no es posible romper estas células para poder liberar este aceite (Poku, 2002).

Figura 9: Fruto de palma africana, ya cortado



(Amatller, 2000)

G. Aceite

El aceite de palma es un alimento natural que se viene consumiendo desde hace 5,000 años. Se refina sin necesidad de disolventes químicos, por lo que se reduce el riesgo de contaminación por residuos (Quesada, 1997).

El aceite de palma contiene iguales proporciones de ácidos grasos no saturados y saturados, conteniendo alrededor del 40% de ácido oleico (no monosaturado), 10% de ácido linoléico (no polisaturado), 44% de ácido palmítico (saturado) y 5% de ácido esteárico (saturado). Este aceite es una fuente natural de vitamina E, tocoferoles y tocotrienoles y el aceite de palma sin refinar también es una fuente importante de vitamina A y carotenoides (Quesada, 1997).

El aceite de palma, se obtiene de la pulpa. Representa entre el 18-26 % del peso fresco de un racimo. Antes de ser refinado o tratado, este aceite está considerado como el alimento natural más rico en vitamina A (cerca de 15 veces más que la zanahoria). Sin embargo, durante el proceso de refinado pierde características como su valor nutritivo o calidad de sus ácidos grasos (Esmiol, 2008).

El aceite de palma tiene un contenido glicérido sólido alto que lo hace semisólido normalmente se usa en estado natural, sin hidrogenar (Quesada, 1997).

La parte sólida del aceite de palma se denomina estearina y la parte líquida del aceite de palma se denomina oleína, su diferencia radica en el porcentaje de ácidos grasos insaturados que cada una de éstas posee. La oleína de palma contiene una mezcla de ácidos grasos poliinsaturados, monoinsaturados y saturados. Las respectivas concentraciones son de: 44% de ácido oleico, 10% de ácido linoléico, 40% de ácido palmítico y el 15% de ácido esteárico. Considerando que es un aceite comestible de origen vegetal, esta esencialmente libre de colesterol. Su composición natural de ácidos grasos también requiere un cambio mínimo en su composición química para su utilización en una gran variedad de formulaciones alimenticias.

Ello es una ventaja en comparación con los otros aceites líquidos comestibles que requieren hidrogenación, siendo este hecho de potencial perjuicio para la salud humana (Nutrer, 2004).

1. Aceite rojo de palma. El aceite crudo de palma o aceite rojo tiene un alto contenido en carotenos: 0.03 a 0.15%, de los cuales 90% son alfa y beta-carotenos, estos pigmentos son los responsables de darle el color rojo-anaranjado al aceite crudo. La refinación básica tiene poco efecto en la remoción de estos pigmentos, por lo que hay que realizar un blanqueo mediante un calentamiento para remover el color, esto se puede hacer si los carotenos no están oxidados. Por otro lado se trata de dejar dichos pigmentos al que pueden ser utilizados al momento de hacer margarinas o mantecas (O'Brien, 1998).

Cuadro 6: Características del aceite rojo de palma

	Típico	Rango
Gravedad específica, 5°C /25°C		0.8919-0.8932
Índice de refracción a 40°C		1.4565-1.4585
Índice de yodo		46.0-56.0
Índice de saponificación		196-202
Materia insaponificable, %		0.2-0.5
Punto de solidificación, °C		43.0-47.0
Punto de fusión, °C		36.0-45.0
Contenido de carotenos, mg/kg		500-1600
Índice de sólidos, %		
10.0°C	34.5	30.0-39.0
21.1°C	14.0	11.5-17.0
26.7°C	11.0	8.0-14.0
33.3°C	7.4	4.0-11.0
37.8°C	5.6	2.5-9.0
40.0°C	4.7	2.0-7.0

(O'Brien, 1998)

El aceite crudo de palma tiene un sabor como a fruta o a coco que puede ser removido fácilmente con la refinación. El aceite de palma cuando empieza a oxidarse genera un olor picante muy distintivo. El nivel de oxidación del aceite crudo de palma está afectado por la presencia de niveles altos de beta-carotenos, que actúan como prooxidantes en la presencia de altas concentraciones de tocoferoles. Por esta razón es mejor refinar el aceite para que tenga una vida de anaquel más larga (O'Brien, 1998).

Cuadro 7: Composición típica de triglicéridos en el aceite rojo de palma

	Típico
Composición de ácido graso, %	
Láurico C-12:0	0.1
Mirístico C-14:0	1.0
Palmitico C-16:0	44.3
Palmitoléico C-16:1	0.15
Esteárico C-18:0	4.6
Oleico C-18:1	38.7
Linoléico C-18:2	10.5
Linolénico C-18:3	0.3
Araquídico	0.3
Composición de triglicéridos, %	
Trisaturados, SSS	7.9
Monosaturados SIS	42.8
Monosaturados, SSI	6.6
Disaturados, SII	35.7
Triinsaturados, III	6.8

(O'Brien, 1998)

2. Estructura del aceite de palma. La estructura y las propiedades físicas del aceite de palma son similares a las propiedades de cebo y la manteca de cerdo, sin embargo si se observa las propiedades del cristal que forma cuando se solidifica, su estructura se parece más a las del cebo. El aceite de palma se distingue de todos los demás aceites por su alto contenido en palmítico (44.3%), ya que el aceite vegetal que le sigue con alto contenido de palmítico es el de algodón con 21.6%, debido a esto es que estos dos tipos de aceites se utilizan para la fabricación de mantecas, ya que la mezcla de estos dos aceites promueve la formación de cristales con la configuración beta prima, que es la deseada al momento de hidrogenar un aceite (O'Brien, 1998).

3. Calidad del aceite de palma. Existe un gran número de análisis para evaluar las características físicas y químicas de las grasas a lo que continuamente se añaden nuevos procedimientos, sobre todo instrumentales, que son más rápidos y exactos; sin embargo, los tradicionalmente empleados son de rutina en muchos laboratorios e industrias y se usan para llevar a cabo un control de calidad adecuado. Los resultados de estos análisis ofrecen mucha información sobre la naturaleza, el origen y el posible comportamiento de las grasas en diferentes condiciones de almacenamiento y procesamiento, algunos de los índices más comunes son (Badui, 2006):

- Índice de acidez: es el número de miligramos de KOH necesario para saponificar los ácidos grasos libres de una grasa y se expresa generalmente como porcentaje de ácidos grasos calculados en términos del ácido oleico.
- Índice de hidroxilo: es el peso en miligramos de KOH necesarios para neutralizar el ácido acético que puede combinarse por acetilación con un gramo de muestra.

- Índice de Polenske: es el número de mililitros de KOH 0.1N necesarios para neutralizar los ácidos grasos volátiles insolubles en agua de 5 gramos de muestra.
- Índice de saponificación: es el peso en miligramos de KOH que se requiere para saponificar completamente 1 gramo de grasa; este índice es inversamente proporcional al peso molecular promedio de los ácidos grasos.
- Índice de solidificación de ácidos grasos (titer): este análisis se usa para determinar el punto de congelación de una grasa, por lo que se expresa en términos de temperatura. Originalmente se desarrolló para evaluar los ácidos grasos que se utilizan en la manufactura de jabones; consiste en saponificar una grasa para obtener los ácidos grasos correspondientes, los cuales se acidifican y se enfrían lentamente hasta que cristalizan. En este punto se mide la temperatura; el valor del titer ofrece información sobre la intensidad de la hidrogenación que reciben los aceites comerciales.
- Índice de sólidos grasos: Las grasas sólidas son una mezcla de diferentes triglicéridos que forman una matriz cristalina en la que queda atrapada una porción de aceite líquido de manera semejante a lo que sucede con el agua en una esponja. Si la grasa se enfría a -30° C, se provoca una solidificación completa, y a medida que se calienta se induce la formación de una mezcla de lípidos que se encuentra en este estado líquido y sólido, cuya relación depende de la temperatura final que se alcance. Por otra parte, los componentes sólidos se expanden de modo muy diferente como lo hacen los líquidos y la máxima expansión se alcanza cuando una grasa sólida se vuelve líquida.
- Índice de yodo: es el número de gramos de yodo que reaccionan con 1 gramo de lípidos, y es una medida del promedio de insaturaciones que contienen los aceites y las grasas. Por tratarse de un análisis un poco empírico, debe hacerse en condiciones muy precisas para obtener resultados reproducibles; no ofrece información respecto de la distribución y localización de los dobles enlaces, por lo que no se usa para determinar composición y la naturaleza de la grasa. En este análisis se utiliza en la industria para conocer rápidamente el grado de insaturaciones en un aceite, antes de la hidrogenación.
- Temperatura de punto de fusión: solamente las grasas constituidas por muy pocas clases de triglicéridos tienen su temperatura de punto de fusión bien definida. A medida que aumenta el número de los ésteres, el punto de fusión se convierte verdaderamente en un intervalo de temperatura, ya que cada acilglicerido tiene el suyo propio.
- Temperatura de formación de humos o punto de humo: es la temperatura a la cual se producen compuestos de descomposición en una cantidad suficiente para volverse visibles.
- Prueba del frío: se aplica fundamentalmente para determinar la eficiencia del proceso de hibernación. Se mantiene una muestra de aceite en un baño de hielo a 0° C y se mide el tiempo que permanece transparente. Los triglicéridos de alto punto de fusión son los

responsables de que el aceite se enturbie durante el enfriamiento; en términos generales si el aceite se mantiene transparente durante cinco horas y media, se considera de buena calidad (Badui, 2006).

- Grado de oxidación: El índice de oxidación depende del grado de insaturación de los ácidos poliinsaturados. La evaluación sensorial es el método más sensible para cuantificar el deterioro de los aceites, pero es un procedimiento tardado que requiere la intervención de evaluadores capacitados y los resultados con frecuencia son variables. Los hidroperóxidos son medidos por la prueba de peróxido y los productos secundarios por la prueba de p-Anisidina. El valor de peróxido (mEq de peróxido por kg de grasa), es una medida de los productos iniciales de la oxidación lipídica e indica el estado actual de la oxidación de un aceite, como los peróxidos pueden descomponerse y formar otros productos antes de la determinación, debe tenerse cuidado al interpretar los datos del índice de peróxidos. El valor de p-Anisidina indica por su parte la historia de la oxidación del aceite (formación de aldehídos), se define como 100 veces la D.O. a 350 nm en una celda que contenga una solución al 1% de aceite (Miller, 2001).
- DOBI: índice que mide carotenos contra productos de oxidación del aceite. Esta propiedad determina el grado de oxidación de un aceite debida al exceso de temperatura y oxígeno. Los aceites oxidados son difíciles de blanquear (o no son blanqueables dependiendo el estado de la oxidación), ya que los carotenos y los tocoferoles se han degradado y el aceite toma un color marrón opaco. El DOBI se define como el radio de absorbancia entre 445 nm y 268 nm (Pérez, 2010).
- Color: El color que el aceite de palma debe tener es de rojo de 25-30 (Pérez, 2010)

Como cualquier otro tipo de grasa o aceite, el aceite rojo de palma se ve afectado por factores externos que comprometen su calidad. Así se tiene que la calidad del aceite está ligada directamente a ciertos cuidados que hay que tener en todas las etapas de procesamiento del aceite, es decir desde la cosecha, pasando por la extracción, el almacenamiento y transporte (Amatller, 2000).

El principal factor que influye en la calidad del aceite rojo es la elevación del nivel de oxidación, entiéndase por oxidación a la reacción que se da entre los enlaces dobles de las grasas insaturadas y el oxígeno del medio, en la cual se generan compuestos como aldehídos o cetonas y ácidos grasos libres de cadena corta, que conducen a la alteración de las características sensoriales del producto y la formación de la rancidez en el aceite. Existen ciertas condiciones que aceleran esta reacción, como por ejemplo: temperaturas elevadas, alto porcentaje de humedad, presencia de metales catalíticos, especialmente hierro y cobre en altas cantidades, exposición del lípido a la luz y al medio ambiente por periodos prolongados (Amatller, 2000).

Es por ello que durante la cosecha los frutos deben ser colectados en su punto de madurez apropiada y procesada inmediatamente; hay que evitar todo daño físico, para impedir la acidez provocada por hidrólisis enzimática, que puede aparecer en el mesocarpio del fruto dañado (Amatller, 2000).

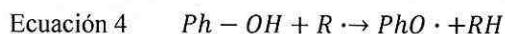
Cuadro 8: Características de una aceite rojo de palma de excelente calidad

Características del aceite de palma	Niveles óptimos
Ácidos grasos libres	<5%
Humedad	<0.5%
Índice de peróxidos	<5
Impurezas	<0.01%
Hierro	<3.5 ppm
Cobre	<0.2 ppm

(Amatller, 2000)

4. Control de la peroxidación de aceites. Para que la peroxidación de lípidos requiere oxígeno y radicales libres. También se sabe que los iones de metales de transición, como el hierro y el cobre, pueden iniciar y acelerar la peroxidación de lípidos al catalizar la formación de nuevos radicales libres. La luz puede iniciar la peroxidación de lípidos al catalizar la formación de nuevos radicales libres. La luz puede iniciar la peroxidación al transformar el oxígeno triplete en oxígenos singlete, lo que permite la formación de hidroperóxidos lípidos que se descomponen para formar radicales libres. Para controlar la peroxidación de Aceites se puede hacer lo siguiente (Miller, 2001):

- Eliminación de oxígeno: para la peroxidación de lípidos se requiere oxígeno. Por lo tanto, la eliminación de oxígeno debe evitar la peroxidación. Se lleva a cabo el desplazamiento de oxígeno con nitrógeno y sellando el alimento en empaques que son impermeables al oxígeno.
- Extracción de radicales libres: Muchos de los antioxidantes más eficaces de los alimentos son recogedores de radicales libres para comprender la forma en que estas sustancias actúan, considérese el ejemplo del fenol. El hidrógeno del grupo oxhidrilo de los compuestos fenólicos se extrae con relativa facilidad. Así, los compuestos fenólicos donarán un átomo de hidrogeno a los radicales libres convirtiéndolos en no radicales.



Todavía se tiene un radical libre, $PhO \cdot$. Sin embargo, los radicales fenólicos libres son relativamente estables y no pueden sustraer un hidrogeno de otro ácido graso insaturado.

Así se rompe la cadena y la peroxidación de lípidos se retarda. Los radicales fenólicos son estables debido a la resonancia en el anillo aromático. Aunque el fenol en sí es tóxico y no puede agregarse a los aceites, muchos compuestos fenólicos están presentes en los alimentos en forma natural. Asimismo, los aditivos sintéticos para alimentos, de uso amplio son: BHT, BHA, TBHQ y el galato de propilo (GP) son compuestos fenólicos.

- Quelación de iones metálicos: Como los iones de metales de transición catalizan la formación de radicales libres, podría esperarse que al eliminar los iones metálicos se reduciría la oxidación. Sin embargo, no es posible ni práctico eliminarlos de los alimentos. El hierro y el cobre son nutrientes esenciales. Más aun, la deficiencia de hierro es un problema nutricional muy extendido. Por lo tanto, con frecuencia se agregan agentes quelantes capaces de formar complejos con los metales de los aceites, a fin de reducir los efectos de los metales que favorecen la oxidación. Dos agentes quelantes comunes que se le adicionan a los alimentos son el EDTA y el ácido cítrico (Miller, 2001).

H. Extracción

1. Tipos de extracción. La extracción de aceite de palma se puede hacer por tres vías, una de ellas es la cocción o método húmedo, la extracción física o mecánica, y la otra es la extracción química por medio de un solvente. Para la extracción por el método húmedo consiste en colocar en grandes marmitas o retortas, el material que contiene el tejido graso en este caso la palma. Posteriormente se separa una mezcla de grasa y agua de los residuos sólidos, separándose por decantación o centrifugación el aceite. Para la extracción física o mecánica consiste en aplicar una gran presión mecánica al producto precisamente acondicionada a una temperatura más de 100°C para forzar la grasa a salir por espacios pequeños separándola del resto de material sólido el cual constituye lo que se denomina torta y que al ser molida constituye la harina. Generalmente esta torta contiene alrededor de 5% de grasa residual. Las prensas pueden ser de tipo continuo o discontinuo. Por último el método químico o por medio de solvente es la típica operación unitaria de extracción sólido-líquido en la cual se utiliza como solvente algún derivado del petróleo como hexano. Los extractores son equipos bastante grandes que trabajan en forma continua. La mezcla de solvente con grasa constituye una miscela que es sometida a un proceso de evaporación para separar los dos componentes complementados usualmente por una absorción gaseosa. Este proceso logra reducir el contenido de grasa residual a menos de 1%. No conviene extraer todo el contenido de grasa porque si se tratan de extraer todo se extrae muchas cosas que generalmente no son grasas (contaminantes) (Rivera, 2010).

En la industria suele combinarse dos de los anteriores, por ejemplo para el caso de la palma se puede combinar el método prensa-solvente, o el método prensa-húmedo (Rivera, 2010).

2. Proceso de extracción. La fruta después de haber sido cortada empieza a generar enzimas lipolíticas (lipasa) que atacan el aceite y lo desdoblan en ácidos grasos libres, este tipo de enzimas también se empieza a activar si la fruta después de cortada es lastimada, por lo que se recomienda trabajar la fruta lo más pronto posible después de haber sido cortada, sin embargo algunos recomiendan se deje fermentar la fruta un par de días (Poku, 2002).

El proceso de extracción de aceite de palma se resume en la recepción de la materia prima, la esterilización de la fruta, la separación de la fruta del raquis, la digestión, el prensado, la clarificación y el tratamiento de los desechos generados durante el proceso. A continuación se describen los pasos anteriormente mencionados (Poku, 2002).

- Esterilización: Se logra cocinando a presión los racimos en un autoclave, a una presión de 3 kg/cm² (43 psi) a temperatura más o menos de 130° C durante una hora aproximadamente, dependiendo de la maduración de la fruta. La esterilización desactiva las enzimas estabilizando la calidad del aceite en cuanto a la formación de ácidos grasos libres (a.g.l.). Durante el proceso también se aflojan los frutos, con lo cual se desprende la cáscara, además el proceso sirve para remover las gomas y las resinas que contenga la fruta ya que algunas de ellas son solubles en agua y si no se remueven forman espuma al momento de utilizar el aceite para freír alimentos (Poku, 2002).

Para los pequeños productores de aceite de palma, que no cuentan con un gran capital para tener una autoclave el proceso de esterilización también se puede realizar cocinando la fruta en agua. Las desventajas de este método es que la fruta absorbe mucha agua por lo que no es muy efectivo el método (Poku, 2002).

- Separación: Luego de haber esterilizado los racimos se procede a separar el fruto del racimo esto se hace en un tambor rotatorio, el fruto se separa para luego enviarlo al digestor por medio de un elevador y el racimo vacío es llevado al campo para utilizarlo como abono orgánico. Se produce el racimo vacío como desecho que representa 23 % sobre fruta (Alfaro; Ortiz, 2006).

- Digestión: El fruto se deposita en un cilindro llamado digestor el cual presenta unas paletas en las cuales va a macerar el fruto por medio de la agitación circular, además se le aplica vapor a 45 psi, esto ayuda a que las células de aceite se desprendan del fruto y la recuperación del aceite en el momento del prensado sea eficiente (Alfaro; Ortiz, 2006).

Los métodos húmedo y seco tienen en común todos los pasos anteriores. Lo que difiere entre el método húmedo seco es que para la palma no se puede aplicar el método húmedo sin antes haber molido la

semilla de palma ya que de ser así la extracción sería ineficiente, por eso es que se realiza una combinación prensa-húmedo (Poku, 2002)

- **Prensado:** La extracción del aceite crudo de palma de la fruta es un proceso mecánico. En las plantas modernas, el prensado se realiza en una prensa de tornillo de tipo continuo. El aceite crudo se recoge y se tamiza para reducir las partículas sólidas grandes (Quesada, 1997).

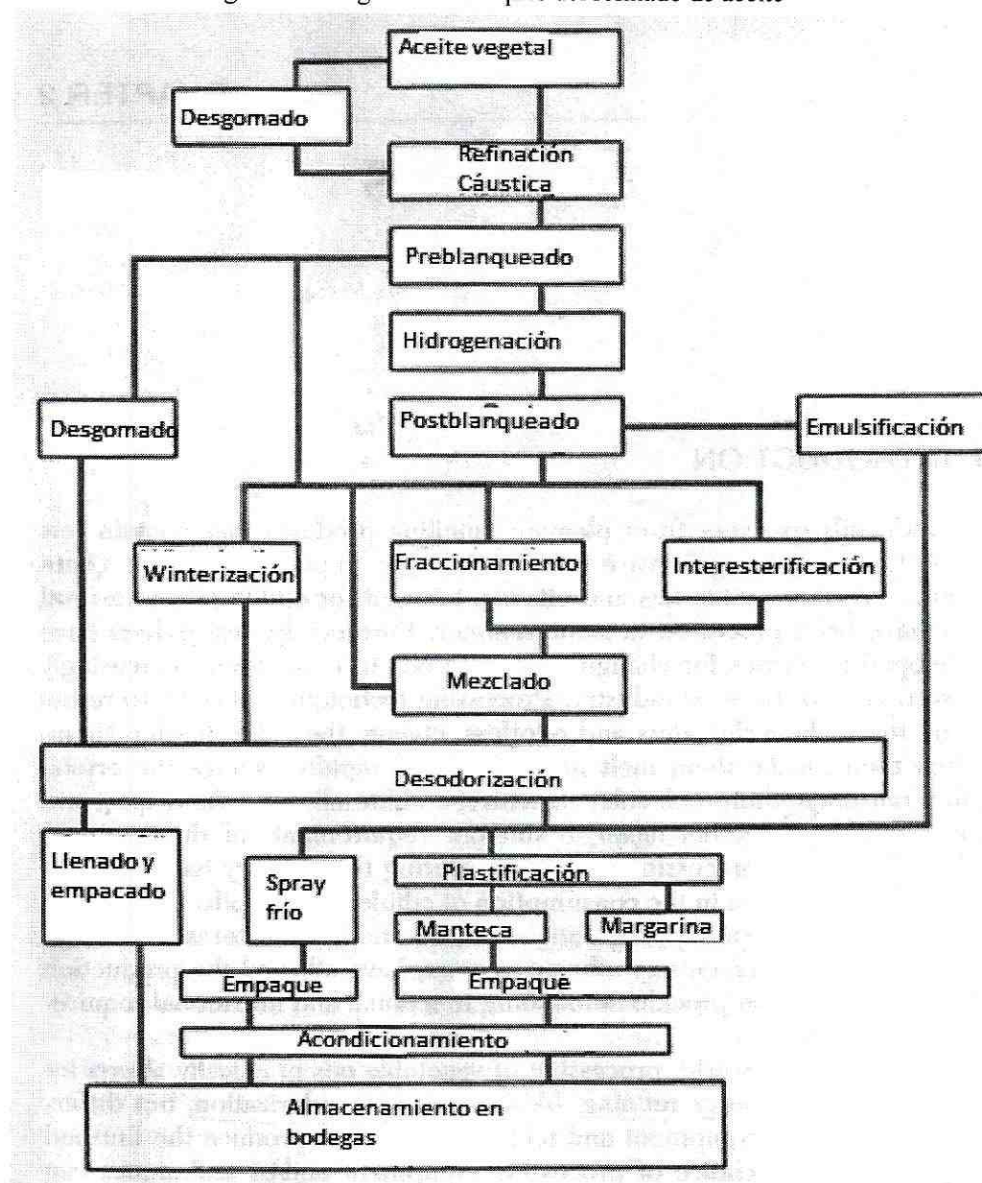
El fruto ya digerido se procede a prensarlo. En esta etapa se le aplica agua a la salida del digestor y en la parte inferior de la prensa con el fin de lavar las fibras y lograr que la extracción del aceite sea lo más eficientemente posible y mantener las pérdidas de aceite dentro de los estándares, además de dar la dilución adecuada para realizar la separación en la sección de clarificación. La eficiencia del prensado depende de dos factores; la presión adecuada aplicada a los conos de los tornillos y el estado de por desgaste de canastas tornillos y conos, además de la buena digestión que se hizo. Del prensado se producen dos efluentes uno sólido y otro líquido, el sólido está compuesto por la semilla del fruto y las fibras producidas en el proceso de prensado, el líquido va a ser una mezcla aceite-agua-lodos. Representa 60 % sobre fruta, además se produce 6 % de semilla (4% almendra y 2% de cáscara) el 9 % es fibra (Alfaro; Ortiz, 2006).

Aparte de este método mecánico llamado el método seco hay un método húmedo que consiste en introducir la fruta después de la digestión en un baño de agua caliente lo cual hace que el aceite se libere y flote por la diferencia de densidades (Poku, 2002).

3. Refinación. El aceite vegetal crudo contiene triglicéridos, impurezas solubles en la grasa e impurezas suspendidas en el aceite. La cantidad de impurezas puede variar dependiendo de la fuente donde se extrajo el aceite, del proceso de extracción o la etapa del año en que se realizó la extracción. El principal objetivo de la refinación es la eliminación de todas estas impurezas, removiendo los ácidos grasos libres, gomas, fosfolípidos, metales, peróxidos y sus subproductos, color, esteroides, tocoferoles, ceras, humedad y tierra. Todas estas impurezas afectan al sabor, color y resistencia a formar espuma del producto final (O'Brien, 1998).

Las etapas anteriormente mencionadas tienen como producto un aceite crudo o el aceite rojo de palma, pero este aceite contiene muchas impurezas las cuales tienen que ser removidas por una serie de procedimientos los cuales son: desgomado, neutralización, refinación física, blanqueo, fraccionamiento y embasado (Rivera, 2010).

Figura 10: Diagrama de bloques del refinado de aceite



(O'Brien, 1998)

- **Desgomado:** El aceite de palma contiene cantidades importantes de fosfolípidos que pueden ser recuperados para otros usos (lecitina). La operación de desgomado consisten en hacer reacciona el aceite crudo con una solución caliente de ácido fosfórico que precipita las gomas, siendo separadas si interesa recuperar esas gomas. Si no se recuperan directamente pasan al tratamiento con soda caustica mezclándose las gomas con el jaboncillo (Rivera, 2010).

En este proceso se tienen dos opciones: los fosfatos pueden ser tratados como subproductos de la extracción de aceite o pueden ser tratados como impurezas al momento de su remoción. Se ha estimado que un tercio de las industrias extractoras de aceite de los Estados Unidos agregan las gomas a la harina que

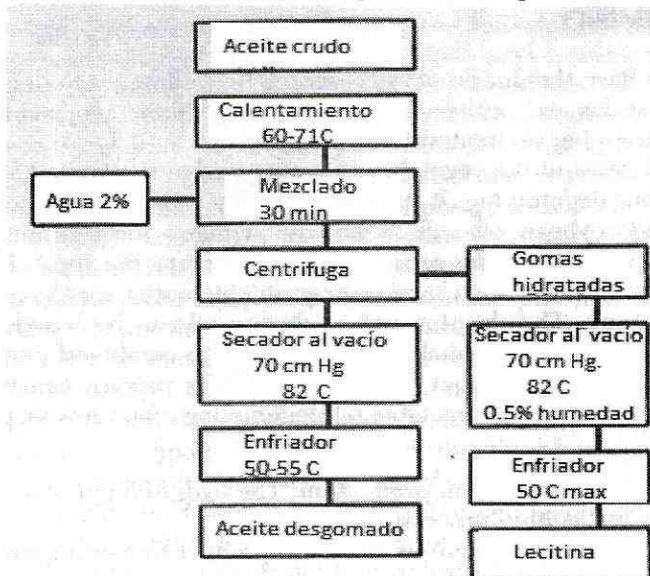
luego venden a diferentes industrias. La decisión de desgomar el aceite se basa en ahorro de energía y capital, ya que este proceso se puede llevar a cabo con una centrifuga y una neutralización adecuada. Sin embargo el desgomado presenta varias ventajas las cuales son (O'Brien, 1998):

- Las gomas hidratadas son necesarias para la producción de lecitina.
- Cumple con los requerimientos para exportación de aceite libre de impurezas.
- Reduce las pérdidas durante la refinación química. Esto se debe a que las gomas pueden funcionar como emulsificantes durante la refinación álcali arrastrando parte del aceite a la pasta de neutralización.
- Prepara al aceite para la refinación física, ya que un aceite desgomado es adecuado debido a que ya se removieron muchas impurezas no volátiles, como los fosfátidos y peróxidos metálicos (O'Brien, 1998).

El desgomado consiste en tratar el aceite con una solución caliente de agua, solución de sal o ácidos diluidos como el fosfórico, cítrico o maleico para remover los fosfatos, ceras y otras impurezas. Lo que sucede en este proceso es que se convierten los fosfatos a gomas hidrolizadas las cuales son insolubles en el aceite y pueden ser separadas ya sea por centrifugación, filtrado o decantado. La cantidad adecuada de agua es del 75% del contenido de los fosfátidos. Cuando se añade muy poca agua causa que se formen gomas oscuras y viscosas y un aceite con presencia de bruma, por el contrario cuando se añade demasiada agua el proceso tiene un bajo rendimiento debido a la pérdida de aceite. Una hidrolización completa de los fosfátidos requiere un tiempo aproximado de 30 minutos con agitación y la temperatura adecuada (60-71° C), ya que si se tiene una temperatura mayor aumenta la solubilidad de los fosfátidos en el aceite por lo que no se puede hidrolizar, y si se tiene una temperatura menor la viscosidad del aceite incrementa lo cual dificulta la separación de los fosfátidos (O'Brien, 1998).

- Neutralización: consiste en hacer reaccionar los ácidos grasos libres presentes en el aceite crudo con NaOH en solución, produciéndose lo que se denomina jaboncillo en el cual además de las sales neutras de sodio de los diferentes ácidos grasos se elimina también una buena parte de las sustancias que le dan color al aceite crudo. La separación del jaboncillo y el aceite refinado se realiza usualmente con centrifugación (Rivera, 2010).

Figura 11: Diagrama de bloques del proceso de desgomado de aceite



(O'Brien, 1998)

Este paso de la refinación es el que tiene mayor impacto en la calidad del producto final, y una mala neutralización también tendrá un impacto económico. Hay dos tipos de refinación: la física y la química o refinación álcali. Algunos aceites como el de palma contienen impurezas como pigmentos, fosfatos no hidratables, metales pesados, productos de oxidación y muchos otros que no pueden ser removidos por una refinación física o por desgomado, por lo que hay que utilizar una refinación química para poder remover estas impurezas (O'Brien, 1998).

La refinación caustica convencional es la más usada por todas las refinерías, ya que la adición de soda cáustica al aceite crudo trae consigo muchas reacciones químicas, entre ellas está la neutralización de los ácidos grasos libres para formar el jaboncillo, la coagulación de las gomas y fosfátidos, la degradación del color, siendo los pigmentos absorbidos por las gomas o haciéndolos solubles en agua. Con el tiempo y calentando la mezcla a una temperatura aproximada de 70° C el exceso de soda cáustica empieza a reaccionar con el aceite neutro saponificándolo por lo que hay que tener especial cuidado para la selección de la concentración de soda caustica, la agitación, el tiempo de mezclado y la temperatura para poder lograr una buena refinación (O'Brien, 1998).

Los pasos a seguir para obtener una buena refinación química son los siguientes:

- Muestreo: el aceite crudo es muestreado y analizado, para poder saber si el aceite que se va a refinar está dentro de los parámetros.
- Acondicionamiento del aceite crudo: Los aceites crudos son transportados a un tanque de pretratamiento donde se les añade ácido fosfórico grado industrial a todos aquellos aceites que tengan un alto grado de aceites lo cual se obtiene de los análisis realizados con anterioridad. Es pretratamiento con

ácido fosfórico tiene una duración mínima de cuatro horas y una máxima de ocho horas. El objetivo de este pretratamiento es para hacer precipitar todos los fosfátidos, precipitar el calcio y magnesio natural como fosfatos insolubles, inactivar metales como el hierro y el cobre, reducir las pérdidas de aceite neutro, desestabilizar la clorofila para facilitar su remoción en el blanqueado y mejorar el color y sabor del producto desodorizado.

- Tratamiento cáustico: El aceite pretratado es mezclado con un flujo continuo de soda y es calentado para romper la emulsión. La selección de la concentración de la soda cáustica es hecha con base al aceite crudo que se está tratando y el equipo que se tenga para su tratamiento. En general la concentración de la soda es baja para evitar que se formen las emulsiones. Para la concentración de la soda se utilizan los grados Baumé (Bé). La cantidad teórica de soda caustica se basa en el siguiente factor (O'Brien, 1998):

$$\text{Ecuación 5} \quad \text{Factor} = \frac{\text{Peso molecular NaOH}}{\text{Peso Molecular ácido oléico}} = \frac{40}{282} = 0.142$$

Por lo que el porcentaje de tratamiento es:

$$\text{Ecuación 6} \quad \% = \frac{(\%FFA \times 0.142 + \%exeso + \text{Adición de ácido})}{\%NaOH}$$

El aceite de palma requiere una concentración baja de soda caustica, aproximadamente 12 Bé, esto con el fin de optimizar la separación por centrifuga y reducción de la saponificación del aceite. Además el aceite de palma es precalentado a 65° C para minimizar la formación de emulsión y el porcentaje de exceso es de 0.02%, porque este aceite es refinado solo para la reducción de los ácidos libres (O'Brien, 1998).

Cuadro 9: Porcentaje de exceso de soda caustica para el proceso de refinación química

	Soda Caustica		
	Concentración		
	Baumé	NaOH %	Exceso %
Aceite de soya			
Crudo	14-18	9.50-12.68	0.12
Desgomado	14-18	9.50-12.68	0.10
Mezcla	14-18	9.50-12.68	0.10
Aceite de algodón	19-21	13.52-15.23	0.16
Aceite de maíz	16-20	11.06-14.36	0.13
Aceite de maní	13-15	8.75-10.28	0.12
Aceite de girasol	14-18	9.50-12.68	0.12
Aceite de Canola	15-16	10.28-11.06	0.10
Aceite de Coco	11-12	7.29-8.00	0.02
Aceite de kernel de Palma	11-12	7.29-8.00	0.02
Aceite de Palma	11-12	7.29-8.00	0.02

(O'Brien, 1998)

- Mezclado: Luego que se haya terminado de añadir toda la soda cáustica se mezcla durante un periodo de 5 a 15 minutos a una temperatura de 30 a 35° C, esto con el fin de evitar que se saponifiquen los

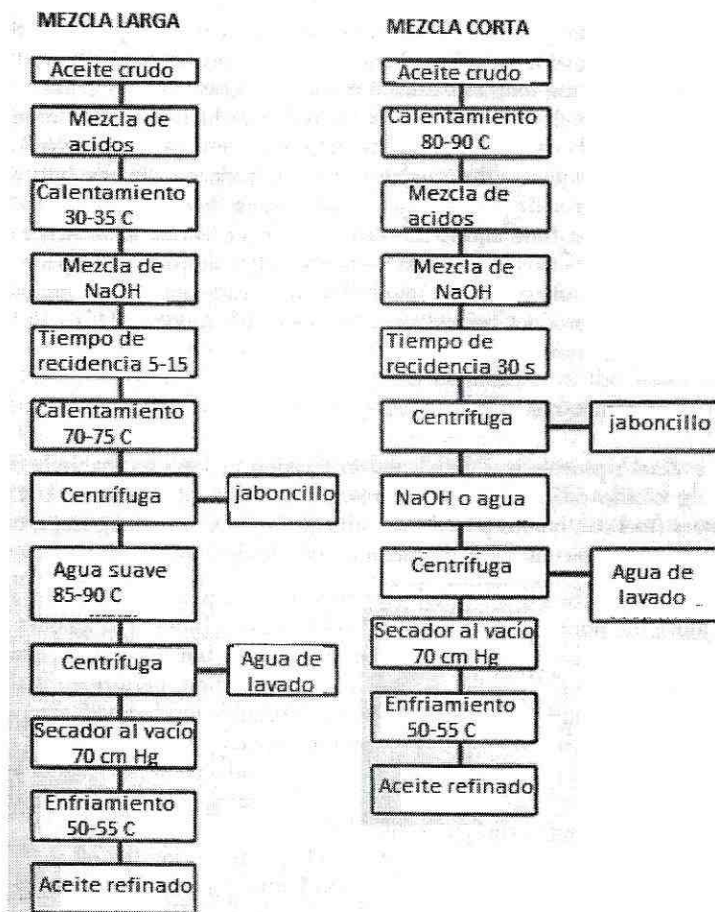
aceites neutros. Luego de haber esperado este tiempo se le da un precalentamiento para darle un shock térmico y así romper la emulsión (74° C).

- Separación: Luego del mezclado la solución pasa a una centrífuga donde se separa en dos fases la fase ligera que contiene el aceite ligero y trazas de jabones, y la fase pesada que contiene jabón insoluble, soda cáustica, fosfátidos y una pequeña cantidad de aceite neutro.

- Lavado: Luego que se separa la mezcla se pasa una centrífuga que lava el aceite, añadiéndole agua caliente (85-90° C), preferible que este 5-8° C arriba de la temperatura del aceite, esta agua de lavado debe ser desmineralizada y para evitar la formación de jabones.

- Secado al vacío: Luego de haber pasado el aceite por la etapa de lavado se pasa por un secador al vacío que controla el contenido de humedad (0.1-0.05%). Un secador típico opera a 70 cm Hg. Luego del secado se debe enfriar a una temperatura de 49-55° C antes de ser almacenado (O'Brien, 1998).

Figura 12: Diagrama de bloques de la refinación química de aceites



(O'Brien, 1998)

- Refinación física: algunos aceites crudos, particularmente de palma africana son procesados sin recurrir a neutralización química sino a una destilación a alto vacío y alta temperatura con arrastre de vapor

en columnas de acero inoxidable. Con las condiciones de trabajo se logra que los ácidos grasos libres pasen a estado de vapor, no así las moléculas de triglicéridos. Adicionalmente se realiza un blanqueo térmico por descomposición de los compuestos que le dan el color rojizo a este aceite (Rivera, 2010).

La refinación física puede eliminar los ácidos grasos libres y muchas otras impurezas pero con este tratamiento no se puede eliminar el paso de desgomado ni el de blanqueo. La ventaja de la refinación física es que se minimiza la pérdida de aceite neutro, la desventaja es que el pretratamiento es una parte importantísima del proceso ya que es aquí donde se eliminan la mayoría de impurezas (O'Brien, 1998).

- **Blanqueo:** consisten en la adsorción de sustancias colorantes por medio de tierras activadas y carbón activado a una temperatura cercana a los 90° C y con vacío en tanques cerrados con agitación. La mezcla de blanqueo se agrega en porcentaje entre 1 y 2% (Rivera, 2010).

El propósito del blanqueo no es solamente remover el color y el olor del aceite. El aceite refinado contiene trazas de impurezas ya sea en solución o en una suspensión coloidal, y estas impurezas compitan con los pigmentos para ocupar el área superficial del adsorbente. En otros aceites que no son el de palma, el blanqueo se utiliza más para remover impurezas que para remover el color. Los parámetros que hay que cuidar en el proceso de blanqueo son los siguientes (O'Brien, 1998):

- **Procedimiento:** los tres procedimientos mayormente empleados en la industria son el Batch a presión atmosférica, Batch al vacío y el proceso continuo al vacío. En el Batch a presión atmosférica el aceite es introducido en un tanque abierto con un agitador y se le añaden las tierras activadas, se le sube la temperatura a 71° C y se mantiene el aceite en el tanque por un periodo pequeño. El Batch al vacío tiene una diferencia con el Batch atmosférico y es que se utiliza un blanqueador al vacío que trabaja con una presión de vacío de 50 mm Hg y a una temperatura de 70-110° C. En el proceso continuo se le está añadiendo arcilla blanqueadora al aceite que es alimentado (71° C) a una cámara de vacío donde se le remueve el agua y aire de la arcilla y el aceite. El producto de esta cámara se le incrementa la temperatura con un intercambiador de calor hasta una temperatura de blanqueo y luego se pasa a una cámara de vacío donde se espera el tiempo necesario de blanqueo para luego ser enfriado y almacenado.

- **Adsorbentes:** Se han utilizado agentes químicos que remueven el color, pero el blanqueo se realiza con tierras activadas, arcillas o carbón activado. Las más usadas son: arcillas neutras, tierras activadas y carbón activado. Las tierras activadas es básicamente Bentonita, estas tierras activadas pueden adsorber hasta 15% de su peso de agua, fosfátidos, jabones, color y metales pero también pueden retener hasta un 30% de los aceites neutros. Las arcillas son básicamente Bentonita que han sido tratadas y la que se usa es la que tiene un alto contenido en montmorillonita, este hidroxisilicato de aluminio tiene una capacidad para intercambiar el aluminio por magnesio, álcalis y algunas otras bases. El problema con estas arcillas es que pueden retener hasta un 70% en peso de aceites neutros, estas tierras son especiales para el blanqueo de aceite de palma. El carbón activado es utilizado por la mayoría de industrias que blanquean el aceite a pesar de sus inconvenientes que tiene al momento de filtrar y a pesar que puede retener hasta 150% en peso de

aceite, debido a estos inconvenientes se acostumbra a combinar en una proporción de 5 a 10% con tierras de blanqueo.

- **Proporción:** La cantidad de adsorbente depende de que tierra de blanqueo se vaya a utilizar, del tiempo de aceite y del tipo de pigmentos que este posea. El porcentaje de arcillas usada varía en el rango de 0.15 a 3.0%.

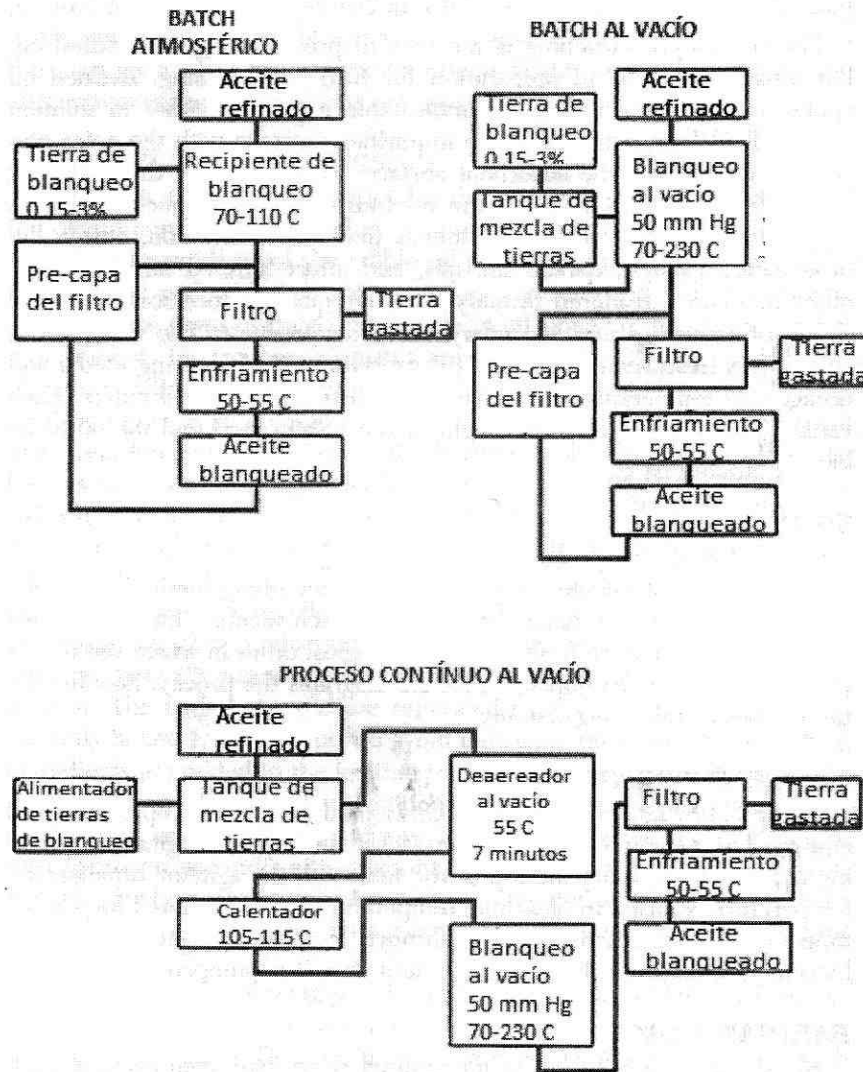
- **Temperatura:** es importante añadir el adsorbente antes de incrementar la temperatura, ya que al añadirle el adsorbente al aceite caliente, reduce sus propiedades de adsorción. Se ha encontrado pocos problemas cuando la temperatura se mantiene debajo de los 110° C, y se toma en cuenta el aire que puede oxidar el aceite. El índice de anisidina empiezan a incrementar cuando se trabaja por encima de estas temperaturas por lo que indica que se está oxidando el aceite. Las bajas temperaturas reducen el poder de absorción de las tierras y las temperaturas demasiado altas inducen a la isomerización de los ácidos grasos insaturados y la formación de ácidos grasos libres.

- **Tiempo:** en teoría la adsorción debería ser instantánea, sin embargo en la realidad no sucede esto. El color va decreciendo conforme va pasando el tiempo (primeros minutos) luego se deja que el adsorbente libere el agua ligada que tiene y que la intercambie por los pigmentos que están en el aceite, esto generalmente sucede en un tiempo de 15 a 20 minutos. Si se utiliza más del tiempo recomendado puede suceder que el aceite empiece a oscurecerse.

- **Humedad:** la presencia de humedad es esencial para un buen blanqueo del aceite. Las tierras que se secan normalmente pierden su poder de adsorción, por lo que se recomienda que las tierras tengan de 10 a 18% de humedad. Durante el blanqueo es necesario remover toda esta humedad ya que los pigmentos o toras impurezas no pueden ser adsorbidas hasta que toda esta humedad haya sido removida. Es por esto que el aceite refinado no debe contener mucha humedad ya que esto afectaría la adsorción de las impurezas.

- **Filtración:** después de que pasó el tiempo de blanqueo las tierras activadas deben ser removidas antes que se conviertan un catalizador para la formación de color. Este paso se puede realizar pasando el fluido a través de telas permeables donde pasa el fluido y retiene los sólidos. Este proceso consta de tres pasos el primero es añadir una precapa al medio filtrante, esto ayuda a que el filtro no se sature y que se logre formar la torta del filtro, luego es la etapa de filtrado donde se hace pasar el aceite por el filtro y por último es la etapa de limpieza (O'Brien, 1998).

Figura 13: Diagrama de bloques del proceso de blanqueo para los aceites



(O'Brien, 1998)

• **Fraccionamiento:** aceite como el de palma africana tiene un punto de fusión relativamente alto, lo cual lo hace conveniente para fabricar productos sólidos no así aceite de cocina líquido. Para obtener una fracción que sea líquida a temperatura ambiente, se enfría el aceite en forma lenta y controlada para que solidifique una porción y quede líquida otra, las cuales se separan por filtración (Rivera, 2010).

• **Desodorización:** los aceites crudos que han sido refinados químicamente son sometidos a la última fase de procesamiento que consiste en la operación de desodorización que es fundamentalmente lo mismo que la refinación física pues es una destilación a alto vacío y alta temperatura con arrastre de vapor (Rivera, 2010).

Los aceites después de haber pasado por todo el proceso de refinación terminan con un olor y sabor que no es agradable, por lo que hay que realizar un último paso que es una destilación a alta temperatura y alto vacío, para remover materiales volátiles odoríferos (O'Brien, 1998).

- Palmistería: La mezcla sólida del prensado es separada por medio de una columna de aire la cual separa las fibras y las envía a la caldera por medio de transportador sinfín para ser utilizadas como combustible en las calderas, la semilla o nuez es mandada a los quebradores donde se clasifica por tamaño y es alimentada a cualquiera de los tres quebradores, después de quebrada la nuez se procede a separar la almendra de la cáscara por medio de un ciclón, la almendra se manda a un secador donde se le elimina la humedad para luego ser almacenada con una humedad no mayor del 5 % y la cáscara se envía por medio de un transportador sinfín a la caldera para ser utilizada como combustible. La almendra producida se prensa y se extrae 40 % de aceite sobre almendra y 50 % harina sobre almendra y un 10 % humedad sobre almendra (Alfaro; Ortiz, 2006).

III. JUSTIFICACIÓN

En los últimos años Guatemala ha sustituido la producción de aceite de algodón por el aceite de palma africana, debido al alto rendimiento en la extracción de aceite. Además Guatemala posee un clima apto para la siembra de palma africana ya que para el cultivo de ésta se requiere un clima tropical y una precipitación pluvial mínima de 1600 mm/año.

La extracción de aceite de palma africana es un proceso versátil, ya que se puede realizar por empresas que no cuentan con la mejor tecnología para la extracción, esto quiere decir, invertir en el proceso de extracción, no se necesita adquirir la mejor tecnología para que el proceso le devuelva el costo de inversión, esto se debe a que el fruto de palma tiene un alto contenido de aceite, y todos los subproductos del proceso tiene un valor en otros mercados.

Los mayores productores de aceite de palma africana en Guatemala son las empresas Olmeca, Capullo e Ideal, dichas empresas tienen sus fincas, donde cultivan la palma, ubicadas en la costa sur del país, esto es debido al clima que es muy favorable para la planta. Estas grandes empresas productoras de aceite se han visto obligadas a realizar fuertes inversiones en la siembra de palma debido a los altos costos de la importación de aceite.

El último censo agropecuario (2002-2003) realizado por el Ministerio de Agricultura, Ganadería y Alimentación, (MAGA), detalla que el país tiene una capacidad para sembrar 809 mil hectáreas para la siembra de palma africana (Cultivo actual 31.5 mil hectáreas), con lo que se lograría eliminar todas las importaciones de aceite de palma y además se incrementarían las exportaciones de los productos y subproductos de dicho cultivo.

Los beneficios de la extracción de aceite de palma son varios ya que el proceso tiene varios subproductos que se utilizan para venderlos a diferentes empresas, entre los subproductos está el aceite de palmiste el cual se exporta, la harina de la torta que se vende para la fabricación de concentrados de animales. Como se puede ver el proceso de extracción de palma es un proceso muy limpio ya que no se desperdicia ningún subproducto.

Con los cambios climáticos que se están presenciando hoy en día, es importante que todo proceso de producción sea amigable con el ambiente, y el proceso de extracción de palma puede contribuir a la disminución de la contaminación esto debido a estudios recientes para la generación de energía a base de metano, tratan de generar metano a partir de desechos orgánicos y luego quemar este gas para la generación de energía. Esto a su vez hace a la planta de extracción menos dependiente de los insumos energéticos y la hace más competitiva.

“En los próximos años veremos un fuerte crecimiento en el cultivo de palma africana y también evidenciaremos una importante consolidación del sector azucarero, porque ambos cultivos están posicionados en los mercados commodities y son idóneos para la producción de biodiésel y etanol” (Bernardo López, ministro de Agricultura, Ganadería y Alimentación).

El proceso de extracción de palma africana en Guatemala ofrece generación de empleos, lo cual estimula la economía del país y mejora la calidad de vida de los guatemaltecos.

IV. OBJETIVOS

A. Generales

1. Extraer aceite de palma africana utilizando los métodos seco y húmedo.
2. Realizar un análisis de ácidos grasos del aceite de palma extraído.
3. Realizar un balance de materia y energía de la extracción de aceite de palma africana.

B. Específicos

1. Separar por lotes el aceite extraído dependiendo del método empleado.
2. Controlar las variables de presión y temperatura en la autoclave.
3. Regular la apertura del volante y las revoluciones por minuto en el expeller.
4. Pesar el fruto de palma en cada etapa del proceso.
5. Determinar que clases de ácidos grasos contiene el aceite extraído por medio de un cromatograma.
6. Realizar pruebas de caracterización de aceites vegetales.
7. Realizar análisis de costos, para obtener el costo por galón.

V. PROBLEMA A RESOLVER

En los últimos años se ha sustituido la producción de aceite de algodón por el aceite de palma africana, ya que la extracción de aceite presenta un alto rendimiento, debido a lo anterior el presente trabajo pretende realizar un estudio sobre la extracción de aceite de palma por medio de diferentes métodos (método seco y el método húmedo con una variante utilizando arrastre de vapor), utilizando el equipo instalado en el Laboratorio de Operaciones Unitarias de la Universidad del Valle de Guatemala.

VI. METODOLOGÍA

A. Secuencia de actividades

- Conseguir la materia prima la cual se obtendrá en la finca Buena Vista, propiedad de la Asociación Nacional del Café (ANACAFÉ) ubicada en el departamento de Retalhuleu.
- Trabajar el fruto ya maduro y dejar que madure el resto de fruto de uno a dos días.
- Obtener aceite rojo de palma en Planta Piloto de Universidad del Valle de Guatemala.
- Repetir procedimiento.
- Caracterizar el aceite obtenido a nivel laboratorio mediante cromatografía de gases, ácidos grasos libres, índice de peróxidos e índice de yodo.

B. Equipo utilizado para la extracción de aceite de palma africana

1. Expeller

- Marca: Tinytech Rajkot India
- Motor
 - Cat No: N371OT
 - Spec: 376813Y659HT
 - Hp: 7 ½
 - Volts:230
 - Amps: 21.4-20.4
 - RPM: 1760
 - Hz: 60
 - Ser F: 1.15
 - Code: J
 - Des: B
 - Class: 7

2. Marmita

- Capacidad: 20 kg

3. Balanza Romana

- Marca: Detecto
- Capacidad: 100.0 lb

4. Autoclave

- Presión: 40 psi
- Temperatura: 287° F
- Serial No: 100-99

5. Prensa hidráulica

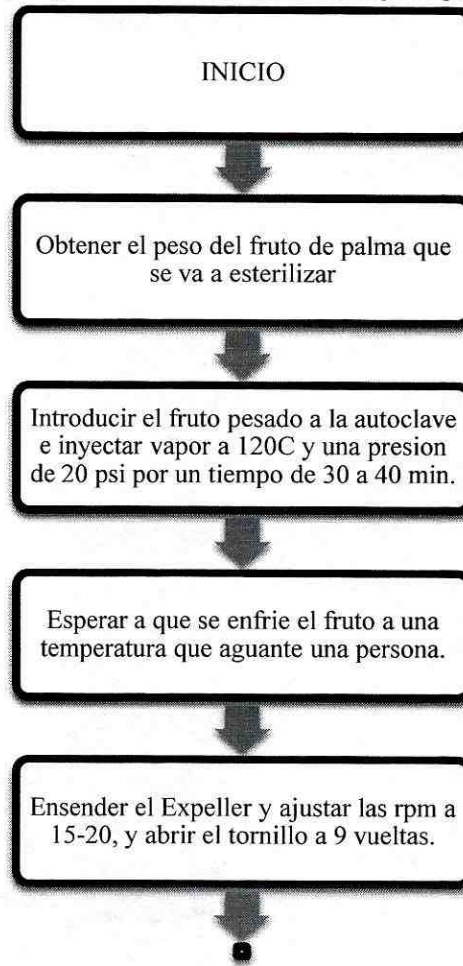
- Pistón: 7 ¼ in
- Placa: 7 ½ in (diámetro)
- Cilindro: 7 in (altura)

6. Caldera Pirotubular

- Modelo: : M 200 X-30
- Número de Serie: 70692
- Presión de vapor: 150 in²
- Entrada: 1255000 BTU/h
- Natural Gas 9.0 GPH

C. Obtención de aceite rojo de palma a nivel planta piloto

Figura 14: Diagrama de bloques para la extracción del aceite rojo de palma africana con método seco



Continúa Figura 14

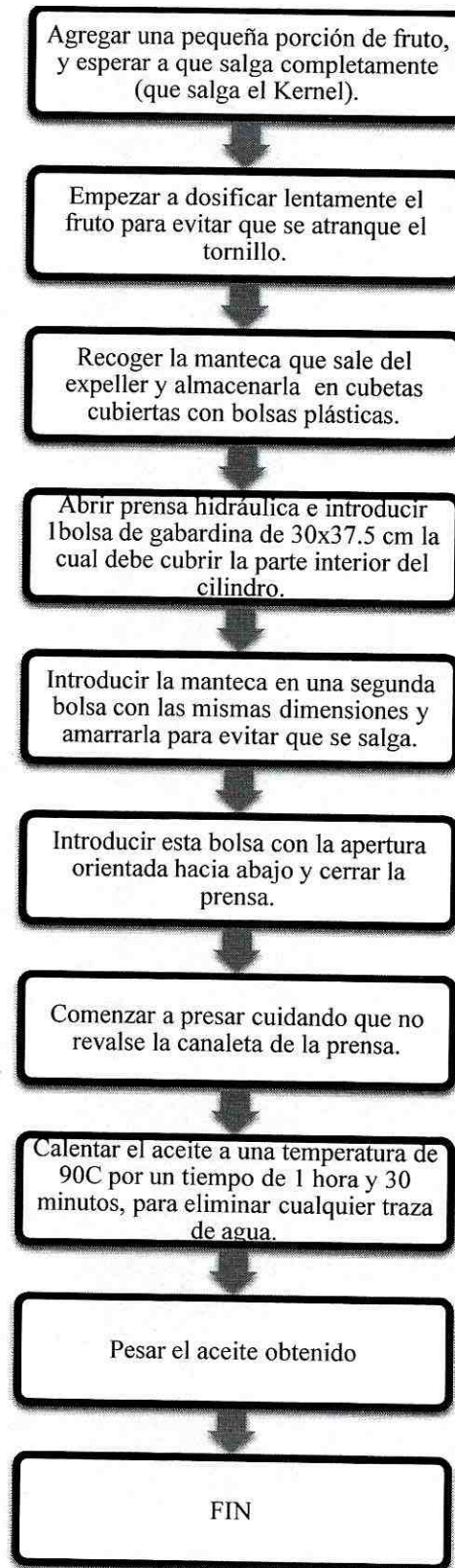
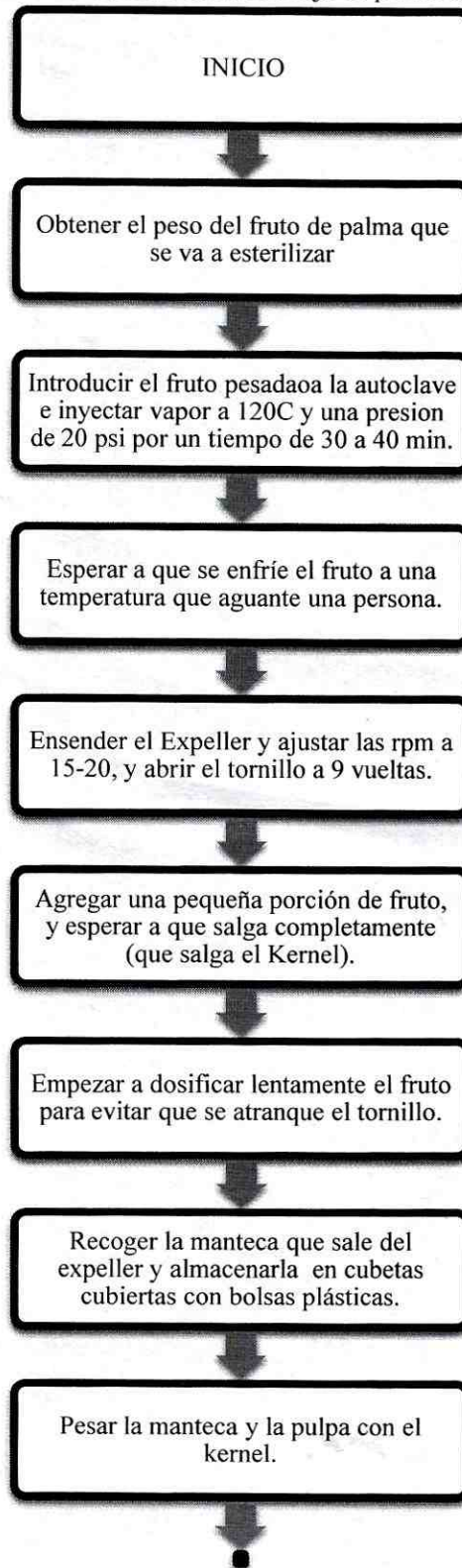
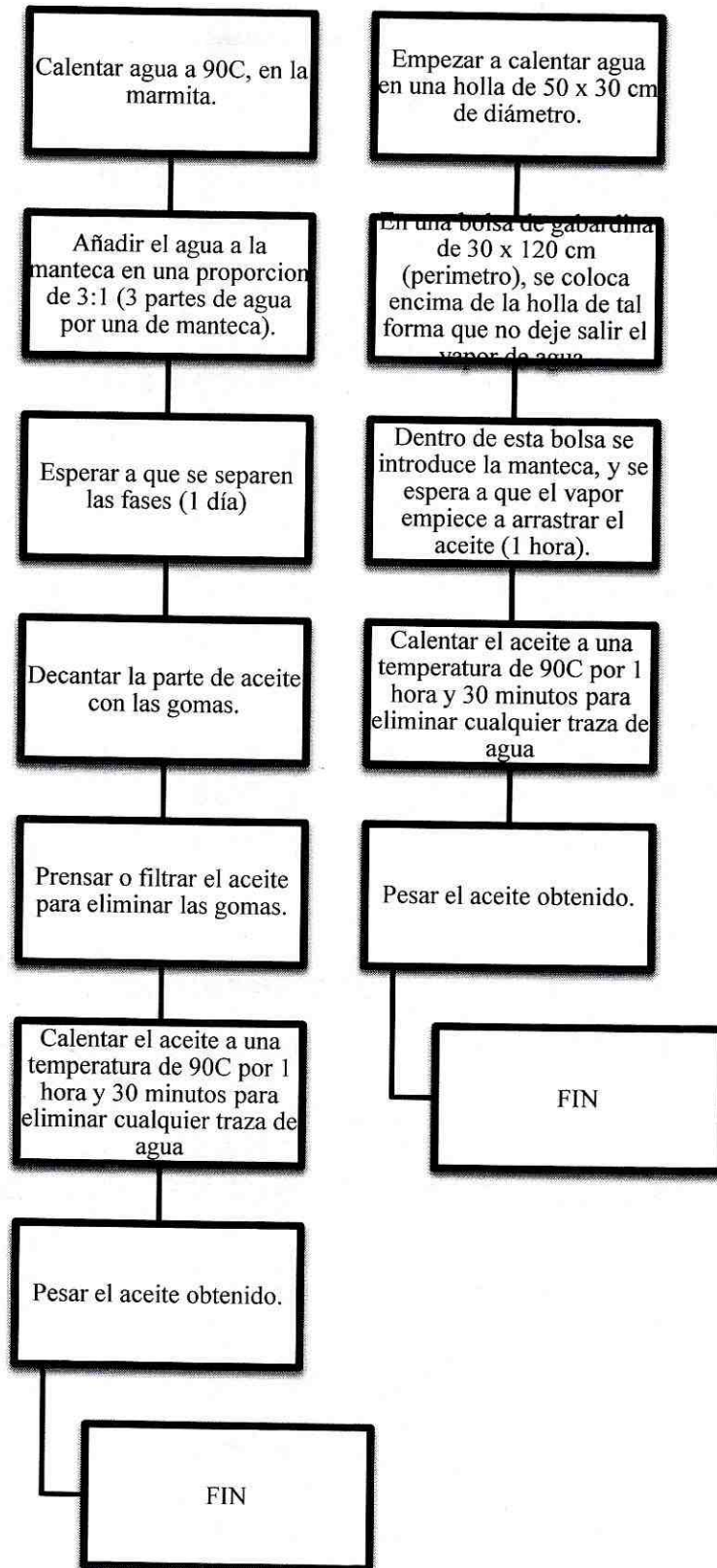


Figura 15: Diagrama de bloques para la extracción del aceite rojo de palma africana con método húmedo



Continúa Figura 15



D. Materiales y métodos para obtener el índice de acidez de los aceites

Para obtener la acidez de los aceites se utilizó el siguiente equipo y cristalería

- Balanza analítica 0.0001 g incertidumbre
- 2 Matraz de 250 mL
- Bureta de 50 mL
- 1 Beaker de 100 mL
- 1 Beaker de 250 mL
- 1 Probeta de 100 mL

Para obtener la acidez de los aceites se utilizaron los siguientes reactivos

- Etanol: éter etílico (1:1 v/v) 150 mL
- KOH 0.01 N (etanólico)
- Fenolftaleína etanólica (1%)

Procedimiento

- Pesar exactamente en un erlenmeyer entre 30 y 40 g de muestra y disolverlos con 150 mL de la mezcla de etanol-éter.
- Agregar unas gotas de fenolftaleína
- Agitar y titular con solución de KOH 0.01N valorada.

$$\text{Ecuación 7} \quad A = \frac{V \cdot C \cdot M}{10P}$$

Donde:

A = porcentaje de acidez

V = volumen en ml de KOH utilizado en la titulación

C = Normalidad estandarizada de KOH

M = masa molar del ácido oleico, 282 g/mol

P = Peso de la muestra en gramos

E. Materiales y métodos para obtener el índice de peróxidos de los aceites

Para obtener el índice de peróxidos de los aceites se utilizó el siguiente equipo y cristalería

- Balanza analítica 0.0001 g incertidumbre
- 2 Matraz de 500 mL
- Bureta de 50 mL
- 1 Beaker de 100 mL

- 1 Beaker de 50 mL
- 1 Probeta de 100 mL

Para obtener el índice de peróxidos de los aceites se utilizaron los siguientes reactivos

- 50 mL Mezcla ácido acético-cloroformo (3:2 v/v)
- 1 mL Solución saturada de KI (en agua)
- 100 mL Agua destilada
- Tiosulfato de sodio (0.1 N)
- 1 mL solución de almidón (1%)

Procedimiento

- Pesar 10 g de los lípidos en un matraz de 500 mL.
- Adicionar 50 mL de la mezcla ácido aceito-cloroformo y agregar 1 mL KI saturado, agitar por 20 segundos
- Dejar reposar por 40 segundos a temperatura ambiente. Adicionar 100 mL de agua destilada y agitar.
- Titular con tiosulfato de sodio hasta que la fase acuosa muestre un ligero color amarillo a yodo, adicionar 1 mL de solución de almidón y continuar la titulación hasta que el color azul desaparezca.

$$\text{Ecuación 8} \quad \text{Índice de peróxidos} = \frac{V \cdot N \cdot 1000}{\text{peso muestra}}$$

Donde:

N=normalidad del tiosulfato de sodio

V= volumen en mL de tiosulfato de sodio utilizado en la titulación

F. Materiales y métodos para obtener el índice de yodo de los aceites

Para obtener el índice de yodo de los aceites se utilizó el siguiente equipo y cristalería

- Balanza analítica 0.0001 g incertidumbre
- 2 Matraz de 500 mL
- Bureta de 50 mL
- 1 Beaker de 100 mL
- 1 Beaker de 50 mL
- 1 Probeta de 100 mL
- 1 Probeta de 250 mL
- 1 Probeta de 25 mL

- 1 Beaker de 1000 mL

Para obtener el índice de yodo de los aceites se utilizaron los siguientes reactivos

- 13.615 g yodo
- 825 mL ácido acético.
- 3 mL de Bromo
- Tiosulfato de sodio (0.1 N)
- 1 mL solución de almidón (1%)
- 10 mL KI (15%)
- 10 mL cloroformo
- 100 mL Agua destilada

Procedimiento para preparar reactivo Hanus

- Agregar 13.615 g yodo a 825 mL ácido acético y calentar hasta que se disuelva.
- Enfriar y agregar solución de bromo (3 mL de bromo en 200 mL ácido acético) en una proporción de 1:4 (v/v) a la solución de yodo.
- Dejar cubierta la solución con papel de aluminio hasta el día siguiente.

Procedimiento para obtener el índice de yodo de los aceites.

- Pesar 0.5000 g de grasa o 0.2500 de aceite.
- Colocar en un matraz de 500 mL 10 mL de cloroformo y 25 mL de reactivo Hanus
- Tapar, agitar y dejar en la oscuridad durante 30-45 minutos agitando de vez en cuando.
- Agregar 10 mL KI y 100 mL agua destilada recién hervida y fría.
- Titular yodo liberado con el tiosulfato de sodio, hasta que la solución cambie de amarillo a casi incolora.
- Adicionar indicador de almidón y titular hasta que el color azul desaparezca totalmente.
- Cerca del final de la titulación tapar y agitar enérgicamente de modo que algo de restos de yodo que haya quedado en la solución de cloroformo pueda ser recogida por la solución de yoduro de potasio.
- Determinar blanco.

$$\text{Ecuación 9} \quad \text{Índice de Yodo} = \frac{(B-S) \times 1.269}{m}$$

Donde:

B=mL de tiosulfato de sodio usados al titular el blanco.

S= mL de tiosulfato de sodio usados al titular la muestra.

m= peso de la muestra.

G. Materiales y métodos para cromatografía de gases

Para obtener el cromatograma de los aceites se utilizó el siguiente equipo y cristalería

- Balanza analítica 0.0001 g incertidumbre
- 2 balones de 25 mL
- Estufa
- Vial de 4 mL
- Columna SPB-5 (30m x 0.53 mm di X 1 microm)
- Inyector 245C, detector FID, ionización de llama 260C (H₂ 13 psi, Aire 36 psi)
- Horno 100° C, 10° C/min hasta 250° C, 10 min.
- Sistema Cromatográfico HP 5890II/ChemStation

Para obtener el índice de yodo de los aceites se utilizaron los siguientes reactivos

- NaOH 0.5 N (metanol)
- 3 mL de BF₃ en metanol 20%
- 5 mL de heptano
- Solución NaCl saturada
- 0.5 g sulfato de sodio anhidro
- Nitrógeno (43 psi) con Split 94:1, acarreador 2.4 mL/min, 2 psi in col.

Procedimiento para obtener cromatograma

- Calentar la muestra (90° C) en la estufa hasta que se homogenice.
- Colocar 20 gotas de aceite en balón.
- Agregar 5 mL de NaOH
- Colocar en una estufa y calentar a 70° C por 10 minutos hasta que saponifique totalmente.
- Agregar BF₃.
- Agregar Heptano.
- Agregar solución de NaCl hasta el aforo.
- Trasvasar la capa superior (heptano + ácidos grasos) a un vial que contenga el sulfato de sodio.
- Inyectar 4 µL de muestra en el cromatografo de gases.

VII. RESULTADOS

Los diferentes métodos empleados para la extracción de aceite rojo de palma africana cuentan con una sección en común que es la esterilización del fruto y la molienda del mismo. Se logró cuantificar, y determinar rendimientos de la extracción, debido a que ya se conocía el funcionamiento del equipo. Además, se experimentó con dos diferentes métodos y una variante de uno de éstos. Los métodos utilizados son el método seco, el método húmedo y su variante con arrastre de vapor. Los tres métodos tienen dos procesos en común, la esterilización y la molienda de la fruta, y para éstos procesos se tiene:

Tabla 1: Balance de materia para los procesos de esterilización y molienda de fruto de palma

	Peso (kg)	Porcentaje (% p/p)
Fruto esterilizada	136.08±0.33	100.0%
Manteca	56.50±0.17	41.5±0.16%
Fibra y kernel	63.30±0.10	46.5±0.14%
Diferencia	16.28±0.39	12.0±0.28%

Tabla 2: Balance de energía para los procesos de esterilización y molienda del fruto de palma

Proceso	Calor/trabajo requerido (kJ)	Calor/trabajo (kJ/kg)
Esterilización	596,821.30±7,667.94	4,385.63±57.34
Molienda	30.76	0.23±5.48×10 ⁻⁴

Después de haber obtenido la manteca se emplearon diferentes métodos, para la extracción del aceite contenido en la manteca. El primero que se empleó fue el método seco, para éste se obtuvo el porcentaje de recuperación de aceite contenido en la manteca y luego un porcentaje de rendimiento global (p/p):

Tabla 3: Porcentaje de rendimiento en peso para la extracción de aceite rojo de palma empleando el método seco.

Método	Peso del aceite obtenido (kg)	Porcentaje de recuperación	Porcentaje de rendimiento
Seco	9.39±0.95	16.7±1.69% (p/p)	6.9±0.70% (p/p)

Imagen 1: Molienda de fruto de palma africana, empleando prensa continua (Expeller)



Tabla 4: Balance de energía para la extracción de aceite rojo de palma, empleando el método seco.

Proceso	Calor/trabajo requerido (kJ)	Calor/trabajo (kJ/kg)
Prensado	206.34±3.44	3.65±0.06
Secado de aceite	11,927.55±109.60	11,088.38±18.67
Total prensado	608,764.63±155.40	15,477.89±23.59

Imagen 2: Prensado de manteca, utilizando prensa hidráulica



Para obtener las pruebas de caracterización de los aceites se tuvo que separar el aceite obtenido con los diferentes métodos, en lotes diferentes, evitando que éstos se contaminen con las impurezas que cada uno de los distintos aceites pueda contener.

Tabla 5: pruebas de caracterización de aceites realizadas para la muestra del aceite extraído empleando el método seco.

	% de acidez	Índice de peróxidos (mEq/kg)
Método seco	5.96±0.01%	10.0±0.1
Requerimiento	Menor a 5.0%	Menor a 5.0 (mEq/kg)

En el cromatograma obtenido para la muestra de aceite obtenida con el método seco se tiene el siguiente perfil de ácidos grasos.

Tabla 6: Composición de ácidos grasos en muestra de aceite extraído con método seco.

Compuesto	Método seco (% en el aceite)	Estándar (% en el aceite)
ÁCIDOS GRASOS SATURADOS		
Ácido palmítico	43.30%	44.3%
Ácido esteárico	5.01%	4.6%
Total	48.31%	48.9
ÁCIDOS GRASOS INSATURADOS		
Ácido linoléico	8.91%	10.5%
Ácido oleico	42.05%	38.7%
Total	50.96%	49.2
OTROS COMPUESTOS		
Otros compuestos	0.73%	1.90%
Total	0.73%	1.90%

El segundo método que se empleó fue el método húmedo, para este se obtuvo el porcentaje de recuperación de aceite contenido en la manteca y luego un porcentaje de rendimiento global (p/p):

Tabla 7: Porcentaje de rendimiento en peso para la extracción de aceite rojo de palma empleando el método húmedo.

Método	Peso del aceite obtenido (kg)	Porcentaje de recuperación	Porcentaje de rendimiento
Húmedo	16.94±0.60	30.0±1.04% (p/p)	12.5±0.44% (p/p)

Tabla 8: Balance de energía para la extracción de aceite rojo de palma, empleando el método húmedo.

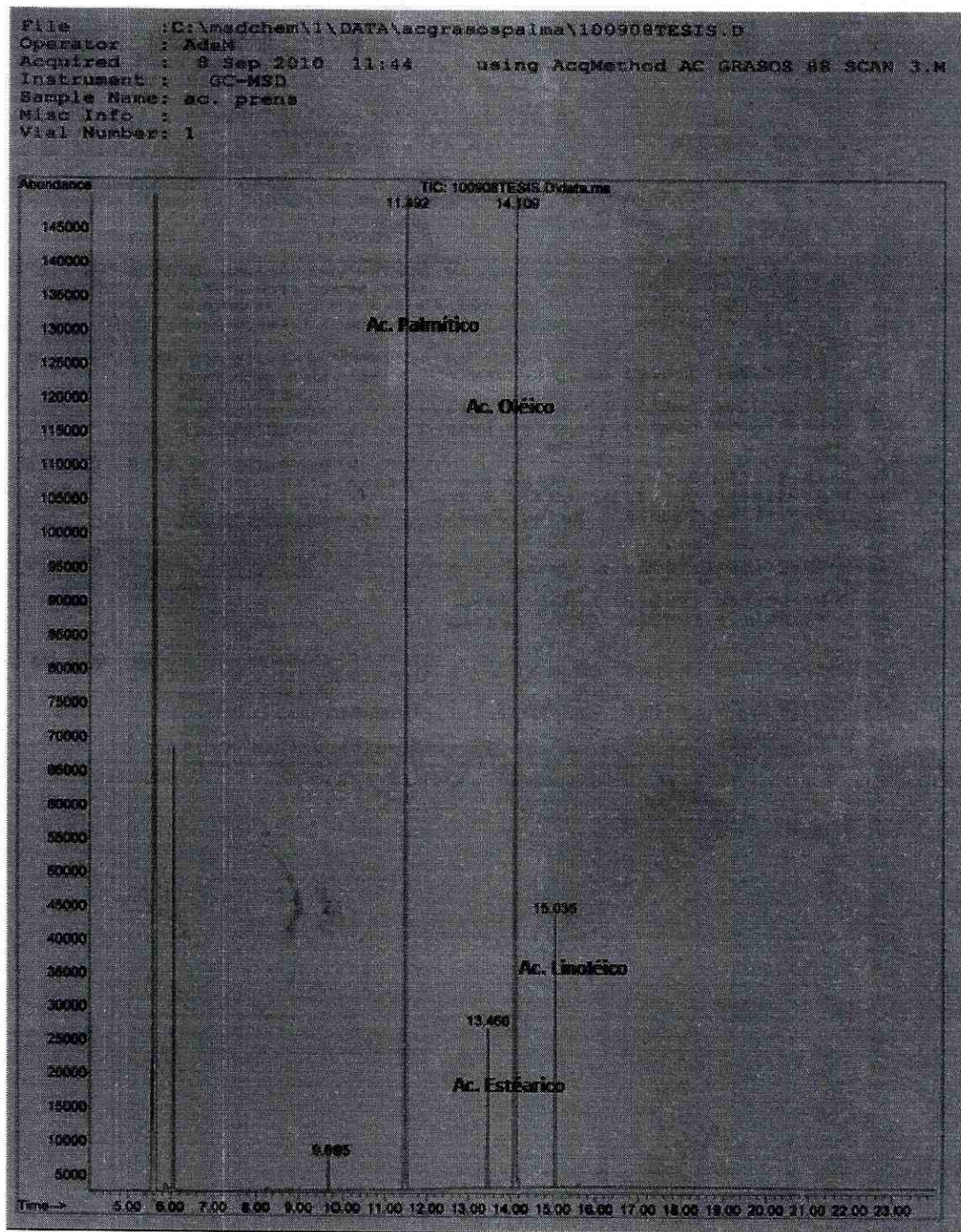
Proceso	Calor/trabajo requerido (kJ)	Calor/trabajo (kJ/kg)
Método húmedo	48,922.45±147.61	866.30±3.69
Secado de aceite	12,829.89±109.60	11,088.38±18.67
Total húmedo	658,579.50±214.04	16,340.53±23.62

Para obtener las pruebas de caracterización de los aceites se separó un lote que representa el aceite obtenido con el método húmedo y este presentó las siguientes características:

Tabla 9: pruebas de caracterización de aceites realizadas para la muestra del aceite extraído empleando el método húmedo.

	% de acidez	Índice de peróxidos (mEq/kg)
Método húmedo	7.70±0.01%	27.0±0.1
Requerimiento	Menor a 5.0%	Menor a 5.0 (mEq/kg)

Figura 16: Cromatograma para la muestra tomada del lote de aceite extraído con método seco



Library Search Report

Data Path : C:\msdchem\1\DATA\acgrasospalma\
 Data File : 100908TESIS.D
 Title :
 Acq On : 8 Sep 2010 11:44
 Operator : AdeM
 Sample : ac. prens
 Misc :
 ALS Vial : 1 Sample Multiplier: 1 Samp. Amt.: 1

Search Libraries: C:\Database\NIST05a.L Minimum Quality: 0

Unknown Spectrum: Apex
 Integration Events: ChemStation Integrator - umgf4agro.E

PK#	RT	Area%	Library/ID	Ref#	CAS#	Qual
1	9.695	0.73	C:\Database\NIST05a.L			
			4-Nonanol, 4-methyl-	28365	023418-38-4	9
			Nonanoic acid, methyl ester	37541	001731-84-6	9
			4-Nonanol, 4-methyl-	28366	023418-38-4	9
2	11.492	43.30	C:\Database\NIST05a.L			
			Pentadecanoic acid, 14-methyl-, me	105662	005129-60-2	98
			thyl ester			
			Hexadecanoic acid, methyl ester	105644	000112-39-0	97
			Hexadecanoic acid, methyl ester	105639	000112-39-0	97
3	13.462	5.01	C:\Database\NIST05a.L			
			Octadecanoic acid, methyl ester	123709	000112-61-8	97
			Octadecanoic acid, methyl ester	123700	000112-61-8	94
			Heptadecanoic acid, methyl ester	114851	001731-92-6	90
4	14.107	42.05	C:\Database\NIST05a.L			
			9-Octadecenoic acid (Z)-, methyl e	122321	000112-62-9	99
			ster			
			7-Octadecenoic acid, methyl ester	122298	057396-98-2	99
			8-Octadecenoic acid, methyl ester	122297	002345-29-1	99
5	15.035	8.91	C:\Database\NIST05a.L			
			9,12-Octadecadienoic acid (Z,Z)-,	121105	000112-63-0	99
			methyl ester			
			9,12-Octadecadienoic acid, methyl	121093	002462-85-3	99
			ester			
			9,12-Octadecadienoic acid (Z,Z)-,	121107	000112-63-0	99
			methyl ester			

Imagen 3: Extracción de aceite rojo de palma empleando el método húmedo

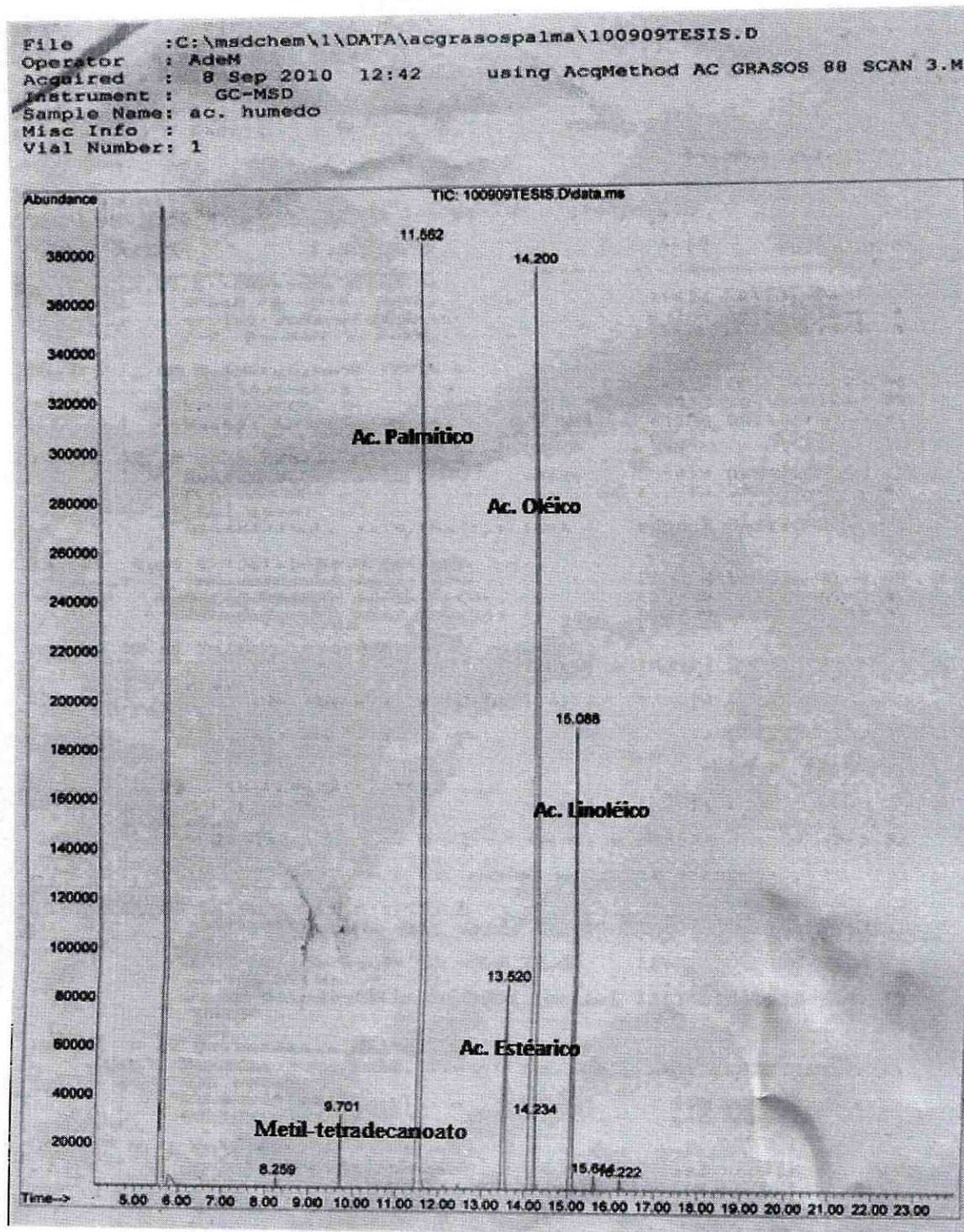


En el cromatograma obtenido para la muestra de aceite obtenida con el método húmedo se tiene el siguiente perfil de ácidos grasos.

Tabla 10: Composición de ácidos grasos en muestra de aceite extraído con método húmedo

Compuesto	Método húmedo (% en el aceite)	Estándar (% en el aceite)
ÁCIDOS GRASOS SATURADOS		
Ácido palmítico	37.88%	44.3%
Ácido esteárico	6.14%	4.6%
Total	44.02%	48.9
ÁCIDOS GRASOS INSATURADOS		
Ácido linoléico	11.02%	10.5%
Ácido oleico	42.51%	38.7%
Total	53.53%	49.2
OTROS COMPUESTOS		
Metil-tetradecanoato	1.02%	---
Otros compuestos	1.43%	1.90%
Total	2.45%	1.90%

Figura 17: Cromatograma para la muestra tomada del lote de aceite extraído con método húmedo



Library Search Report

Data Path : C:\msdchem\1\DATA\acgrasospalma\
 Data File : 100909TESIS.D
 Title :
 Acq On : 8 Sep 2010 12:42
 Operator : Adem
 Sample : ac. humedo
 Misc :
 ALS Vial : 1 Sample Multiplier: 1 Samp. Amt.: 1

Search Libraries: C:\Database\NIST05a.L Minimum Quality: 0

Unknown Spectrum: Apex
 Integration Events: ChemStation Integrator - events.e

Pk#	RT	Area%	Library/ID	Ref#	CAS#	Qual
1	8.258	0.11	C:\Database\NIST05a.L			
			Nonanoic acid, methyl ester	37542	001731-84-6	9
			N-Nitrosodimethylamine	765	000062-75-9	4
			2-Propanone, O-methyloxime	1862	003376-35-0	4
2	9.700	1.02	C:\Database\NIST05a.L			
			Methyl tetradecanoate	86751	000124-10-7	96
			Methyl tetradecanoate	86753	000124-10-7	95
			Methyl tetradecanoate	86750	000124-10-7	95
3	11.560	37.88	C:\Database\NIST05a.L			
			Hexadecanoic acid, methyl ester	105644	000112-39-0	97
			Pentadecanoic acid, 14-methyl-, methyl ester	105662	005129-60-2	96
			Hexadecanoic acid, methyl ester	105646	000112-39-0	95
4	13.521	6.14	C:\Database\NIST05a.L			
			Octadecanoic acid, methyl ester	123709	000112-61-8	98
			Octadecanoic acid, methyl ester	123708	000112-61-8	97
			Octadecanoic acid, methyl ester	123700	000112-61-8	97
5	14.198	42.51	C:\Database\NIST05a.L			
			9-Octadecenoic acid (Z)-, methyl ester	122323	000112-62-9	99
			9-Octadecenoic acid, methyl ester, (E)-	122326	001937-62-8	99
			9-Octadecenoic acid, methyl ester, (E)-	122328	001937-62-8	98
6	14.235	0.89	C:\Database\NIST05a.L			
			9-Octadecenoic acid (Z)-, methyl ester	122321	000112-62-9	95
			9-Octadecenoic acid (Z)-, methyl ester	122323	000112-62-9	91
			10-Octadecenoic acid, methyl ester	122312	013481-95-3	91
7	15.085	11.02	C:\Database\NIST05a.L			
			9,12-Octadecadienoic acid, methyl ester	121093	002462-85-3	99
			9,12-Octadecadienoic acid (Z,Z)-, methyl ester	121105	000112-63-0	99
			10,13-Octadecadienoic acid, methyl ester	121100	056554-62-2	99
8	15.613	0.27	C:\Database\NIST05a.L			
			Hexadecanoic acid, 15-methyl-, methyl ester	114867	006929-04-0	64
			Aminoguanidine	845	000079-17-4	5
			Aminoguanidine	846	000079-17-4	5
9	16.223	0.16	C:\Database\NIST05a.L			
			Cyclohexene, 3-ethenyl-	5292	000766-03-0	47
			Cyclohexanemethanol, 4-methylene-	11108	001004-24-6	37
			Cyclopentene, 1-(2-propenyl)-	5335	037689-19-3	35

Library Search Report

Data Path : C:\msdchem\1\DATA\acgrasospalma\
Data File : 100909TESIS.D
Title :
Acq On : 8 Sep 2010 12:42
Operator : AdaM
Sample : ac. humedo
Misc :
ALS Vial : 1 Sample Multiplier: 1 Samp. Amt.: 1

Search Libraries: C:\Database\NIST05a.L Minimum Quality: 0

Unknown Spectrum: Apex
Integration Events: ChemStation Integrator - events.e

Pk#	RT	Area%	Library/ID	Ref#	CAS#	Qual
-----	----	-------	------------	------	------	------

Además de los dos métodos anteriormente presentados se trabajó con una variante del método húmedo en la cual se realizó la extracción del aceite por medio de arrastre de vapor, para esta variante se obtuvo el porcentaje de recuperación de aceite contenido en la manteca y luego un porcentaje de rendimiento global (p/p):

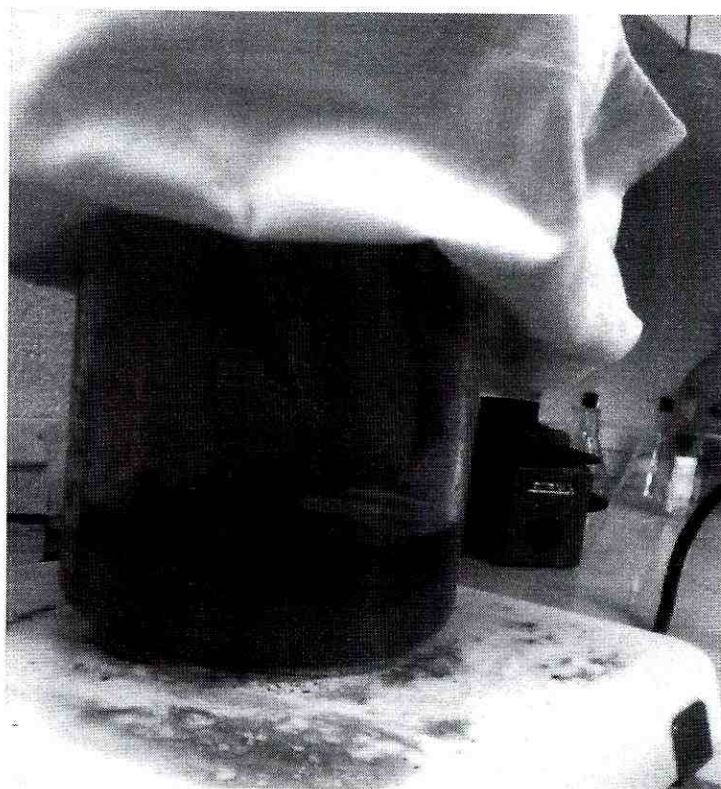
Tabla 11: Porcentaje de rendimiento en peso para la extracción de aceite rojo de palma empleando variante de método húmedo, por medio de arrastre de vapor.

Método	Peso del aceite obtenido (kg)	Porcentaje de recuperación	Porcentaje de rendimiento
Húmedo-vapor	21.46±0.26	38.0±0.43% (p/p)	15.8±0.19% (p/p)

Tabla 12: Balance de energía para la extracción de aceite rojo de palma, empleando variante de método húmedo, por medio de arrastre de vapor.

Proceso	Calor/trabajo requerido (kJ)	Calor/trabajo (kJ/kg)
Método húmedo con arrastre de vapor	84,623.99±392.34	1,498.05±5.28
Secado de aceite	13,371.30±109.60	11,088.38±18.67
Total húmedo-vapor	627,183.20±421.94	16,972.28±23.63

Imagen 4: Extracción de aceite de rojo de palma empleando la variante del método húmedo por arrastre de vapor.



Para obtener resultados fue necesario realizar una extracción preliminar, con el fin de conocer el equipo. Para la extracción preliminar se tienen los siguientes resultados:

Tabla 13: Balance de masa para la extracción preliminar de aceite rojo de palma africana.

Corrida	Preliminar	Segunda corrida
Peso inicial	112.0 \pm 0.04 kg	136.08 \pm 0.33
Manteca	33.5 \pm 0.04 kg	56.50 \pm 0.17
Fibra y Kernel	37.5 \pm 0.04 kg	63.30 \pm 0.10
Diferencia	41.0 \pm 0.04 kg	16.28 \pm 0.39

Figura 18: Diagrama de flujo del proceso de extracción de aceite rojo de palma africana, con el método húmedo

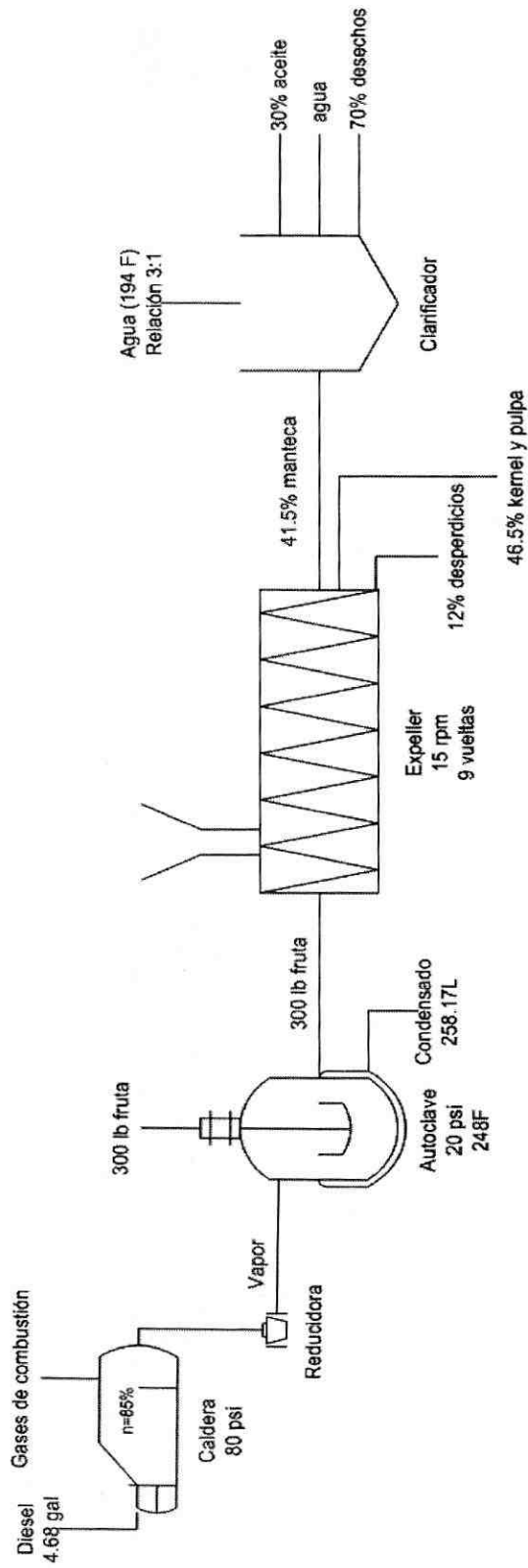


Figura 19: Diagrama de flujo del proceso de extracción de aceite rojo de palma africana, con el método húmedo con arrastre de vapor

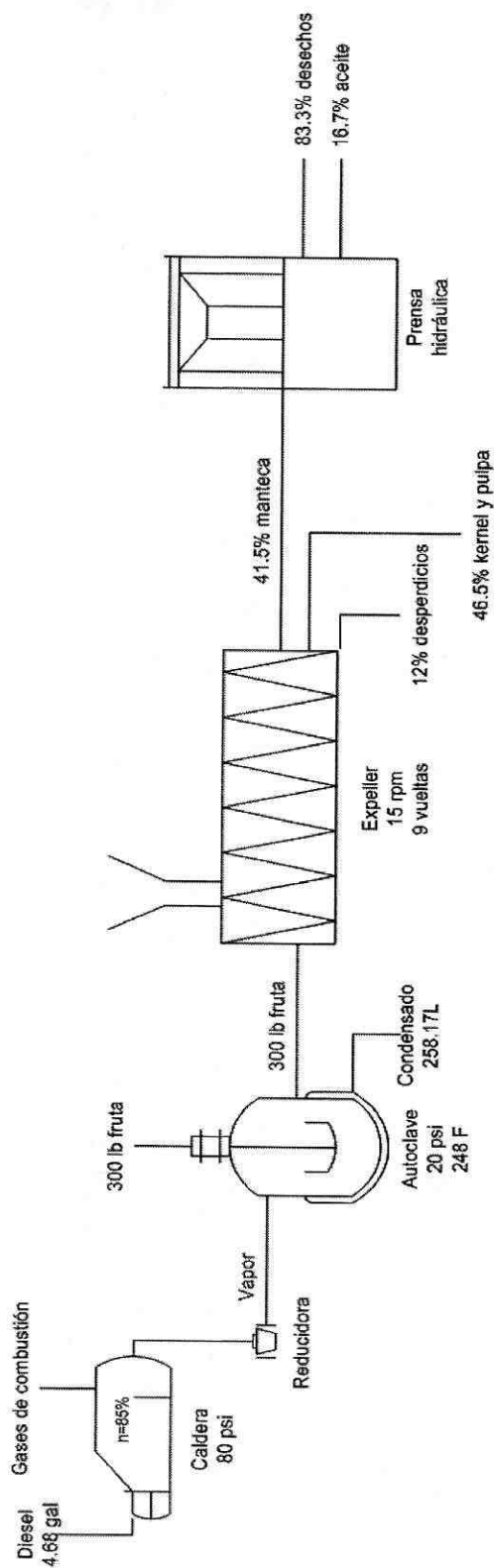
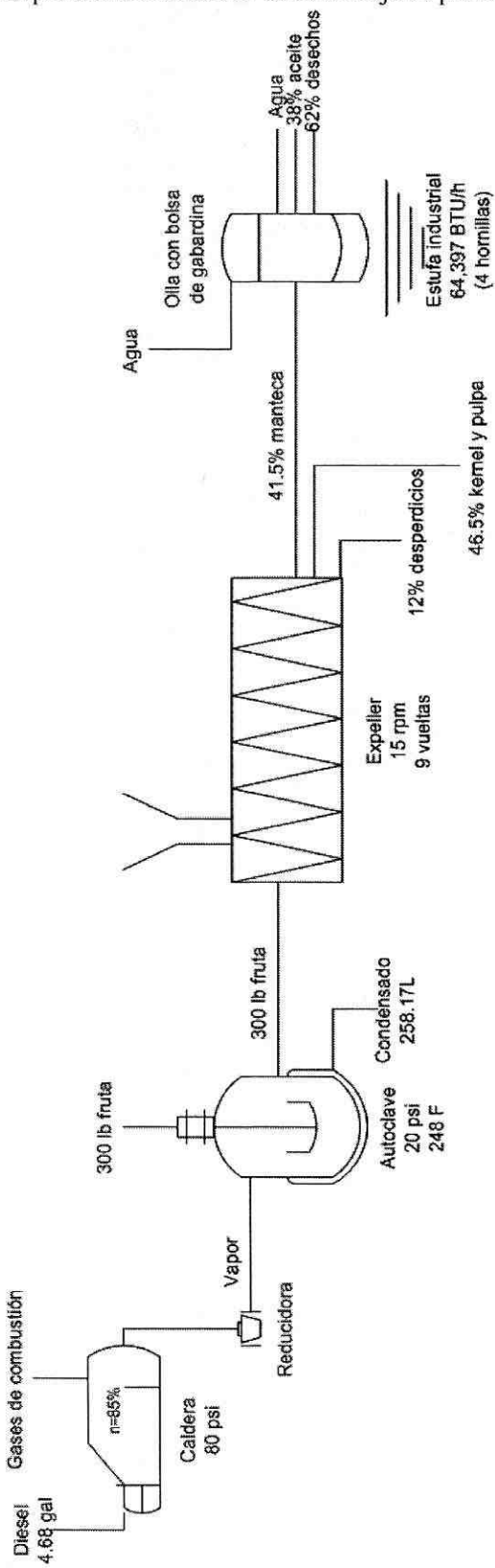


Figura 20: Diagrama de flujo del proceso de extracción de aceite rojo de palma africana, con el método seco



VIII. DISCUSIÓN DE RESULTADOS

A. Extracción preliminar

Este trabajo de investigación tiene como objetivo presentar el estudio sobre la extracción y caracterización del aceite obtenido de fruta de palma, a nivel de planta piloto en el Laboratorio de Operaciones Unitarias de la Universidad del Valle de Guatemala. Las pruebas de caracterización fueron realizadas en el laboratorio de alimentos y la cromatografía de gases fue realizada en el laboratorio de instrumental avanzado de la Universidad del Valle de Guatemala.

Los diferentes métodos empleados para la extracción de aceite rojo de palma africana cuentan con una sección en común que es la esterilización del fruto y la molienda del mimo. Para poder obtener resultados confiables fue necesario realizar una extracción preliminar, con el fin de conocer el equipo y aprender a utilizarlo de una forma tal que se perfeccione la extracción del aceite y se minimicen las pérdidas. En esta extracción preliminar no se obtuvo rendimientos de aceite pues no era el objetivo, para lograr cumplir los objetivos del trabajo de investigación se tuvo que realizar una segunda extracción.

B. Esterilización y molienda de fruto de palma africana

Para los diagramas de flujo presentados en la sección de resultados se puede observar que el proceso de extracción de aceite rojo de palma es un proceso lineal, esto debido a que no se utilizaron los subproductos de a la extracción. El proceso de extracción se realizó con dos diferentes métodos y una variante de uno de estos, estos métodos son el método seco que se denomina seco ya que no se utiliza ningún solvente ni medio extractivo como el agua caliente para realizar el proceso, el método húmedo que consiste en extraer el aceite de la manteca obtenida del expeller por medio de agua caliente y su variante que es extraer el aceite por medio de arrastre de vapor. Todos estos procesos tienen dos secciones en común que es el esterilizado de la fruta de palma y la molienda de la fruta.

La esterilización de fruta se llevó a cabo en la autoclave del Laboratorio de Operaciones Unitarias de la Universidad del Valle, con el fin de inactivar la lipasa y algunas otras enzimas que pueda contener la fruta, ya que de no realizar este proceso las enzimas empiezan a romper los triglicéridos en ácidos grasos libres aumentando así el porcentaje de acides en el aceite, y esto a la larga afecta el proceso y el rendimiento de aceite. El proceso de esterilización se llevó a cabo con las siguientes condiciones: 120° C y 20 psi lo cual permite sobrecalentar el vapor y agilizar el proceso de esterilización. El tiempo de

esterilización fue de 30 a 40 minutos dependiendo de la madurez del fruto, dándole más tiempo de esterilización al fruto no maduro con el fin de que este se ablande más y sea fácil molerlo en el expeller.

La importancia de este paso del proceso de extracción es muy grande debido a que este proceso debe ser lo más rápido posible después de haber cortado la fruta, porque se sabe por experiencia de empresas grandes que a diferencia de lo que dice la literatura que recomienda esperar de uno a dos días para esterilizar la fruta no madura con el fin de esperar a que madure, esto no sucede ya que la fruta después de haber sido cortada para inmediatamente la producción de aceite y empieza la generación de lipasa que es la enzima que rompe los triglicéridos, y forma ácidos grasos libres. Es por esto que no se debe aceptar fruta de palma inmadura, sino que se debe dejar que madure en la planta y luego ser cortada, de lo contrario la empresa que realice la extracción está perdiendo aceite y por ende dinero.

La esterilización del proceso es uno de los pasos que demanda más energía, ya que es energía calórica que cede el vapor a la fruta, para la esterilización de toda la fruta se necesitó $596,821.30 \pm 7,667.94$ kJ lo que es equivalente a $4,385.63 \pm 57.34$ kJ/kg. Para obtener estos datos se asumió que la caldera estaba trabajando con una eficiencia de 85%, lo cual no está del todo mal ya que en prácticas anteriores con el aparato Orsat se determinó la eficiencia de combustión y se obtuvo este porcentaje. Con este porcentaje se puede saber cuánto calor del diesel ($702,113.39 \pm 9,021.11$ kJ) se transmitió al agua, y a partir de este dato se puede saber cuánta agua se evaporó con las tablas de vapor (257.32 ± 3.30 L). Esto no se cuantificó experimentalmente ya que la trampa de vapor está en un lugar difícil de acceder y además hay agua que condensa dentro de la autoclave lo cual hace más difícil su cuantificación.

El proceso de molienda se realizó con el molino continuo tipo Expeller con las siguientes condiciones: 15 revoluciones por minuto, y una apertura del tornillo de nueve vueltas. Estas condiciones se seleccionaron después de repetidas pruebas, ya que es muy importante seleccionar bien las condiciones para evitar que el tornillo se atranque con el kernel de la fruta de palma. Las 15 rpm se seleccionaron ya que si se aumentaba, llegaba un punto en el que el tornillo se saturaba de fruta y ya no molía, y las nueve vueltas de apertura del tornillo se seleccionaron porque a una menor apertura el tornillo se atrancaba con el kernel de la fruta de palma haciendo que se detuviera el expeller, esta detención del expeller significa liberar el tornillo para poder extraer el kernel que se quedó atascado en el tornillo. Además a una menor apertura de tornillo se muelen algunos de los coquitos lo cual afecta la calidad del aceite rojo de pala, debido a que el aceite del coquito es diferente en composición al del aceite de palma (contenido más alto de ácidos grasos saturados). Por otro lado si se realiza la molienda con una mayor apertura del tornillo se deja fruta con un alto contenido de aceite lo cual perjudica el rendimiento.

El proceso de esterilización se comprobó por diferencia de pesos que no afecta a la fruta ya que los pesos antes y después son los mismos lo que indica que no hay o es muy poca la humedad que se queda atrapada dentro de la fruta de palma. El proceso de molienda comenzó con 136.08 ± 0.33 kg y terminó con 56.50 ± 0.17 kg de manteca, 63.30 ± 0.10 kg de fibra y kernel y 16.28 ± 0.39 kg de materia que no se pudo

aprovechar. Estos pesos representan los siguientes porcentajes: $41.5 \pm 0.16\%$ de manteca, $46.5 \pm 0.14\%$ y $12.0 \pm 0.28\%$ de materia no aprovechada. Como se puede observar el producto mayoritario después de la molienda no es la manteca como se esperaría, sino el kernel y la fibra, estos productos todavía contienen una gran cantidad de aceite, pero este aceite ya es más difícil obtenerlo ya que se encuentra muy ligado a las células vegetales, pero se podría extraer con un método húmedo o su variante con extracción por arrastre de vapor, esto aumentaría el rendimiento de aceite, pero se tendría que determinar si es económicamente viable.

A este subproducto de la extracción se le puede dar otros usos, entre ellos está la generación de biogás el cual se podría utilizar para el calentamiento del agua si se opta por un método húmedo. En relación a la manteca obtenida se puede observar que es un porcentaje muy bajo ya que a esta manteca todavía se le tiene que hacer la extracción de aceite lo cual reduce el porcentaje de rendimiento, por lo que para mejorar este porcentaje de rendimiento habría que hacerle una extracción a la fibra y kernel o aumentar el porcentaje de extracción de aceite de la manteca. Un factor determinante es la temperatura de entrada de la fruta al molino, por lo que a mayor temperatura mayor extracción de manteca, esto se debe a que la viscosidad del aceite disminuye y logra salir con mayor facilidad de las células vegetales, además se pudo observar que entre más caliente estuviera el tornillo del expeller mayor la extracción de manteca, y este se calentaba debido a la fricción que causa la fruta al molino. Debido al factor temperatura es que se trabajo rápidamente la fruta después de haber salido de la autoclave.

Las pérdidas de materia se dieron debido a los siguientes factores: el proceso de molienda es un proceso muy sucio por lo que es muy fácil tener pérdidas de manteca, fibra y kernel. Las frutas de palma africana se caían al momento de alimentar el molino. Debido a estos factores fue que se decidió trabajar cubriendo el expeller y las cubetas donde se recibía la manteca con bolsas plásticas para reducir las pérdidas de manteca, además se cubrió el piso con periódicos para facilitar la limpieza del equipo al momento de terminar la molienda, aun así las pérdidas fueron muy grandes, pero esto se debió a que la manteca quedaba adherida al tornillo del expeller y era muy difícil controlar las pérdidas de manteca en cualquier orificio del expeller.

En cuanto al consumo de energía, este proceso no demanda de mucha energía, ya que la energía eléctrica es convertida en un trabajo mecánico, el trabajo realizado por el motor de 7.5 hP del expeller fue de 30.76kJ lo que equivale a $0.23 \pm 5.48 \times 10^{-4}$ kJ/kg, este dato se calculó con la potencia del motor y el tiempo de uso que fueron 5:30 horas, este tiempo se puede reducir un poco más ya que la parte de esterilización y molienda fueron realizadas al mismo tiempo, por lo que hay tiempos en los que se dejó de alimentar el expeller para ir a descargar la fruta de la autoclave, por lo que si se contara con varios operarios se puede reducir el tiempo de molienda. Se debe recordar que para que la molienda sea más efectiva se debe hacer en caliente por lo que es razón suficiente para realizar las dos operaciones al mismo tiempo.

El costo de esterilizar los 136.08 ± 0.33 kg fue de $Q97.23 \pm 1.25$, y esto se obtuvo con los galones de diesel consumidos para la esterilización los cuales fueron 4.67 ± 0.06 gal y el precio del diesel que se tomó como $Q20.82$. Como se sabe el precio del diesel varía conforme el tiempo por lo que este costo podría variar al momento de trasladar el proceso a nivel industrial. Para el costo de molienda se tiene que el precio de la electricidad es de $1.4637Q/kW-h$ y el tiempo de uso del motor del expeller fue de 5:30 horas por lo que se obtuvo un costo de $Q45.02$.

C. Método seco

El primer método evaluado para la extracción de aceite rojo de palma fue el método seco, que consistió en filtrar la manteca por medio de dos bolsas de gabardina, las cuales actuaron como medio filtrante y a estas bolsas se les hizo presión por medio de una prensa hidráulica para aumentar el rendimiento del filtrado (Imagen 2). Lo que se pudo observar fue que si la manteca ya estaba fría el rendimiento de este método aumenta, esto se puede deber a que se forma una mejor torta cuando la manteca está fría que cuando la manteca está más caliente y fluida ya que al estar muy fluida esta satura la gabardina con mayor rapidez, impidiendo que se puede continuar filtrando. Las bolsas que se utilizaron fueron hechas con un lazo de cáñamo el cual permitía que se cerraran las bolsa, aun así fue necesario emplear dos bolsas para el filtrado por dos razones, la primera es que con dos bolsas se le puede hacer una mayor presión a la bolsa sin peligro que esta explote y la segunda razón es que el cerrado de la bolsa no es perfecto por lo que se emplea una segunda bolsa para tapar la salida de la bolsa que contiene la manteca, es decir se introduce una bolsa adentro de la otra, pero de manera contraria, esto garantiza que cualquier traza de manteca que rebalse la primera bolsa va a ser retenida por la segunda, evitando así que el aceite se contamine con la manteca. La presión máxima que se le pudo imprimir a las bolsas de gabardina fue de 22,000 lb de presión, ya que al sobrepasar esta presión alguna de las dos bosas sede y se libera la manteca, arruinando así el aceite filtrado ya que se mezclan y hay que repetir el proceso. Para poder hacerle una mayor presión, se podría utilizar bolsas de tela metálica con un mesh muy fino para evitar que se pase cualquier traza de manteca.

Este método cuenta con una ventaja muy notoria la cual es que el aceite que resulta del filtrado es un aceite con menor contenido de humedad, por lo que es estable y es más fácil de secar. Otra de sus grandes ventajas es que se elimina la parte tediosa de remover las gomas que se adhieren al aceite, esto no quiere decir que se eliminaría el proceso de desgomado en la refinación del aceite, ya que el aceite rojo de palma todavía contiene gomas y algunas otras impurezas. Entre las desventajas de este método está que el rendimiento que tiene es muy bajo ya que en la etapa de extracción solo se logra un $16.7 \pm 1.69\%$ de recuperación de aceite que está contenido en la manteca, esto es un porcentaje muy bajo, debido a que el porcentaje de rendimiento de aceite debería de estar en un 18-25% para que se considerara bueno y este porcentaje de recuperación es en base a la manteca, para obtener el porcentaje global se tuvo que multiplicar este porcentaje por el porcentaje de manteca ($41.5 \pm 0.16\%$) lo cual da un porcentaje de rendimiento de $6.9 \pm 0.70\%$. Como se puede ver este porcentaje no es aceptable, para poder incrementar este

porcentaje se podría utilizar otro tipo de prensa, una que lograra ejercer una mayor presión al medio filtrante, y que el medio filtrante fuera más resistente para evitar que se explote. Algo que también es recomendable es mezclar este método con otro más, por ejemplo se podría hacer un método seco-solvente que involucrara una etapa de prensado y a la torta remanente hacerle lavados con solvente (hexano), esto incrementaría enormemente el porcentaje de rendimiento pero a su vez se tendría que diseñar un equipo de recuperación de solvente los cuales son muy caros.

Otra de las ventajas de este método es que demanda de poca energía 206.34 ± 3.44 kJ o su equivalente 3.65 ± 0.06 kJ/kg, para obtener este trabajo fue necesario medir la distancia recorrida por el pistón de la prensa hidráulica y la fuerza que éste ejerció (22,000lb). En este cálculo hay que observar que el trabajo hecho calculado es el realizado por el pistón, ya que el trabajo que lleva a cabo la persona es mínimo, debido al principio de Pascal se permite intensificar la fuerza que realiza la persona.

Después de haber sido presado el aceite debe ser secado con temperatura moderada, para evitar que se descomponga el aceite (90° C), y facilitar la evaporación del agua que dicho aceite contiene. Este proceso se hizo con una estufa eléctrica de 3kW por un tiempo de una hora, lo cual garantiza la evaporación del agua contenida dentro del aceite para evitar la una futura oxidación del aceite. El consumo de energía en esta parte del proceso fue de $11,927.55 \pm 109.60$ kJ o su equivalente de $11,088.38 \pm 18.67$ kJ/kg, este dato puede dar un poco de confusión ya que son muy similares y esto se debe a que el consumo de energía de la estufa eléctrica es 10,799.61 kJ/h, pero esta energía es necesaria para cualquier cantidad de materia, es decir esta energía es necesaria para secar n kilogramos de aceite ya que el tiempo de secado no es variable, es el necesario para evaporar el agua contenida en el aceite, por lo que esto vuelve la potencia de la estufa en algo constante. Para solucionar este problema se puede asumir que la estufa tiene una capacidad de secar 10 kg por tanda por lo que el consumo dependería del número de secadas, esto no soluciona el problema del todo ya que al tener 11 kg igual se necesitaría la energía de dos horas.

Para el balance de energía global se tiene que el método seco fue el que demandó una menor cantidad de energía $608,764.63 \pm 155.40$ kJ o su equivalente $15,477.89 \pm 23.59$ kJ/kg, esto se debe a que el proceso de extracción requiere muy poca energía lo cual beneficia al balance global. Se puede observar que el equivalente del requerimiento de energía en kJ/kg no es un valor real ya que si se multiplica los kilogramos con los que se empezó el proceso no se obtendrá la cantidad de energía gastada, esto se debe a que no se obtiene la misma cantidad materia al final del proceso por lo que estas pérdidas de materia afectan a todo el proceso.

El costo de realizar la extracción de aceite por medio de este método es algo elevado y esto se debe al bajo rendimiento que el éste posee. El costo de esterilización y molienda es de 30.25 ± 0.59 Q/kg, y para obtener dicho precio primero se obtuvo el precio de esterilizar los 136.08 ± 0.33 kg y éste se dividió entre el rendimiento global, esto porque en cada etapa del proceso se pierde materia y para poder corregir esto se debe ir incrementando el precio de las dos operaciones conforme el proceso va perdiendo materia, quiere

decir que conforme la materia va siendo transformada, su precio va incrementando y si el rendimiento es bajo el precio del aceite va a subir. Para obtener el costo de secar el aceite se asumió que la estufa puede secar 10 kg de aceite por hora lo cual da un costo de 0.44 Q/kg, se incurre error, pero es muy bajo y este dato da una excelente aproximación al momento de obtener el precio por kg de aceite. Con estos costos se obtuvo el costo final de haber procesado la fruta con el método seco y fue de Q288.43±1.25.

El precio del aceite por kilogramo es de Q30.69±0.59 lo cual se convirtió a costo por galón de aceite producido y este es de Q103.18±1.98, como se puede ver este precio es muy elevado ya que al aceite todavía le hace falta ser refinado y analizado por lo que el precio se incrementaría todavía más. Con este costo se puede concluir que el método seco no es un método viable, ya que es muy ineficiente y por lo mismo incrementa sus costos. El costo de aceites para el consumidor (mezcla soya-palma) está alrededor de 38.00 Q/3L lo cual está por debajo del costo del aceite rojo de palma obtenido, por lo que se puede ver que la extracción fue ineficiente.

Para las pruebas de caracterización realizadas a las dos muestras de aceite, la prueba del aceite extraída con el método seco fue la que presentó los mejores resultados, empezando porque su porcentaje de acidez fue de 5.96±0.01% estando un poco encima de los límites requeridos en un aceite crudo (5%). Este resultado se puede deber a que una de las desventajas de la extracción mecánica es que los aceites se contaminan con metales pesados especialmente con hierro el cual actúa como catalítico para la oxidación de los aceites. Además de la prueba de porcentaje de acidez se realizó la prueba de índice de peróxidos, la cual mide la concentración de los productos iniciales de la oxidación lipídica, esto quiere decir que determina la concentración de los iniciadores de la reacción de oxidación, para poder determinar que tan oxidado está el aceite se debería de haber realizado una prueba de índice de p-anisidina, la cual no se realizó por falta del reactivo p-anisidina. Estas dos pruebas deben ser realizadas para determinar el estado de oxidación del aceite porque ambas son complementarias al momento de decidir si vale la pena refinar un aceite crudo o no. Para el aceite se tiene que el índice de peróxidos fue de 10.0±0.1mEq/kg, lo cual está por encima de los estándares de aceptación (5.0 mEq/kg), esto indica que el aceite se está empezando a ranciar. Por el color y olor que presentaba el aceite al momento de hacer la prueba se podría asumir que los productos de la oxidación todavía estaban en la etapa de formación ya que presentaba un color rojo intenso y un olor parecido al que se olía en la molienda de la fruta. Además de estos dos análisis se realizó un último que fue el análisis de índice de yodo el cual da el contenido de insaturaciones en el aceite, su valor dio 35.46±0.05, pero este análisis no se tomó en cuenta para los resultados debido a que el valor del blanco y de las muestras fueron muy altas, esto se puede deber a que el aceite está muy oxidado o que durante la prueba se favoreció la halogenación del aceite, es decir la sustitución del hidrógeno de la cadena carbonada por el yodo.

Además de las pruebas de caracterización se llevó a cabo una cromatografía para determinar la concentración de los ácidos grasos en el aceite, y este análisis sirve para determinar si el aceite presenta las concentraciones de ácidos grasos saturados e insaturados en el porcentaje correcto. Para el aceite de palma se

sabe que debe tener los porcentajes de ácidos grasos como se muestran en el Cuadro 7 de la sección de antecedentes, siendo los ácidos grasos en mayor concentración: el palmítico (44.3%), el Esteárico (4.6%), Oleico (38.7%) y el Linoléico (10.5%). Los resultados obtenidos en el cromatograma obtenido para la muestra del método seco fueron: Palmítico 43.3%, Esteárico 5.01% los cuales son los ácidos grasos saturados dando un porcentaje total de ácidos grasos saturados de 48.31%; para los insaturados se tiene el ácido Linoléico 8.91% y el Oleico con 42.05% para hacer un total de 50.96% de ácidos grasos insaturados, además en el cromatograma se pudo observar que el aceite tiene 0.73% de compuestos no identificados los cuales pueden ser otros ácidos grasos o productos de una oxidación. Como se puede ver los valores están muy cercanos a los de la literatura lo cual indica que el aceite tiene las proporciones indicadas. Con las pruebas realizadas para el aceite se puede ver que vale la pena tener en consideración el método seco ya que el aceite que se logra extraer tiene mejores características que las que se encontraron en el aceite extraído por el método húmedo.

Realizar este tipo de pruebas significa un costo más, y es un costo muy elevado ya que muchos de los reactivos que se utilizan para llevar a cabo las pruebas son muy costosos, por lo que aquí es donde los que trabajan en la industria se preocupan por tener buenos rendimientos ya que para lograr diluir los costos de las pruebas se necesitan grandes producciones, para lograr determinar cómo se diluyen los costos de las pruebas se asumió que se produjo un lote de 1,000 gal de aceite crudo y a costo de producción de estos mil galones se le sumo el costo de las pruebas de caracterización, para luego obtener el precio del galón de aceite crudo analizado y se obtuvo que el precio aumenta a 103.48 ± 1.98 , como se puede ver el precio aumento en Q0.30, lo cual se puede disminuir todavía más si el batch que se analiza es todavía más grande.

D. Método húmedo

El segundo método evaluado fue el método húmedo, el cual consiste en añadirle agua caliente a 90°C a la manteca obtenida del expeller, esto con el fin de disminuir la viscosidad del aceite contenido en la manteca, logrando que este flote por diferencia de densidades y luego sea decantado a otro recipiente. Este método tiene una serie de dificultades por lo que el procedimiento debe seguirse tal y como se describe en la sección de metodología (Figura 15), porque de lo contrario la mezcla agua manteca puede emulsificarse impidiendo que esta se separe. La variable crítica de este método es la temperatura del agua, debido a que el agua tiene que estar en la proporción de 3:1 (tres partes de agua por una parte de manteca) y a una temperatura de 90°C , de no ser así puede suceder lo siguiente: si la proporción del agua es menor es decir si no hay tres partes de agua por una manteca sino que hay menos cantidad de agua, la mezcla se vuelve muy viscosa y por mas que se caliente no se separa el aceite de la manteca, además los sólidos contenidos en la manteca se dispersan por toda la solución impidiendo que se separe el aceite. Si la temperatura no es la adecuada no disminuye la viscosidad del aceite por lo que no se separa de los componentes de la manteca y no flota. Si el método funciona, se pueden observar 4 fases en la mezcla heterogénea, la primera son las gomas, la segunda es el aceite, la tercera es el agua y la cuarta son sólidos sedimentables que es fibra del fruto de palma.

Para el proceso de decantación se tuvo que esperar un día para que se terminen de separar las fases, y luego con un beaker se raspo la parte superior que es donde se encontraban las ceras y gomas, cuando se llegó a la fase del aceite se recibió en un beaker limpio, este aceite se filtró por gravedad para remover cualquier traza de gomas y ceras. Para facilitar el proceso de decantación se podría realizar en un tanque que contara con una válvula en el fondo la cual permita separar las diferentes fases. El aceite que se obtiene en este método tiene una gran desventaja que es muy húmedo, lo cual hace que el aceite empiece a oxidarse.

Para este método se obtuvo un $30.0 \pm 1.04\%$ de recuperación de aceite de la manteca, el cual es un porcentaje que está muy bajo, pero esto se debe a que este método tiene muchas pérdidas al ser muy complicado la separación del aceite de la fase de gomas y ceras, aun así con todas las pérdidas que se tiene el porcentaje de recuperación de aceite es mucho mayor al porcentaje de recuperación del método seco ($16.7 \pm 1.69\%$), lo cual indica que el rendimiento global va a ser mucho mayor siendo este $12.5 \pm 0.44\%$, aproximadamente el doble del rendimiento global del método seco. Con estos datos se puede ver que este método es mucho mejor que el método seco, pero aun siendo mejor a nivel industrial se queda muy por debajo del rendimiento requerido.

En relación al consumo energético éste demanda mucho más energía que el método seco $48,922.45 \pm 147.61$ kJ o su equivalente 866.30 ± 3.69 kJ/kg, y esto se debe a la proporción en que se agrega el agua (3:1). Para obtener este dato se calculó la energía necesaria para calentar el agua de 21 a 90° C. En cuanto al consumo de diesel ($0.05 \pm 2.0 \times 10^{-3}$ gal) no se compara con el consumo de la autoclave, esto debido a que es menos tiempo de calentamiento.

Para el secado del aceite se tiene lo mismo del método anterior, con la única diferencia que como es una mayor cantidad de materia, esto varia para la etapa de elevación de la temperatura, esto quiere decir que para llevar el aceite de 21 a 90° C se requirió mas temperatura por lo que el calor generado para secar el aceite fue de $12,829.89 \pm 109.60$ kJ o su equivalente $11,088.38 \pm 18.67$ kJ/kg siendo este último igual al requerido en el método seco.

Para el balance energía global se tiene que el método húmedo demandó una mayor cantidad de energía $658,579.50 \pm 214.04$ kJ o su equivalente $16,340.53 \pm 23.62$ kJ/kg, esto se debe a que el proceso de extracción requiere más energía lo cual se observa en la etapa de extracción. Se puede observar que el equivalente del requerimiento de energía en kJ/kg tiene el mismo problema del método anterior y esto se debe al mismo factor de pérdida de materia durante el proceso.

El costo de realizar la extracción de aceite por medio de este método es elevado y esto se debe a lo que se menciona anteriormente que comparado a nivel industrial su rendimiento es muy bajo. El costo de esterilización y molienda es de 16.70 ± 0.50 Q/kg, para obtener dicho precio se calculó igual que para el método. Para obtener el costo de secar el aceite se asumió lo mismo que para el método anterior. El costo

total de haber procesado la fruta de palma africana con el método húmedo fue de $Q293.86 \pm 1.25$, que en comparación con el método seco su precio no se elevó mucho y se obtuvo el doble de producto.

El precio del aceite por kilogramo es de 17.37 ± 0.01 Q/kg lo cual se convirtió a costo por galón de aceite producido y este es de $Q58.39 \pm 0.06$, como se puede ver este precio sigue siendo elevado ya que a este todavía es aceite crudo. Con este costo se puede concluir que el método húmedo no es un método viable, ya que es muy ineficiente y por esto mismo incrementa sus costos. El costo de aceite comparado con el aceite RBD a nivel comercial es muy alto por lo que este método no se puede emplear para la extracción de aceite de palma.

Para las pruebas de caracterización realizadas a la muestra de aceite, la prueba del aceite extraída con el método húmedo fue la que presentó los peores resultados, empezando porque su porcentaje de acidez fue de $7.70 \pm 0.01\%$ estando muy por encima de los límites requeridos en un aceite crudo (5%). Este resultado se puede deber a que una de las desventajas de la extracción con método húmedo es que los aceites que se obtienen su contenido de humedad es muy grande lo cual perjudica la calidad del aceite y propicia la formación de radicales libres. Además de la prueba de porcentaje de acidez se realizó la prueba de índice de peróxidos, para el aceite se tiene que el índice de peróxidos fue de 27.0 ± 0.1 mEq/kg, lo cual está por encima de los estándares de aceptación (5.0 mEq/kg), esto indica que el aceite se está empezando a ranciar. Por el color y olor que presentaba el aceite al momento de hacer la prueba se podría asumir que los productos de la oxidación ya estaban formados ya que presentaba un color café rojizo y un olor picante característico de los aceites rancios. Además de estos dos análisis se hizo un último que fue el análisis de índice de yodo el cual da el contenido de insaturaciones en el aceite, su valor dio 144.92 ± 0.06 , pero este análisis no se tomó en cuenta por las mismas razones anteriormente mencionadas.

Además de las pruebas de caracterización se realizó una cromatografía para determinar la concentración de los ácidos grasos en el aceite. Los resultados obtenidos en el cromatograma obtenido para la muestra del método húmedo fueron: Palmítico 37.88%, Esteárico 6.14% los cuales son los ácidos grasos saturados dando un porcentaje total de ácidos grasos saturados de 44.02%; para los insaturados se tiene el ácido Linoléico 11.02% y el Oleico con 42.51% para hacer un total de 53.53% de ácidos grasos insaturados, además en el cromatograma se pudo observar que el aceite tiene 1.43% de compuestos no identificados los cuales pueden ser otros ácidos grasos o productos de una oxidación, y 1.02% de metil-tetradecanoato, que es un éster, el cual puede ser un producto de la saponificación al momento de haber preparado la muestra. Como se puede ver los valores están muy cercanos a los de la literatura lo cual indica que el aceite tiene las proporciones indicadas. Con las pruebas realizadas para el aceite se puede ver que el aceite obtenido de este método y su variante, son muy delicados por lo que sería recomendable darle un tiempo de secado mayor o refinarlo rápidamente después de haber sido extraído.

El precio del galón de aceite extraído con el método húmedo ya analizado con las pruebas de caracterización también tiene un aumento de Q0.30 ($Q58.69 \pm 0.06$), igualmente el que fue extraído con la variante del método húmedo ($Q47.30 \pm 0.94$).

E. Método húmedo con arrastre de vapor

El tercero y último método evaluado fue una variante del método húmedo, que consistió en sustituir el agua caliente por vapor, pero para ello fue necesario fabricar una bolsa de gabardina que soportara la manteca e impidiera que el vapor abandonara la hoya sin antes haber cedido su calor a la manteca (Imagen 4). Para este método se necesitó una estufa de gas para calentar el agua y lograr evaporarla para que este vapor arrastrara el aceite de la manteca al agua. Para este método se tiene la misma desventaja del método húmedo por lo que el aceite que se obtiene es muy húmedo y hay que secarlo rápidamente para evitar que se oxide.

Para este método se obtuvo un porcentaje de recuperación de aceite contenido en la manteca de $38.0 \pm 0.43\%$, lo cual demuestra una mejoría comparado con el método húmedo, pero de nuevo no se logró un porcentaje de rendimiento global que se compare con el rendimiento a nivel industrial, ya que este porcentaje de recuperación de aceite es un muy bajo y hace que el rendimiento global sea de $15.8 \pm 0.19\%$. Esta variante del método húmedo se le podría aplicar a la torta que queda del método seco para poder aumentar el rendimiento del método seco, pero al hacer esto se tendría que separar el aceite obtenido por cada uno de los métodos y evaluarlos analíticamente para determinar si vale la pena mezclarlos.

Al igual que los otros métodos la etapa crítica para el consumo de energía es la extracción, y esta variante del método húmedo no es la excepción por lo que se requiere de $84,623.99 \pm 392.34$ kJ o su equivalente $1,498.05 \pm 5.28$ kJ/kg para poder extraer el aceite rojo de palma, de la manteca. Como se puede observar a un mayor rendimiento mayor consumo de energía, pero como se verá posteriormente este consumo extra de energía se paga con el mayor rendimiento que se tiene. Para poder obtener el consumo de energía se utilizó la potencia que genera la estufa de gas ($64,397$ BTU/h con las 4 hornillas encendidas) y el tiempo de uso que fue una hora, no se dejó funcionando más tiempo ya que se logró observar que después de una hora ya no se logra extraer una cantidad significativa de aceite, por lo que se podría realizar una extracción mecánica para determinar si se incrementa el rendimiento.

Para el secado del aceite se tiene lo mismo del método seco, con la única diferencia que como es una mayor cantidad de materia, varió para la etapa de elevación de la temperatura, por lo que el calor generado para secar el aceite fue de $13,371.30 \pm 109.60$ kJ o su equivalente $11,088.38 \pm 18.67$ kJ/kg siendo este último igual al requerido en el método seco.

Para el balance energía global se tiene que esta variante del método húmedo demandó una mayor cantidad de energía $627,183.20 \pm 421.94$ kJ o su equivalente $16,972.28 \pm 23.63$ kJ/kg, esto se debe a que el proceso de extracción requiere más energía lo cual se observa en la etapa de extracción. Esta variante del

método húmedo es mucho más eficiente esto debido a que en cuanto a consumo energético no varía mucho comparado con el método húmedo, y el rendimiento global aumenta significativamente. Se puede observar que el equivalente del requerimiento de energía en kJ/kg tiene el mismo problema del método anterior y esto se debe al mismo factor de pérdida de materia durante el proceso.

El costo de realizar la extracción de aceite por medio de esta variante del método húmedo sigue siendo elevado aun siendo este el método que presento un mayor rendimiento. El costo de esterilización y molienda es de 13.24 ± 0.28 Q/kg, para obtener dicho precio se calculó igual que para el método seco. Para obtener el costo de secar el aceite se asumió lo mismo que para el método anterior. El costo total de haber procesado la fruta de palma africana con el método húmedo fue de $Q293.86 \pm 1.25$, que en comparación con el método seco que tuvo un costo menor, su precio no se elevó mucho y se obtuvo un rendimiento mayor al doble del método seco.

El precio del aceite por kilogramo es de 13.24 ± 0.28 Q/kg lo cual se convirtió a costo por galón de aceite producido y este es de $Q47.00 \pm 0.94$, como se puede ver este precio sigue siendo elevado ya que a este todavía es aceite crudo. Con este costo se puede concluir que la variante del método húmedo no es un método viable, ya que es muy ineficiente y por esto mismo incrementa sus costos. El costo de aceite comparado con el aceite RBD a nivel comercial es muy alto por lo que este método no se puede emplear para la extracción de aceite de palma.

F. Comparación de métodos

Como se puede observar el método que presentó un mayor rendimiento fue la variante del método húmedo con arrastre de vapor, esto se ve desde el porcentaje de recuperación de aceite con base a la manteca, ya que es el paso más importante de cada método. Con base a este porcentaje de recuperación se obtiene el porcentaje de rendimiento global donde se toma en cuenta desde la esterilización y molienda hasta el secado del aceite, y éste porcentaje se ve afectado únicamente por la fase de extracción de cada método por lo que si se tiene un porcentaje de recuperación muy bajo como el del método seco, el porcentaje de rendimiento no va a ser satisfactorio, como sucedió con el método seco.

Desde el punto de vista del balance de energía se puede ver que el método seco es el que consume menos energía de los tres métodos, esto se debe a que se realiza un trabajo mecánico para la extracción, en lugar de añadirle energía en forma de calor como en el método húmedo y su variante, aun así este consumo extra de energía se compensa al comparar los rendimientos de aceite. También sucede entre el método húmedo y su variante con arrastre de vapor, ya que la variante del método húmedo tiene un mayor rendimiento y un mayor consumo de energía.

En el ámbito económico es donde se puede ver la gran ventaja de tener un mayor rendimiento, debido a que una extracción con un rendimiento mayor reduce los costos de producción, haciendo el método más factible. Es por esto que la variante del método húmedo es la que presenta un costo menor, y al

compararla con el método seco se puede observar que el precio del galón de aceite extraído con la variante del método húmedo es casi la mitad. Como se mencionó con anterioridad ninguno de los métodos trabajados tiene un precio de producción atractivo, ya que al compararlos con un precio comercial no representan ventaja alguna. En este punto hay que tener especial cuidado ya que se tendría que comparar con precios de producción industrial para determinar si se puede emplear algún método o no. Además hay que tomar en cuenta que del proceso de extracción se obtienen varios subproductos como la torta de la prensa, la fibra y el kernel, entre otros; y estos subproductos también tienen valor los cuales pueden hacer que el precio del mercado del aceite baje.

En cuanto a la calidad del aceite no hay duda que el aceite de mejor calidad fue el extraído con el método seco, ya que el aceite extraído con el método húmedo al haber sido extraído con agua se oxidó rápidamente. Este factor no es determinante para decidir qué método emplear, porque a nivel industrial el aceite crudo se refina rápidamente después de haber sido extraído, reduciendo la posibilidad que éste se oxide.

En conclusión se puede decir que el método que presenta mayores ventajas es la variante del método húmedo con arrastre de vapor, ya que ésta fue la que presentó un mayor rendimiento por kilogramo de fruta y además es el método más económico. Este rendimiento se podría mejorar si se aplican ambos métodos, el seco y la variante del método húmedo, por lo que se recomienda realizar pruebas con ambos métodos, para determinar el incremento en el rendimiento y si esto presenta alguna ventaja económica, ya que en cuanto al balance de energía el consumo de energía va a ser mayor.

IX. CONCLUSIONES

Después de haber realizado la extracción de aceite rojo de palma con dos diferentes métodos y una variante de uno de ellos, siendo estos métodos el método seco y el húmedo con su variante por arrastre de vapor, se puede concluir lo siguiente:

1. Después de haber esterilizado y molido 136.08 ± 0.33 kg de fruta de palma se obtuvo 56.50 ± 0.17 kg de manteca ($41.5 \pm 0.16\%$) y 63.30 ± 0.10 kg de kernel y fibra ($46.5 \pm 0.14\%$). Además se tuvo una diferencia de 16.28 ± 0.39 kg ($12.0 \pm 0.28\%$).

Para la extracción de aceite de palma africana empleando el método seco se puede concluir que:

2. Para el proceso de extracción de aceite de palma africana, con el método seco se obtuvo un porcentaje de recuperación de aceite, en base a la masa de la manteca, de $16.7 \pm 1.69\%$ (p/p), lo cual representa un porcentaje de rendimiento global de $6.9 \pm 0.70\%$ (p/p), siendo éste el método más ineficiente (en relación a la materia trabajada), de los dos métodos trabajados.
3. En cuanto a los balances de energía para el proceso de extracción de aceite de palma africana utilizando el método seco se requiere un total de $608,764.63 \pm 155.40$ kJ, o su equivalente en energía por kg de producto $15,477.89 \pm 23.59$ kJ/kg, siendo este método el que demanda menos energía para su realización.
4. Las pruebas de caracterización de aceites realizadas para la muestra de aceite extraído con el método seco fueron la de porcentaje de acidez libre e índice de peróxidos. La prueba de porcentaje de acidez demostró que el aceite que resultó de la extracción empleando el método seco tiene un porcentaje de acidez de $5.96 \pm 0.01\%$, estando cerca de los parámetros de aceptación (5.0%) de un aceite de palma, antes de ser refinado. Las pruebas de índice de peróxidos realizadas a la muestra de aceite, demostraron que el aceite que resultó de la extracción empleando el método seco tiene un índice de peróxidos de 10.0 ± 0.1 , siendo éste un aceite muy oxidado (Nivel óptimo: $IP < 5.0$), por lo que no vale la pena refinarlo.
5. Por medio del cromatograma obtenido con la técnica de cromatografía de gases se tuvo que el aceite que se extrajo con el método seco contiene 48.31% de ácidos grasos saturados y 50.96% de ácidos grasos insaturados, además se observa en el cromatograma 0.73% de otros compuestos.

Para la extracción de aceite de palma africana empleando el método húmedo se puede concluir que:

6. Para el proceso de extracción de aceite de palma africana, con el método húmedo se obtuvo un porcentaje de recuperación de aceite, de acuerdo a la masa de la manteca, de $30.0 \pm 1.04\%$ (p/p), lo cual representa un porcentaje de rendimiento global de $12.5 \pm 0.44\%$ (p/p), que representa una mayor eficiencia de extracción contra el método seco.

7. A partir del balance de energía obtenido para el proceso de extracción de aceite de palma africana utilizando el método húmedo se requiere un total de $658,579.50 \pm 214.04 \text{kJ}$, o su equivalente en energía por kg de producto $16,340.53 \pm 23.62 \text{kJ/kg}$.
8. Las pruebas de caracterización de aceites realizadas para la muestra de aceite extraído con el método húmedo fueron la de porcentaje de acidez libre e índice de peróxidos. Las pruebas de porcentaje de acidez realizadas a la muestra de aceite, demostraron que el aceite tiene un porcentaje de acidez de $7.70 \pm 0.01\%$, estando muy lejos del parámetro de aceptación. Las pruebas de índice de peróxidos realizadas a la muestra de aceite, demostraron que el aceite tiene un índice de peróxidos de 27.0 ± 0.1 , estando muy lejos del parámetro de aceptación.
9. Por medio del cromatograma obtenido con la técnica de cromatografía de gases se tuvo que el aceite que se extrajo con el método húmedo se tiene 44.02% de ácidos grasos saturados y 53.53% de ácidos grasos insaturados, además se observó 1.02% de metil-tetradecanoato y 1.43% de otros compuestos.

Para la extracción de aceite de palma africana empleando la variante del método húmedo con arrastre de vapor se puede concluir que:

10. Para el proceso de extracción de aceite de palma africana, con una variante del método húmedo (Método húmedo con arrastre de vapor) se obtuvo un porcentaje de recuperación de aceite, de acuerdo a la masa de la manteca, de $38.0 \pm 0.43\%$ (p/p), lo cual representa un porcentaje de rendimiento global de $15.8 \pm 0.19\%$ (p/p), siendo esta variante del método húmedo, la más eficiente (en relación a la materia trabajada) de los dos métodos trabajados.
11. A partir del balance de energía estimado para el proceso de extracción de aceite de palma africana utilizando la variante del método húmedo se requiere un total de $627,183.20 \pm 421.94 \text{kJ}$, o su equivalente en energía por kg de producto $16,972.28 \pm 23.63 \text{kJ/kg}$, siendo esta variante del método seco la que demanda más energía para su realización.

X. RECOMENDACIONES

De acuerdo al estudio realizado para extraer aceite rojo de palma con dos diferentes métodos, seco y húmedo, y una variante del métodos húmedo con arrastre de vapor, se puede recomendar lo siguiente:

1. Se recomienda trabajar con bolsas y papel periódico en todas las partes del proceso de extracción de aceite debido a que todos los productos de cada uno de los procesos puede ocasionar accidentes al momento de caer en el área de trabajo, además esto mejora el rendimiento porque es más fácil recuperar la manteca y es más fácil al momento de terminar la extracción limpiar todo el equipo.
2. Se recomienda trabajar con el fruto esterilizado lo más caliente posible ya que esto aumenta el rendimiento de la molienda, al hacer que la viscosidad del aceite disminuya por lo que es más fácil que pase por las rendijas del expeller.
3. Se recomienda realizar el método seco implementando bolsas de tela metálica para determinar si al ejercer una mayor presión se mejora el rendimiento de este método.
4. Se recomienda trabajar una menor cantidad de fruta de palma (70 kg), para poder aprovechar toda la fruta y así poder utilizar un tanque más pequeño para realizar las pruebas del método húmedo.
5. Se recomienda realizar un estudio de impacto ambiental para encontrar los puntos críticos del proceso y así saber cuáles son las etapas que pueden tener mayor impacto con el ambiente.
6. Se recomienda la implementación de una trampa de grasas en el laboratorio de Operaciones Unitarias de la Universidad del Valle de Guatemala, para evitar que cualquier traza de aceite se vaya en el tragante.
7. Se recomienda para el método húmedo realizar el desgomado, al momento de agregar el agua caliente para determinar si así las ceras y gomas precipitan facilitando la separación del aceite del agua.
8. Se recomienda determinar la cantidad de aceite presente en cada etapa del proceso, a nivel laboratorio, para poder determinar en que parte del proceso se pierde más cantidad del mismo, y así determinar que tan eficiente fue la extracción.
9. Se recomienda realizar otros estudios, sobre la utilización del aceite rojo de palma para la fabricación de biodiesel, y los efectos que puede tener en la composición química del biodiesel al ser el aceite rojo de palma africana, el único de los aceites que tiene la misma proporción de ácidos grasos saturados e insaturados.

XI. BIBLIOGRAFÍA

1. Alfaro, Marcos; Ortiz, Elvin. Costa Rica. 2006. *Proceso de producción de aceite de palma 2006*. Ministerio de Agricultura (MAG). Disponible en versión electrónica en: <http://www.galeon.com/subproductospalma/proceso1.pdf>
2. Amatller, Günther Rodolfo; Dávila, Angela. Costa Rica 2000. *Procesamiento de aceite rojo de palma africana *Elaeis guineensis* JACQ., para consumo humano en frituras*. Escuela de Agricultura de la Región Tropical Húmeda (EARTH). 44 pp.
3. Badui, Salvador. México. 1993. *Química de los alimentos*. Tercera edición. Pearson Educación. Pp. 648.
4. Dr. Belitz, Hans-Dieter, et al. Alemania. 2009. *Food Chemistry*. Cuarta edición. Springer. Pp 1070.
5. Esmiol, Sophie. España. 2008. *Aceite de Palma: usos, orígenes e impactos*. Amigos de la Tierra. Disponible en versión electrónica en: http://www.tierra.org/spip/IMG/pdf/Aceite_de_Palma.pdf.
6. Narváez, Paulo César; et al. Colombia. 2005. *Determinación por cromatografía de gases de alquil ésteres (Metílico y Etílico) de ácidos grasos en presencia de mono-, di- y triglicéridos*. Revista ingeniería e investigación. Universidad Nacional de Colombia. Volumen No. 25. 58-62 pp.
7. McMurry, John. 2004. México. *Química Orgánica*. Sexta Edición. Thomson. Pp. 1176
8. Nutrer S.A.. México. 2004. *Aceite de palma y derivados: Propiedades y usos*. Disponible en versión electrónica en: www.nutrer.com.mx
9. O'Brien, Richard. 1998. Estados Unidos. *Fats and Oils formulating and processing for applications*. Primera edición. Technomic Publishing Co. Inc. Pp. 694.
10. Poku, Kwasi. 2002. Italia. *Small-Scale Pal Oil Processing in Africa*. Food and Agriculture Organization (FAO). Disponible en versión electrónica en: <http://www.fao.org/DOCREP/005/y4355e/y4355e00.htm>

11. Quesada, German. 1997. Costa Rica. *Tecnología de palma aceitera, Cultivo e industria de palma aceitera*. Ministerio de Agricultura Ganadería (INTA). Disponible en versión electrónica en: http://www.mag.go.cr/biblioteca_virtual_ciencia/tec_palma.pdf
12. Wade, L.G. 1993. México. *Química Orgánica*. Segunda edición. Prentice Hall. Pp. 1312
13. INE, 2003. Guatemala. *Censo Nacional Agropecuario 2003 (CENAGRO)*. Tomo III. Disponible en versión electrónica en: <http://www.ine.gob.gt/index.php/agricultura/45-agricultura/74-cenagro-2003>.

XII. APÉNDICE

A. Datos originales

Para realizar la esterilización del fruto de palma africana se realizó en tres corridas, para cada corrida se llenaron dos ollas con el fruto y estas se introdujeron en la autoclave.

Tabla 14: Peso de la fruta de palma antes de la esterilización

Corrida	Peso (± 0.1 lb)
Corrida 1	Olla 1: 58.5
	Olla 2: 58.5
Corrida 2	Olla 1: 58.5
	Olla 2: 58.5
Corrida 3	Olla 1: 58.5
	Olla 2: 58.5
Olla	8.5

Después de haber realizado la esterilización se procedió a moler el fruto en el expeller, para esto se contaba con cubetas para poder contener la manteca que se obtiene de la molienda. Además se contaba con cubetas más grandes para poder almacenar la fibra y kernel que sale de la molienda.

Tabla 15: Peso después de molida la fruta

Corrida	Peso (± 0.1 lb)
Corrida 1	Manteca: 44.0
	Pulpa más kernel: 51.0
Corrida 2	Manteca: 45.5
	Pulpa más kernel: 47.0
Corrida 3	Manteca: 44.0
	Pulpa más kernel: 53.5
Tara cubeta	1.5
Tara cubeta grande	4.0

Para el consumo de energía se contabilizó el tiempo de uso de cada equipo, y para la caldera se tomaron los cm que bajo el tanque de diesel para luego poder obtener cuantos galones se consumieron. Para saber el consumo en kW-h se utilizaron los datos de los equipos presentados en la sección de metodología.

Tabla 16: consumo de energía

Maquina	Tiempo de uso
Expeller	5:30 h
Caldera	15.54cm
Autoclave	2:00 h

Para las muestras tomadas de los dos lotes (lote de aceite extraído con método seco y lote de aceite extraído con método húmedo), se reportó el peso de cada muestra, la normalidad de la solución titulante y el volumen consumido de dicha solución.

Tabla 17: Análisis de ácidos grasos libres para muestras de aceite extraído con método seco y húmedo

	Medición
Peso muestra húmedo	2.00±0.001g
Peso muestra seco	2.00±0.001g
Normalidad KOH	0.1 N
Volumen muestra húmedo	54.60±0.01 mL
Volumen muestra seco	42.30±0.01 mL

Tabla 18: Análisis de índice de peróxidos para muestras de aceite extraído con método seco y húmedo

	Medición
Peso muestra húmedo	10.0000±0.0001g
Peso muestra seco	10.0000±0.0001g
Normalidad tiosulfato de sodio	0.1N
Volumen muestra húmedo	2.7±0.01 mL
Volumen muestra seco	1.0±0.01 mL

Tabla 19: Análisis de índice de yodo para muestras de aceite extraído con método seco y húmedo

	Medición
Peso muestra húmedo	0.3275±0.0001g
Peso muestra seco	0.2577±0.0001g
Normalidad tiosulfato de sodio	0.1N
Volumen muestra húmedo	85.20±0.01 mL
Volumen muestra seco	115.40±0.01 mL
Volumen muestra Blanco	122.60±0.01 mL

B. Cálculos de muestra

1. Balance de materia

1) Cálculo de peso de fruta esterilizada en primera corrida

Para este cálculo se tomaron los pesos de las dos hoyas con fruta y se les restó el peso de la tara para obtener el peso de la fruta que se esterilizó.

$$\begin{aligned} \text{Peso fruta} &= (58.5 \pm 0.1\text{lb} + 58.5 \pm 0.1\text{lb}) - 2(8.5 \pm 0.1\text{lb}) = 100.0 \pm 0.24\text{lb} * \frac{1\text{kg}}{2.2046\text{lb}} \\ &= 45.36 \pm 0.12\text{kg} \end{aligned}$$

2) Cálculo de peso de manteca obtenida en la primera corrida

Para este cálculo se tomó el peso de la manteca y se le restó el peso de dos taras ya que se utilizaron dos cubetas para almacenar la manteca de la primera corrida.

$$\text{Peso manteca} = 44.0 \pm 0.1\text{lb} - 2(1.5 \pm 0.1\text{lb}) = 41.0 \pm 0.22\text{lb} * \frac{1\text{kg}}{2.2046\text{lb}} = 18.60 \pm 0.10\text{kg}$$

3) Cálculo de peso de pulpa y kernel

Para este cálculo se tomó el peso del contenedor más la pulpa y el kernel y se le restó la tara del contenedor.

$$\text{Peso pulpa y kernel} = 51.0 \pm 0.1\text{lb} - 4.0 \pm 0.1\text{lb} = 47.0 \pm 0.14\text{lb} * \frac{1\text{kg}}{2.2046\text{lb}} = 21.32 \pm 0.06\text{kg}$$

4) Cálculo del total de esterilizada

Para este cálculo se sumaron todos los pesos de la fruta de las tres corridas, el cual fue el mismo para todas.

$$\text{Peso total fruta} = 3(45.36 \pm 0.12\text{kg}) = 136.08 \pm 0.33\text{kg}$$

5) Cálculo del total de manteca obtenida

Para este cálculo se sumaron todos los pesos de la manteca obtenida en cada una de las tres corridas.

$$\text{Peso total manteca} = 18.60 \pm 0.10\text{kg} + 19.28 \pm 0.10\text{lb} + 18.60 \pm 0.10\text{lb} = 56.5 \pm 0.17\text{kg}$$

6) Cálculo del total de pulpa y kernel obtenido

Para este cálculo se sumaron todos los pesos de la pulpa y kernel obtenidos en cada una de las tres corridas.

$$\text{Peso total pulpa y kernel} = 21.32 \pm 0.06\text{kg} + 19.50 \pm 0.06\text{lb} + 22.45 \pm 0.06\text{lb} = 63.3 \pm 0.10\text{kg}$$

7) Cálculo del total de materia no aprovechada

Para este cálculo se sumaron los dos productos del proceso (manteca y pulpa y kernel) y este peso se le restó al total de fruta esterilizada.

$$\text{Materia no aprovechada} = 136.08 \pm 0.33\text{kg} - (56.5 \pm 0.17\text{kg} + 63.3 \pm 0.10\text{kg}) = 16.28 \pm 0.39\text{kg}$$

8) Cálculo de los porcentajes de cada producto y materia no aprovechada

Para este cálculo se dividió cada producto dentro del total de fruta esterilizada.

$$\%manteca\ obtenida = \left(\frac{56.5 \pm 0.17kg}{136.08 \pm 0.33kg} \right) 100\% = 41.5 \pm 0.16\%$$

2. Balance de energía

a. Caldera y autoclave

9) Cálculo de volumen de diesel utilizado para una corrida de 100 lb de fruta.

Para este cálculo se tiene que el radio del tanque de diesel de la caldera es de $0.11 \pm 0.001m$, y que la altura de diesel consumido fue de $0.155 \pm 0.001m$, luego este dato se convirtió a galones.

$$\begin{aligned} Volumen\ diesel &= \pi * (0.11 \pm 0.001m)^2 * 0.155 \pm 0.001m = 0.01 \pm 9.0 \times 10^{-5}m^3 \left(\frac{264.17gal}{1m^3} \right) \\ &= 1.56 \pm 0.02gal \end{aligned}$$

10) Cálculo de calor entregado por el diesel

Para este cálculo se multiplicaron los galones utilizados para toda la esterilización ($4.68 \pm 0.06gal$) por el poder calorífico del diesel que se tomó como $142,500\ BTU/gal$.

$$4.68 \pm 0.06\ gal * 142500 \frac{BTU}{gal} = 665475.0 \pm 8550.0BTU * \frac{1.055kj}{1BTU} = 702,113.39 \pm 9021.11kj$$

11) Cálculo de la energía del vapor y condensados

Para este cálculo se asumió que la eficiencia de la caldera es del 85% lo cual se obtuvo del aparato Orsat con anterioridad. Luego de haber calculado esta energía se obtuvo la masa de los condensados, con las entalpías del agua a $80^\circ\ C$ que es la temperatura a la que salen los condensados, y la temperatura de la autoclave que son $120^\circ\ C$ y $138.0\ kPa$ (las entalpías se obtuvieron del libro de Introducción a la termodinámica en ingeniería química, de Smith).

$$\text{Ecuación 10} \quad q_{vapor} = q_{diesel\ caldera}$$

$$q_{vapor} = 702,113.39 \pm 9021.11kj * 0.85 = 596,821.30 \pm 7,667.94.30kj$$

$$m_{condensados} = \frac{596,821.30 \pm 7,667.94.30kj}{(2,721.5 - 334.9) \frac{kJ}{kg}} = 250.06 \pm 3.21kg \frac{m^3}{971.8kg} \frac{1000L}{1m^3} = 257.32 \pm 3.30L$$

b. Expeller

12) Cálculo de trabajo realizado por el motor del expeller

Para este cálculo se utilizó la potencia del motor ($7.5hp$) y el tiempo utilizado que fue de $5:30$ horas, por lo que el trabajo que realizó el motor fue de:

e. Método húmedo por arrastre de vapor

16) Cálculo de calor requerido para evaporar el agua

Para este cálculo se busco la potencia generada por una estufa industrial de 4 hornillas, y esta potencia es de 64,397BTU/h (con las 4 hornillas encendidas), el tiempo que se dejó encendida la hornilla fue de 1 hora, para 11.34±0.04kg por lo que el calor requerido fue:

$$\text{Ecuación 13} \quad q = P * t$$

$$\dot{q} = \frac{64397 \frac{BTU}{h}}{4} * 1h = 16,099.25BTU * \frac{1.055kJ}{1BTU} = \frac{16,984.75kJ}{11.34 \pm 0.04kg} = 1498.05 \pm 5.28 \frac{kJ}{kg}$$

$$q = 1498.05 \pm 5.28 \frac{kJ}{kg} * 56.5 \pm 0.17kg = 84,623.99 \pm 392.34kJ$$

f. Secado de aceite

17) Cálculo de energía necesaria para calentar aceite a 90° C por una hora (método húmedo)

Para realizar este cálculo se hizo en dos etapas, la primera para llevar el aceite de 21.0±0.01° C a 90.0±0.01° C, y la segunda para mantener ese aceite (7.03±0.25kg) en 90° C por un tiempo de una hora (potencia de la estufa: 10,236.6BTU/h).

$$\text{Aceite obtenido} = 56.5 \pm 0.17kg * 12.5 \pm 0.44\% = 7.03 \pm 0.25kg$$

$$q_1 = 7.03 \pm 0.25kg * 4.185 \frac{kJ}{kg \text{ } ^\circ C} * (90.0 \pm 0.01 - 21.0 \pm 0.01)^\circ C = 2,030.28 \pm 109.60kJ$$

$$q_2 = 10,236.6 \frac{BTU}{h} * 1h = 10,236.6BTU * \frac{1.055kJ}{1BTU} = 10,799.61kJ$$

$$q_{total} = 2,030.28 \pm 109.60kJ + 10,799.61kJ = 12,829.89 \pm 109.60kJ$$

18) Cálculo de energía por libra de producto terminado, necesaria para realizar la extracción de aceite rojo de palma

Para realizar este cálculo se dividió la energía obtenida en cada proceso de la extracción dentro de la masa

$$q = \frac{596,821.30 \pm 7,667.94.30kJ}{136.08 \pm 0.33kg} + 0.23 \pm \pm 5.48 \times 10^{-4} \frac{kJ}{kg} + \frac{48,922.45 \pm 147.61kJ}{56.5 \pm 0.17kg}$$

$$+ \frac{2,030.28 \pm 109.60kJ}{7.03 \pm 0.25kg} + 10,799.61 \frac{kJ}{kg} = 16,340.53 \pm 23.62 \frac{kJ}{kg}$$

3. Porcentaje de rendimiento

19) Cálculo de porcentaje de recuperación de aceite con base al peso de manteca en el método húmedo

Para este cálculo se dividió el peso del aceite obtenido de 4.53±0.04kg de manteca.

$$\%Recuperación = \left(\frac{1.36 \pm 0.04kg}{4.53 \pm 0.04kg} \right) 100\% = 30.0 \pm 1.04\%$$

20) Cálculo del porcentaje de rendimiento del método húmedo

Para este cálculo se multiplicó el porcentaje de recuperación del método húmedo por el porcentaje de manteca obtenida, lo cual representa el rendimiento de aceite desde la fruta.

$$\%Rendimiento = 30.0 \pm 1.04\% \times 41.5 \pm 0.16\% = 12.5 \pm 0.44\%$$

4. Porcentaje de acidez

21) Cálculo del porcentaje de acidez para el método húmedo

Para realizar este cálculo se utilizó la ecuación 7, para los 54.60±0.01 mL gastados de KOH (0.1N), para la muestra de aceite de 2.00±0.001g.

$$\%Acidez = \frac{54.60 \pm 0.01mL * 0.1N * 282}{10 * 2.00 \pm 0.001g} = 9.70 \pm 0.01\%$$

5. Índice de peróxidos

22) Cálculo del índice de peróxidos para el método húmedo

Para realizar este cálculo se utilizó la ecuación 8, para los 2.70±0.01 mL gastados de Na₂S₂O₃ (0.1N), para la muestra de aceite de 10.0000±0.0001 g.

$$\text{Índice de peróxidos} = \frac{2.70 \pm 0.01mL * 0.1 \frac{mEq}{mL} * 1000 \frac{g}{kg}}{10.0000 \pm 0.0001g} = 27.0 \pm 0.1 \frac{mEq}{kg}$$

6. Índice de yodo

23) Cálculo del índice de yodo para el método húmedo

Para realizar este cálculo se utilizó la ecuación 9, para los 85.20±0.01 mL gastados de Na₂S₂O₃ (0.1N), para la muestra de aceite de 0.3275±0.0001 g. Para el blanco se gastaron 122.60±0.01 mL.

$$\text{Índice de yodo} = \frac{(122.60 \pm 0.01 - 85.20 \pm 0.01)mL * 1.269}{0.3275 \pm 0.0001g} = 144.92 \pm 0.06$$

7. Costos

24) Cálculo del costo del vapor generado por la caldera para el método húmedo

Para este cálculo se necesitaron los galones gastados de diesel (4.67±0.06gal) y el precio del diesel que es de Q20.82. Esto para las dos etapas, la esterilización (4.67±0.06gal) y el calentamiento de agua (0.05±0.02x10⁻³ para 4.54±0.04kg de manteca).

$$\text{Costo esterilización} = 4.67 \pm 0.06 \text{ gal} * 20.82 \frac{Q}{\text{gal}} = Q97.23 \pm 1.25$$

$$\text{Costo agua caliente} = \frac{0.05 \pm 2.0 \times 10^{-3} \text{ gal}}{4.54 \pm 0.04 \text{ kg}} * 20.82 \frac{Q}{\text{gal}} = 0.23 \pm 0.01 \frac{Q}{\text{kg}}$$

25) Cálculo de costo de electricidad utilizada

Para este cálculo se necesitó la potencia del motor del expeller (7.5hP), el tiempo utilizado (5.5h) y el costo de la electricidad (1.4637Q/kW-h). Además se utilizó una estufa eléctrica de 3.0 kW por un tiempo de una hora. Para esta estufa se asumió que puede secar 10 kg de aceite en una hora.

$$\text{Costo expeller} = 7.5 \text{ hP} \frac{0.7457 \text{ kW}}{1 \text{ hP}} * 5.5 \text{ h} * 1.4637 \frac{Q}{\text{kWh}} = Q45.02$$

$$\text{Costo secado} = 3.0 \text{ kW} * 1 \text{ h} * 1.4637 \frac{Q}{\text{kWh}} = \frac{Q4.39}{10.0 \text{ kg}} = 0.439 \frac{Q}{\text{kg}}$$

$$\text{Costo electricidad} = Q45.02 + Q4.39 = Q49.41$$

26) Cálculo de costo por unidad de producto terminado

Para este cálculo se dividió el costo total por la masa de fruta de palma trabajada. Para esto se necesitó el precio de la fruta de palma trabajada el cual fue de Q141.80. Este costo va cambiando conforme se va desechando materia por lo que para el método húmedo se tiene que dividir dentro de su porcentaje de rendimiento (12.5±0.44%) para obtener el costo final.

$$\text{Costo total} = \frac{Q97.23 \pm 1.25 + Q45.02 + Q141.80}{136.08 \pm 0.33 \text{ kg}} = \frac{2.09 \pm 0.01 \frac{Q}{\text{kg}}}{12.5 \pm 0.44\%} = 16.70 \pm 0.50 \frac{Q}{\text{kg}}$$

27) Cálculo de costo del gas LP utilizado para el método húmedo-vapor

Para este cálculo se necesitó el tiempo de operación (1h), el costo del gas (4.57 Q/lb), y el flujo de gas de la estufa (0.219m³/h).

$$\text{Costo} = 0.219 \frac{\text{m}^3}{\text{h}} * \frac{1.56 \text{ kg}}{1 \text{ m}^3} * \frac{2.2046 \text{ lb}}{1 \text{ kg}} * 4.57 \frac{Q}{\text{lb}} * 1 \text{ h} = \frac{Q3.44}{11.34 \pm 0.04 \text{ kg}} = 0.30 \pm 1.07 \times 10^{-3} \frac{Q}{\text{kg}}$$

28) Cálculo de costo del galón de aceite obtenido por el método húmedo.

Para este cálculo primero se calculó el costo total por kg de producto, esto se realizó sumando el costo de esterilización con el del agua caliente y el del secado del aceite, para este último. Luego con la gravedad específica (gravedad específica 0.89 ver cuadro 6) se obtuvo el volumen del aceite con el cual se obtuvo el precio por galón.

$$\text{Costo total} = 16.70 \pm 0.50 \frac{Q}{\text{kg}} + 0.23 \pm 0.01 \frac{Q}{\text{kg}} + 0.44 \frac{Q}{\text{kg}} = 17.37 \pm 0.01 \frac{Q}{\text{kg}}$$

$$\text{Costo por galón aceite} = 17.37 \pm 0.01 \frac{Q}{\text{kg}} * \left(0.89 * 998.0 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}\right) \frac{1 \text{ m}^3}{264.17 \text{ ga}} = 58.39 \pm 0.06 \frac{Q}{\text{gal}}$$

$$W = 7.5hp \frac{0.7457kW}{1hp} * 5.5h = 30.76kJ$$

13) Cálculo del trabajo realizado por el motor del expeller para una libra de producto

Para este cálculo se necesito la masa de la fruta trabajada y este número divide al trabajo total.

$$\dot{W} = \frac{30.76kJ}{136.08 \pm 0.33kg} = 0.23 \pm \pm 5.48 \times 10^{-4} \frac{kJ}{kg}$$

c. Prensa

14) Cálculo de trabajo aplicado para filtrar la manteca

Para este cálculo se utilizó la distancia que recorrió el pistón ($4.0 \pm 0.001in$) de la prensa hidráulica y la fuerza que se le imprimió al disco (22000 lb). Este cálculo representa el trabajo para filtrar 6.0lb, por lo que primero se tuvo que calcular el trabajo por kg y luego el trabajo total con el rendimiento del expeller.

$$\text{Ecuación 11} \quad W = F * x$$

$$\begin{aligned} W &= 22,000lb * 4.0 \pm 0.001in = 88,000 \pm 22.0lb \cdot in \frac{1ft}{12in} \frac{1BTU}{778.169lb \cdot ft} \\ &= 9.42 \pm 2.36 \times 10^{-3} BTU * \frac{1.055kJ}{1BTU} = 9.93 \pm 2.50 \times 10^{-3} kJ \end{aligned}$$

$$\dot{W} = \frac{9.93 \pm 2.50 \times 10^{-3} kJ}{6.0 \pm 0.1lb \frac{1kg}{2.205lb}} = 3.65 \pm 0.06 \frac{kJ}{kg}$$

$$W = 3.65 \pm 0.06 \frac{kJ}{kg} (56.5 \pm 0.17kg) = 206.34 \pm 3.44kJ$$

d. Método húmedo

15) Cálculo de calor requerido para calentar el agua

Para este cálculo se necesito la capacidad calorífica del agua, la cual se obtuvo a $55.5^\circ C$ ($4.185 kJ/kg C$) que es el promedio de la temperatura inicial y la final. Además se necesitó la masa de agua la cual fue de $169.5 \pm 0.51kg$, debido a la relación manteca-agua (1:3), y el agua se calentó de $21.0 \pm 0.01^\circ C$ a $90.0 \pm 0.01^\circ C$.

$$\text{Ecuación 12} \quad q = mCp\Delta T$$

$$q = 169.50 \pm 0.51kg * 4.185 \frac{kJ}{kg \cdot ^\circ C} * (90.0 \pm 0.01 - 21.0 \pm 0.01)^\circ C = 48,922.45 \pm 147.61kJ$$

29) Cálculo de galones producidos

Para realizar este cálculo se necesitó el peso final del aceite para el método húmedo 16.94 ± 0.60 kg y luego éste se convirtió a galones producidos.

$$\text{Galones} = 16.94 \pm 0.60 \text{kg} * \left(0.89 * 998.0 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \right) \frac{1 \text{m}^3}{264.17 \text{ga}} = 4.48 \pm 0.18 \text{gal}$$

30) Cálculo del costo de realizar la prueba de índice de acidez

Para este cálculo se necesitó el precio de la potasa caustica (320 Q/100lb), el precio del éter isopropilico (1200 Q/L), y el etanol (455.00 Q/2.5L).

$$\text{Precio potasa} = \frac{320 \text{Q}}{100 \text{lb} \frac{1 \text{kg}}{2.205 \text{lb}} \frac{1000 \text{g}}{1 \text{kg}}} * 0.14 \text{g} = 99.88 \times 10^{-4}$$

$$\text{Precio Eter isopropilico} = \frac{1200 \text{Q}}{1000 \text{mL}} * 75 \text{mL} = 99.75$$

$$\text{Costo Etanol} = \frac{455.00}{2.5 \text{L} \frac{1000 \text{mL}}{1 \text{L}}} * (75 \text{mL} + 250 \text{mL}) = 99.15$$

$$\text{Costo total} = 99.88 \times 10^{-4} + 99.75 + 99.15 = 198.65$$

31) Cálculo del costo de realizar la prueba de índice de peróxidos

Para este cálculo se necesitó el precio del ácido acético (410.00 Q/2.5L), cloroformo (458.00Q/4L), yoduro de potasio (1,348.00Q/kg), tiosulfato de sodio (362.00Q/kg), almidón (511.00Q/250g) y el agua desmineralizada (400 Q/200L).

$$\text{Costo ácido acético} = \frac{410.00}{2.5 \text{L} * \frac{1000 \text{mL}}{1 \text{L}}} * 37.5 \text{mL} = 61.5$$

$$\text{Costo cloroformo} = \frac{458.00}{4 \text{L} * \frac{1000 \text{mL}}{1 \text{L}}} * 12.5 \text{mL} = 14.3$$

$$\text{Costo KI} = \frac{1348.00}{1 \text{kg} * \frac{1000 \text{g}}{1 \text{kg}}} * 10.0 \text{g} = 13.48$$

$$\text{Costo tiosulfato} = \frac{362.00}{1 \text{kg} * \frac{1000 \text{g}}{1 \text{kg}}} * 2.5 \text{g} = 0.91$$

$$\text{Costo almidón} = \frac{511.00}{250 \text{g}} * 0.25 \text{g} = 0.51$$

$$\text{Costo agua desmineralizada} = \frac{400.00}{200 \text{L} * \frac{1000 \text{mL}}{1 \text{L}}} * 200 \text{mL} = 0.40$$

$$\text{Costo Total} = 61.5 + 14.3 + 13.48 + 0.91 + 0.51 + 0.40 = 92.88$$

32) Cálculo del costo de realizar la prueba de índice de yodo

Para este cálculo se necesitó el precio del ácido acético (410.00 Q/2.5L), cloroformo (458.00Q/4L), yoduro de potasio (1,348.00Q/kg), tiosulfato de sodio (362.00Q/kg), almidón (511.00Q/250g), bromo (25.25 Q/kg), yodo (545.00 Q/100g) y agua destilada (400 Q/200L).

$$\text{Costo ácido acético} = \frac{Q410.00}{2.5L * \frac{1000mL}{1L}} * 400mL = Q65.60$$

$$\text{Costo cloroformo} = \frac{Q458.00}{4L * \frac{1000mL}{1L}} * 20mL = Q2.29$$

$$\text{Costo KI} = \frac{Q1348.00}{1kg * \frac{1000g}{1kg}} * 10.0g = Q13.48$$

$$\text{Costo tiosulfato} = \frac{Q362.00}{1kg * \frac{1000g}{1kg}} * 8.75g = Q3.17$$

$$\text{Costo almidón} = \frac{Q511.00}{250g} * 0.25g = Q1.28$$

$$\text{Costo agua desmineralizada} = \frac{Q400.00}{200L * \frac{1000mL}{1L}} * 550mL = Q1.10$$

$$\text{Costo Yodo} = \frac{Q545.00}{100g} * 6.8075g = Q37.10$$

$$\text{Costo Bromo} = \frac{Q25.25}{1kg * \frac{1000g}{1kg} * \left(\frac{1mL}{3.11g}\right)_{25C}} * 3mL = Q0.24$$

$$\text{Costo Total} = Q65.60 + Q2.29 + Q13.48 + Q3.17 + Q1.28 + Q1.10 + Q37.10 + Q0.24 = Q124.26$$

33) Cálculo de costo total de pruebas de caracterización

Para este cálculo se sumaron todos los costos totales de cada prueba de caracterización y se sumaron.

$$\text{Costo pruebas de caracterización} = Q156.65 + Q22.88 + Q124.26 = Q303.79$$

34) Cálculo del precio del galón de aceite rojo de palma analizado con las pruebas de caracterización.

Para este cálculo se asumió una producción de un lote de 1,000 galones de aceite rojo de palma (Con método Húmedo) y este precio se le sumó los costos de las pruebas de caracterización.

$$\text{Costo Aceite analizado} = \frac{(1,000gal * 58.39 \pm 0.06 \frac{Q}{gal}) + Q303.79}{1,000gal} = 58.69 \pm 0.06 \frac{Q}{gal}$$

C. Datos calculados

Tabla 20: Balance de materia del proceso de esterilización y molienda de aceite rojo de palma africana

Corrida	Peso fruta (kg)	Peso manteca (kg)	Peso fibra y kernel (kg)
1	45.36±0.12	18.60±0.10	21.32±0.06
2	45.36±0.12	19.28±0.10	19.50±0.06
3	45.36±0.12	18.60±0.10	22.45±0.06
Total	136.08±0.33	56.50±0.17	63.30±0.10
Materia no aprovechada			16.28±0.39
Condensados			250.06±3.21

Tabla 21: Porcentajes de productos obtenidos después de la molienda del fruto de palma africana

Fruta esterilizada	100.0%
Manteca obtenida	41.5±0.16%
Fibra y kernel obtenidos	46.5±0.14%
Materia no aprovechada	12.0±0.28%

Tabla 22: Volumen de diesel utilizado para la esterilización y calentamiento de agua

Proceso	Volumen (gal)
Esterilización	4.67±0.06
Calentamiento de agua	0.05±2.0×10 ⁻³

Tabla 23: Balance de energía del proceso de extracción de aceite rojo de palma para los tres diferentes métodos empleados.

Proceso	Calor/trabajo requerido (kJ)	Calor/trabajo (kJ/kg)
Esterilización	596,821.30±7,667.94	4,385.63±57.34
Expeller	30.76	0.23±5.48×10 ⁻⁴
Prensado	206.34±3.44	3.65±0.06
Método húmedo	48,922.45±147.61	866.30±3.69
Método húmedo con arrastre de vapor	84,623.99±392.34	1,498.05±5.28
Secado de aceite (prensado)	11,927.55±109.60	11,088.38±18.67
Secado de aceite (húmedo)	12,829.89±109.60	11,088.38±18.67
Secado de aceite (húmedo-vapor)	13,371.30±109.60	11,088.38±18.67
Total prensado	608,764.63±155.40	15,477.89±23.59
Total húmedo	658,579.50±214.04	16,340.53±23.62
Total húmedo-vapor	627,183.20±421.94	16,972.28±23.63

Tabla 24: Porcentaje de rendimiento para los tres diferentes métodos empleados para la extracción de aceite rojo de palma

Método	Porcentaje de recuperación	Porcentaje de rendimiento
Seco	16.7±1.69%	6.9±0.70%
Húmedo	30.0±1.04%	12.5±0.44%
Húmedo-vapor	38.0±0.43%	15.8±0.19%

Tabla 25: Pruebas de caracterización para las muestras tomadas de los dos distintos lotes de aceite

Método	% acidez	Índice de Peróxidos (mEq/kg)	Índice de yodo
Húmedo	7.70±0.01%	27.0±0.1	144.92±0.06
Seco	5.96±0.01%	10.0±0.1	35.46±0.05

Tabla 26: Costos de operación para los distintos métodos de extracción de aceite de palma

Costo	Método húmedo (Q)	Método húmedo-vapor (Q)	Método seco (Q)
Fruta de palma	141.80	141.80	141.80
Esterilización	97.23±1.25	97.23±1.25	97.23±1.25
Electricidad	45.02	45.02	45.02
Gas/vapor	1.04±0.04	3.44	0
Secado	8.78	13.17	4.39
Total	293.86±1.25	303.73±1.25	288.43±1.25

Tabla 27: Costo de operación por kilogramo de producto terminado

Operación	Método seco (Q/kg)	Método húmedo (Q/kg)	Método húmedo-vapor (Q/kg)
Esterilización/Molido	30.25±0.59	16.70±0.50	13.24±0.28
Agua caliente	-	0.23±0.01	-
Gas	-	-	0.30±1.07x10 ⁻³
Secado	0.44	0.44	0.44
Total	30.69±0.59	17.37±0.01	13.98±0.28

Tabla 28: Volumen de aceite producido para cada uno de los diferentes métodos empleados para la extracción.

Método	Peso (kg)	Volumen (gal)
Húmedo	16.94±0.60	4.48±0.18
Húmedo-vapor	21.46±0.26	5.68±0.07
Seco	9.39±0.95	2.49±0.25

Tabla 29: Costo del galón de aceite para cada uno de los diferentes métodos empleados.

Método	Costo (Q/gal)
Húmedo	58.39±0.06
Húmedo-vapor	47.00±0.94
Seco	103.18±1.98

Tabla 30: Costo de pruebas de caracterización

Prueba	Costo (Q)
Índice de acidez	156.65
Índice de peróxidos	22.88
Índice de yodo	124.26
Total	303.79

Tabla 31: Costo del galón de aceite crudo analizado con las pruebas de caracterización (suponiendo una producción de 1,000 gal)

Método	Costo (Q/gal)
Húmedo	58.69±0.06
Húmedo-vapor	47.30±0.94
Seco	103.48±1.98

D. Análisis de error

1. Análisis estadístico

a. Media

Se realizó el cálculo de media o promedio de las temperaturas inicial y final para el calentamiento del agua del método húmedo.

$$\text{Ecuación 14} \quad \bar{x} = \frac{\sum_{i=1}^n x_n}{n}$$

2. Propagación de error

b. Incertidumbre para las sumas y restas

$$\text{Ecuación 15} \quad s_y = \sqrt{s_a^2 + s_b^2 + \dots + s_n^2}$$

Se realizó para las incertidumbres para todos los datos que conllevaron sumas y restas.

c. Incertidumbre para multiplicaciones y divisiones

$$\text{Ecuación 16} \quad s_y = y \sqrt{\left(\frac{s_a}{a}\right)^2 + \left(\frac{s_b}{b}\right)^2 + \dots + \left(\frac{s_n}{n}\right)^2}$$

E. Imágenes

1. Finca Buena Vista y fruto de palma

Imagen 5: Plantación de Palma Africana en Finca Buena Vista



Imagen 6: Planta extractora de aceite crudo de palma africana, en finca Buena Vista

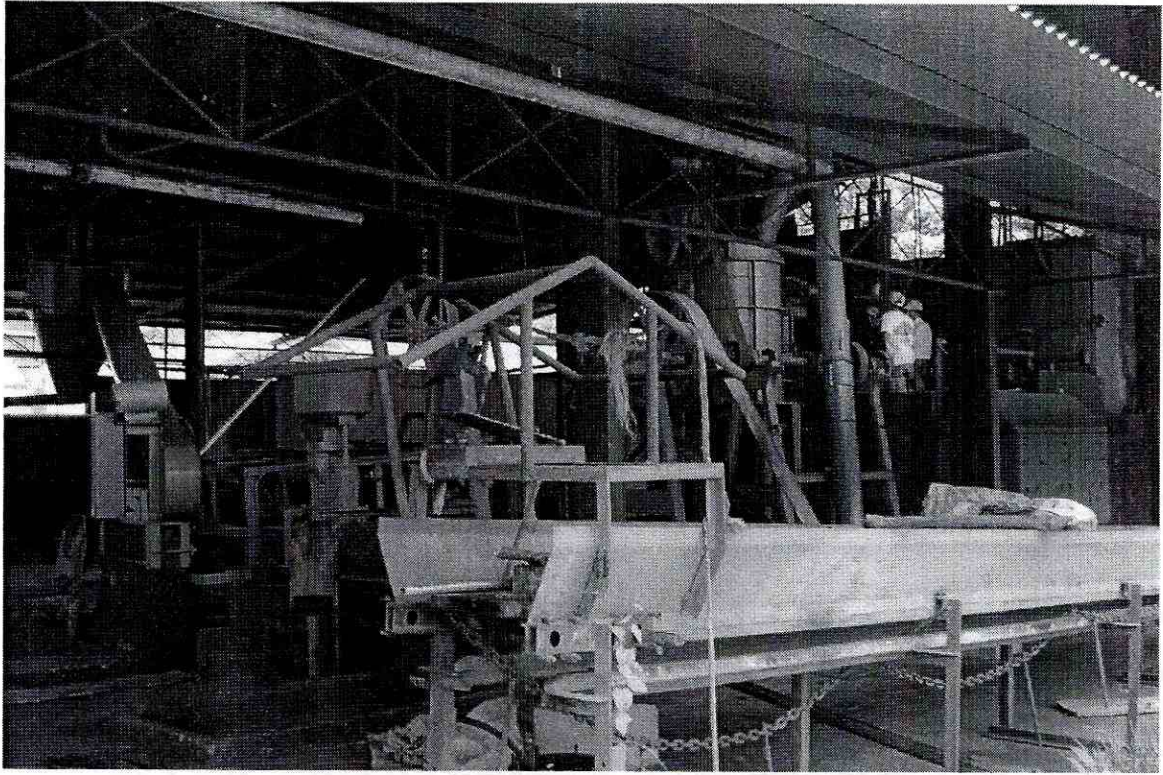


Imagen 7: Pesado de fruto de palma africana en Finca Buena Vista

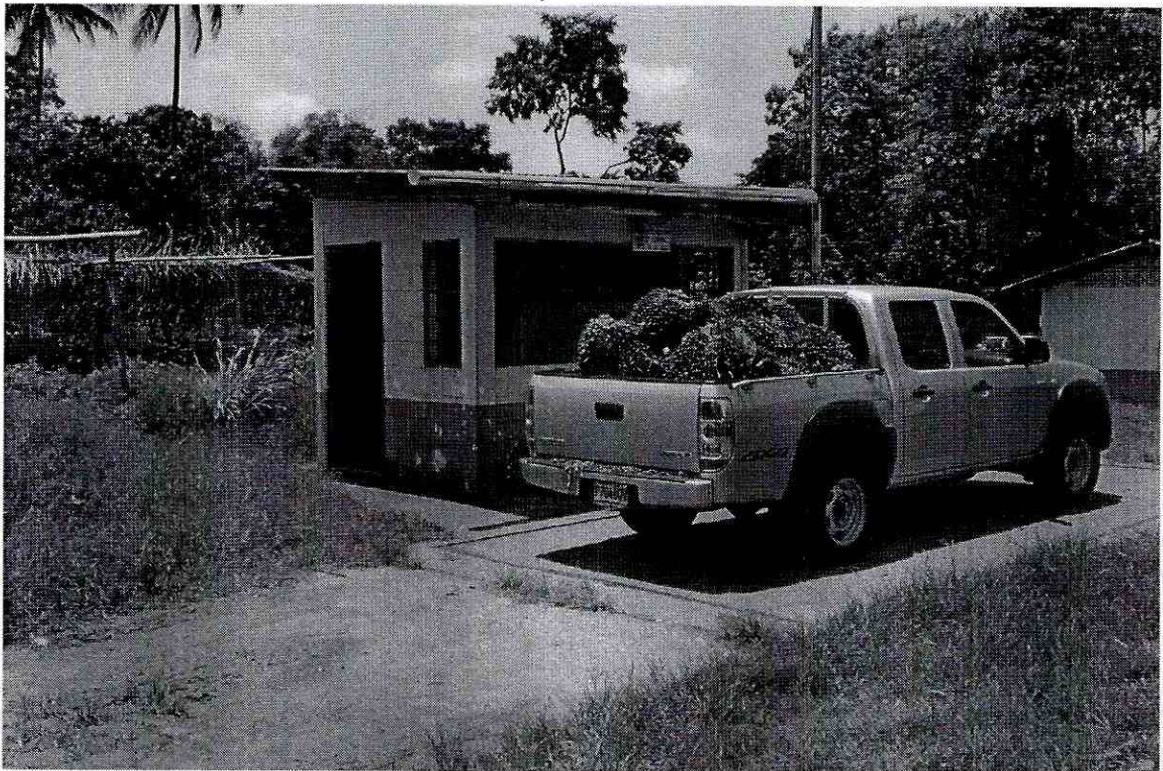


Imagen 8: Fruto de palma africana



2. Proceso de prensado

Imagen 9: Fibra y kernel extraídos en el proceso de molienda

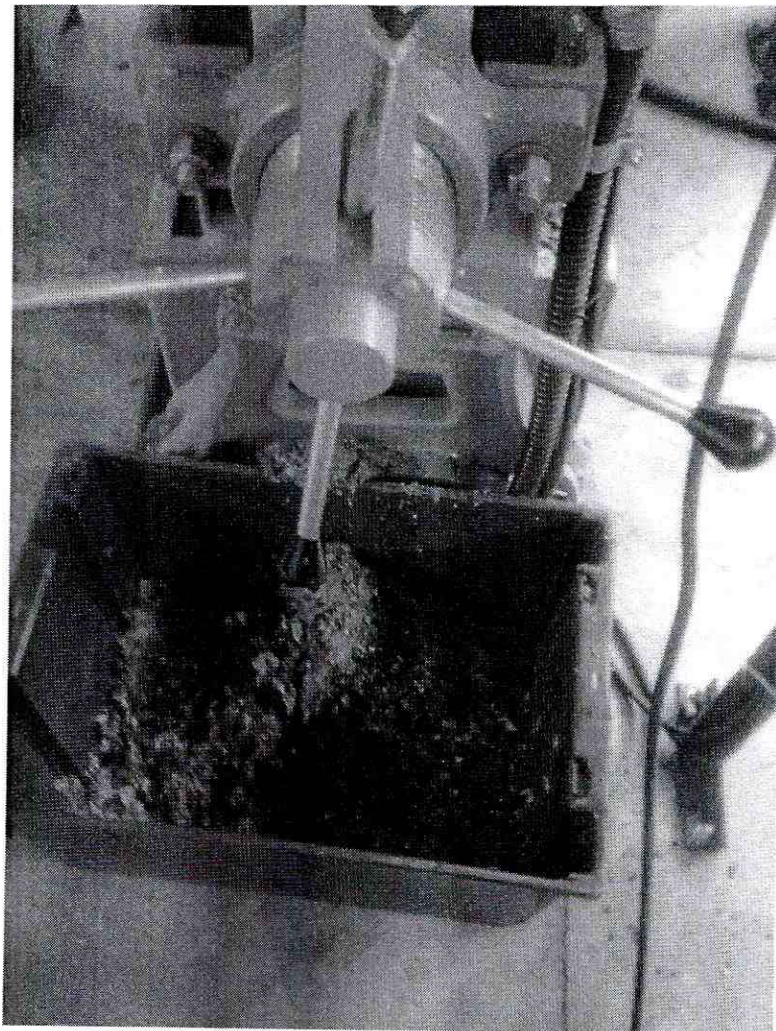


Imagen 10: Manteca obtenida después de haber prensado el fruto de palma



3. Pruebas de caracterización

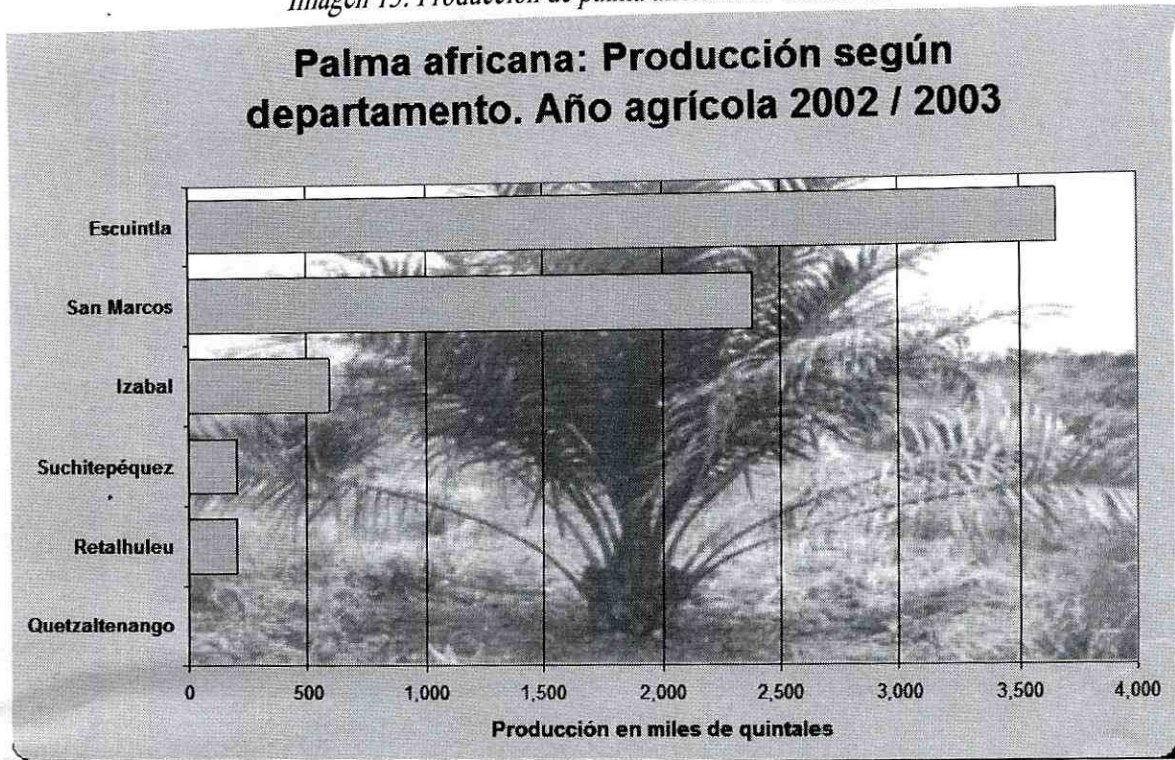
Imagen 11: Prueba de índice de peróxidos



Imagen 12: Preparación de muestras para caracterización de aceites.

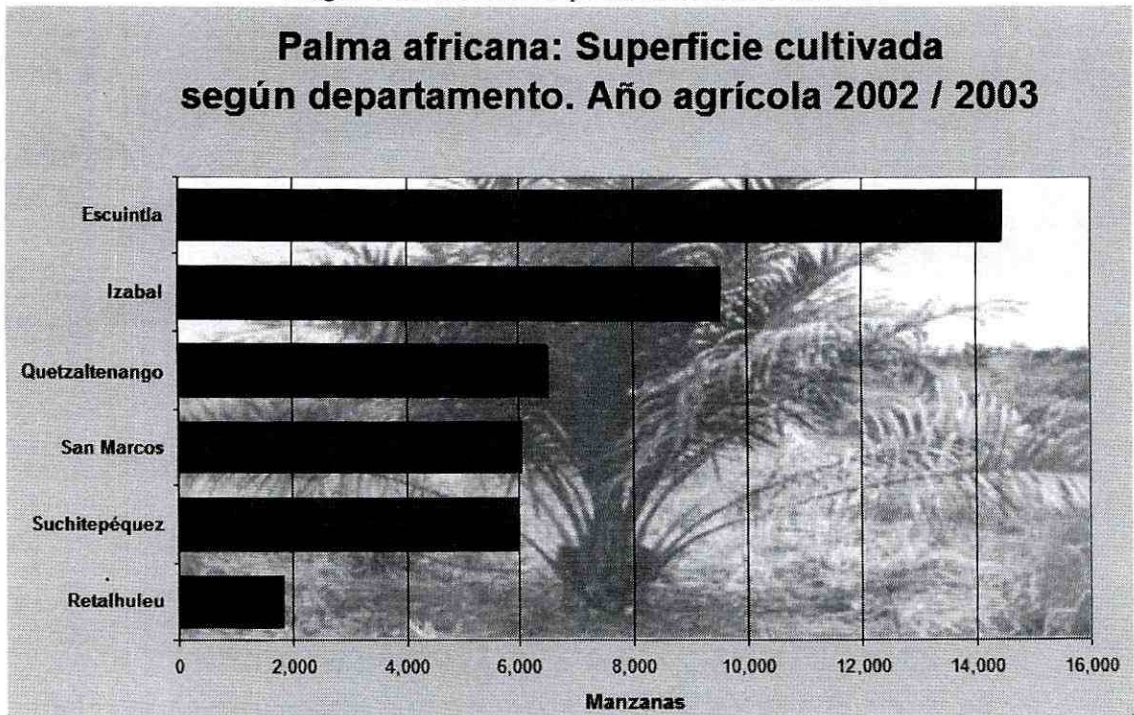


Imagen 13: Producción de palma africana en Guatemala



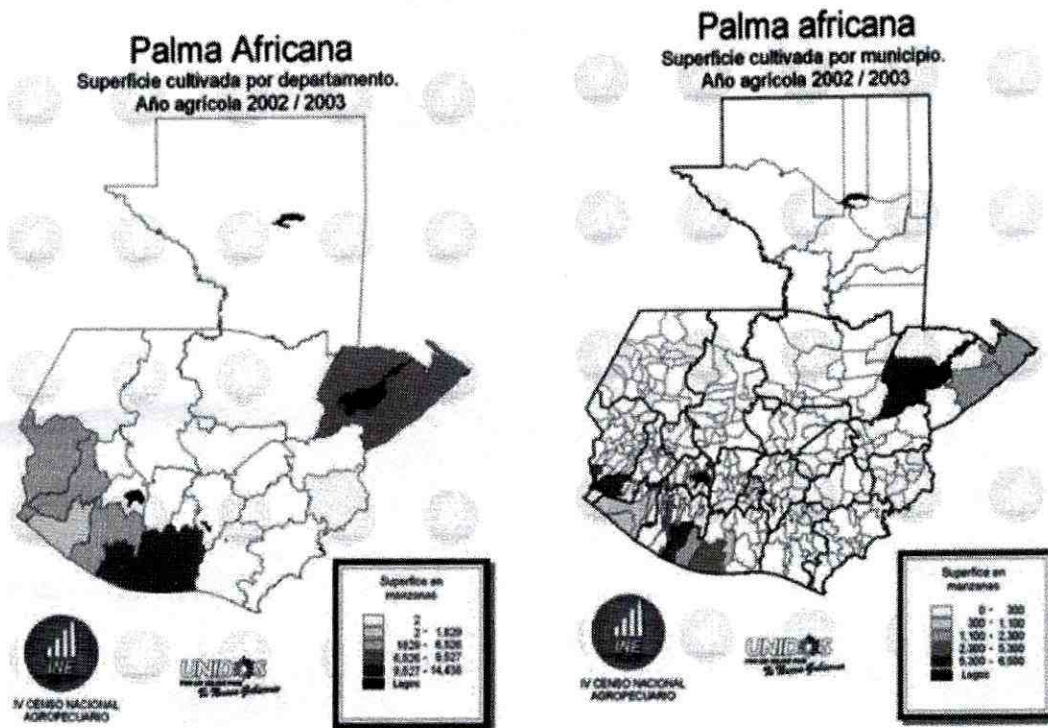
(INE, 2003)

Imagen 14: Producción de palma africana en Guatemala



(INE, 2003)

Imagen 15: Superficie cultivada de Palma Africana, por departamento y por municipio



(INE, 2003)