

**DISEÑO CONCEPTUAL DE UNA PLANTA PILOTO PARA EL PROCESO DE
REFINACIÓN DE ACEITE CRUDO PARA USO ALIMENTICIO**

JOHANNA LORENA CUBIDES GARCÍA
RICHARD ALEXANDER MALLAMA DÍAZ

FUNDACIÓN UNIVERSIDAD DE AMÉRICA
FACULTAD DE INGENIERÍAS
PROGRAMA DE INGENIERÍA QUÍMICA
BOGOTÁ D.C.
2017

**DISEÑO CONCEPTUAL DE UNA PLANTA PILOTO PARA EL PROCESO DE
REFINACIÓN DE ACEITE CRUDO PARA USO ALIMENTICIO**

JOHANNA LORENA CUBIDES GARCÍA
RICHARD ALEXANDER MALLAMA DÍAZ

**Proyecto integral para optar por el título de
INGENIERO QUÍMICO**

**Director
EDUBIEL SALCEDO VARELA
Ingeniero químico**

FUNDACIÓN UNIVERSIDAD DE AMÉRICA
FACULTAD DE INGENIERÍAS
PROGRAMA DE INGENIERÍA QUÍMICA
BOGOTÁ D.C.
2017

Nota de aceptación:

Ing. Edgar Fernando Moreno

Ing. Javier Francisco Rey

Ing. Alberto Vera

Bogotá D.C., octubre 2017

DIRECTIVAS DE LA UNIVERSIDAD

Presidente de la Universidad y Rector del Claustro:

Dr. JAIME POSADA DÍAZ

Vicerector de Desarrollo y Recursos Humanos:

Dr. LUIS JAIME POSADA GARCÍA-PEÑA

Vicerectora Académica y de Posgrados:

Dra. ANA JOSEFA HERRERA VARGAS

Secretario General:

Dr. JUAN CARLOS POSADA GARCÍA-PEÑA

Decano Facultad de Ingeniería:

Dr. JULIO CESAR FUENTES ARISMENDI

Director Programa de Ingeniería de Química:

Dr. LEONARDO DE JESÚS HERRERA GUTIÉRREZ

Las directivas de la Universidad de América, los jurados calificadores y el cuerpo docente no son responsables por los criterios e ideas expuestas en el presente documento. Estos corresponden únicamente al autor.

AGRADECIMIENTOS

Los autores expresan sus agradecimientos a:

- Al ingeniero Daniel Clavijo y Diego Velandia, quienes hicieron posible que se llevara a cabo el proyecto con su colaboración y apoyo para el cumplimiento de los objetivos propuestos.
- Al ingeniero Edubiel Salcedo, quien nos brindó asesoría y apoyo durante el desarrollo de este proyecto.
- Lorena Cubides agradece especialmente a: en primer lugar a Dios, quien me permite día a día crecer como persona y profesional, quien me ayudó a sortear las diferentes adversidades; a mis papas quienes siempre me apoyaron y con paciencia comprendieron las dificultades que se presentaron, a mi novio Camilo Osorio, quien me brindó su ayuda como colega y estuvo constantemente alentándome a seguir adelante con su apoyo y amor incondicional.
- Richard Mallama agradece especialmente a: en primera instancia a Dios, quien permitió que día a día creciera como persona y profesional, en donde me ayudó a soportar diferentes dificultades presentadas a lo largo del camino; a mi familia quienes siempre me apoyaron con paciencia y entendieron las adversidades ocasionadas, a mi novia Paola Avila, quien me brindó su apoyo, siendo un pilar fundamental en este proyecto, impulsándome constantemente a seguir adelante y afrontando cada caída con su valor y amor constante.

CONTENIDO

	pág.
INTRODUCCIÓN	12
OBJETIVOS	13
1. GENERALIDADES	14
1.1 INGENIERÍA CONCEPTUAL	14
1.2 PLANTA PILOTO	16
1.3 ACEITE DE PALMA CRUDO	16
1.3.1 Historia	16
1.3.2 Composición	17
1.3.3 Usos	19
2. DIAGNOSTICO INICIAL DEL ACEITE CRUDO DE PALMA	20
2.1 ANÁLISIS DE LA MUESTRA DEL RESIDUO VEGETAL	23
3. REFINACIÓN DEL RESIDUO VEGETAL A NIVEL LABORATORIO	28
3.1 PROCESO DE REFINACIÓN DE ACEITE CRUDO DE PALMA	28
3.2 SELECCIÓN DEL MÉTODO DE REFINACIÓN A NIVEL LABORATORIO	30
3.3 REFINACIÓN FÍSICA A NIVEL LABORATORIO	31
3.4 ANÁLISIS DE RESULTADOS DEL PROCESO DE REFINACIÓN	36
4. DISEÑO CONCEPTUAL DE LA PLANTA PILOTO PARA LA REFINACIÓN DE ACEITE CRUDO DE PALMA	39
4.1 DESCRIPCIÓN DEL PROCESO INDUSTRIAL	39
4.1.1 Unidad de desgomado	39
4.1.2 Unidad de decoloración o blanqueo	42
4.1.3 Unidad de destilación o desodorización	44
4.2 DIAGRAMA DE BLOQUES	46
4.3 DIAGRAMA (PFD)	47
4.4 EQUIPOS Y MATERIALES	48
4.4.1 Requerimientos de materias primas y químicos	48
4.4.2 Lista de equipos	50
4.4.2.1 Requerimientos generales de los equipos	59
5. COSTOS DEL DISEÑO CONCEPTUAL DE LA PLANTA PILOTO PROPUESTO PARA LA REFINACIÓN FÍSICA	67
5.1 ESTIMATIVO DE COSTOS	67
6. CONCLUSIONES	71
7. RECOMENDACIONES	72

BIBLIOGRAFÍA	73
ANEXOS	75

LISTA DE FIGURAS

	pág.
Figura 1. Modelo descriptivo del diseño	14
Figura 2. Etapas del diseño conceptual	15
Figura 3. Estructura del triglicérido POO (1-palmitoil-2,3-dioleoil-sn-glicerol)	18
Figura 4. Proceso Productivo de extracción del aceite crudo de palma	21
Figura 5. Diagrama de proceso de la refinación física	29
Figura 6. Diagrama de proceso de la refinación química	30
Figura 7. Eliminación de fosfolípidos	33
Figura 8. Sedimentación de fosfolípidos	33
Figura 9. Destilación del aceite de palma	34
Figura 10. Residuos volátiles	35
Figura 11. Producto refinado (Izquierda)	35
Figura 12. Diagrama de bloques de la unidad de desgomado	42
Figura 13. Diagrama de bloques de la unidad de decoloración	44
Figura 14. Diagrama de bloques de la unidad de desodorización	46
Figura 15. Diagrama de bloques del proceso de refinación física	46
Figura 16. Diagrama PFD de la refinación física	47
Figura 17. Mezclador estático	51
Figura 18. Funcionamiento de una centrifuga de discos	57
Figura 19. Algoritmo para la establecer la presión de la columna de destilación	56

LISTA DE TABLAS

	pág.
Tabla 1. Ácidos grasos de los triglicéridos	18
Tabla 2. Resultados de la caracterización de la muestra	26
Tabla 3. Especificaciones técnicas del aceite crudo de palma de la Extractora Hacienda la cabaña S.A.	27
Tabla 4. Comparación entre la refinación física y química	31
Tabla 5. Verificación del cumplimiento de la normatividad	36
Tabla 6. Balance de materia de la unidad de desgomado ácido	40
Tabla 7. Balance de materia de la unidad de desgomado con agua	41
Tabla 8. Balance de materia de la centrifugación	41
Tabla 9. Balance de materia de la unidad de decoloración (Tanque de agitación)	43
Tabla 10. Balance de materia de la unidad de decoloración (Centrifugación)	44
Tabla 11. Composición del aceite previo a la etapa de destilación	45
Tabla 12. Balance de materia de la unidad de desodorización	45
Tabla 13. Materias primas para la unidad de desgomado	49
Tabla 14. Materias primas para la unidad de decoloración o blanqueo	49
Tabla 15. Diferencia entre una centrifuga tubular y una de disco	52
Tabla 16. Grupos que componen cada molécula de AGL y TGL	55
Tabla 17. Parámetros para calcular la presión de vapor de compuestos grasos	56
Tabla 18. Presión de destilado a 49°C	57
Tabla 19. Coeficientes de distribución para los compuestos claves	58
Tabla 20. Volatilidades en el destilado y fondos	58
Tabla 21. Cantidad de alimentación al tanque mezclador	60
Tabla 22. Cantidad de alimentación al tanque estático	61
Tabla 23. Condiciones de operación para calcular la densidad del vapor	64
Tabla 24. Constantes para calcular la constante K_{tamb} .	64
Tabla 25. Dimensiones del separador y condiciones del proceso	65
Tabla 26. Área de equipo y total de la planta piloto	66
Tabla 27. Costos de la unidad de desgomado	67
Tabla 28. Costos de materias primas para la unidad de desgomado	68
Tabla 29. Costos de la unidad de blanqueamiento	68
Tabla 30. Materias primas para la unidad de decoloración o blanqueo	69
Tabla 31. Costos de la unidad de desodorización	69

RESUMEN

Este documento es el informe final del trabajo de grado titulado “Diseño conceptual de una planta piloto para la refinación de aceite de palma crudo para uso alimenticio” el cual tiene por objetivo general diseñar conceptualmente una planta piloto para el proceso de refinación de aceite de palma crudo.

Inicialmente se diagnosticó una muestra de residuo vegetal proveniente de tanques de transporte del departamento del Meta, la cual fue llevada a los laboratorios Colompack y Nutriánálisis S.A. para realizar los análisis fisicoquímicos, que se compararon con las características que sale un aceite crudo industrial, tales como el porcentaje de humedad, índice de peróxidos, índice de yodo, índice de acidez, índice de saponificación e índice de refracción, concluyendo así la necesidad de un proceso de refinación.

Posteriormente se realizó una revisión bibliográfica de los tipos de refinación de aceites vegetales a nivel industrial, siendo dos los principales se compararon y se seleccionó la refinación física la cual se adecua más para hacerla a nivel laboratorio, esto de acuerdo al índice de acidez y contenido de materia Insaponificable que se identificaron en el aceite. Por consiguiente, se llevó a cabo dicho proceso y se caracterizó el producto nuevamente, comparando con la resolución 2154, la cual indica las características que debe cumplir un aceite para que sea apto para su consumo, no se dio cumplimiento a todos los parámetros, por esto se planteó una serie de recomendaciones para mejorar la refinación.

Una vez observado el comportamiento del aceite, se procedió a escalar el proceso por medio de balances de materia, a partir del cual se realizó la definición de cada uno de los equipos necesarios para el proceso, así mismo las especificaciones técnicas que estos requerían y finalmente se calcularon los costos para la implementación de dichos equipos a modo de planta piloto.

PALABRAS CLAVES: Residuo graso vegetal, aceite de palma, refinación física, diseño conceptual, planta piloto.

INTRODUCCIÓN

En el 2016 el sector oriental de Colombia, al que pertenece el departamento del Meta, registra una extracción de 498900 toneladas de aceite de palma, según el registro del sistema de información estadística del sector palmero (SISPA). Dicho aceite es transportado en carro tanques a diferentes ciudades del país, con el fin de proveer las distintas industrias que utilizan este producto como materia prima, ya sea para la producción de biodiesel, detergentes, cosméticos, concentrado para animales o aceite de mesa, entre otros. Los carro tanques que transportan el aceite crudo, están diseñados para mantener la grasa en las condiciones necesarias hasta el punto de destino, sin embargo, la descarga de esta no se hace en su totalidad, lo cual genera a las empresas de transporte una acumulación de residuos, debido a que previo a la limpieza de los contenedores para realizar una nueva carga se obtiene un remanente del aceite crudo.

Los residuos de aceite crudo de palma presentan diferentes propiedades y características fisicoquímicas, lo que permite que sea un producto interesante para refinar de acuerdo a su valor agregado. Es una grasa líquida saturada que contiene ácidos grasos saturados, monoinsaturados y poli-insaturados, destacándose el ácido láurico, el cual provee propiedades de dureza a temperatura ambiente y bajo punto de fusión. Es un aceite vegetal estable a la oxidación como consecuencia de su baja insaturación y es por esta razón que se determina su aplicación en la industria de alimentos.¹

En el presente proyecto, se plantea una idea para el uso adecuado de estos residuos, a partir del diseño conceptual de una planta piloto para la refinación del aceite crudo de palma, con la cual se busca el aprovechamiento de esta materia prima evitando la pérdida de la misma, debido a que está se va degradando si se expone a prolongados tiempos de almacenamiento, así como la contaminación de cuerpos hídricos y el incumplimiento de normas ambientales por partes de las empresas al no realizar un adecuado manejo de los residuos.

¹ T.P. Pantzaris; Mohd JaaffarAhmad. Propiedades y usos del aceite de Palmiste. 48-49 Pg.

OBJETIVOS

OBJETIVO GENERAL

Diseñar conceptualmente una planta piloto para el proceso de refinación de aceite crudo de palma.

OBJETIVOS ESPECÍFICOS

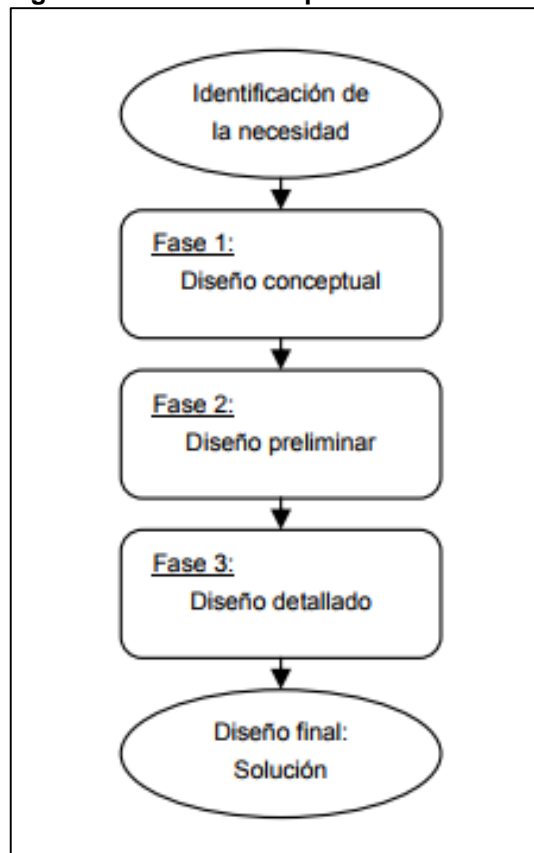
1. Diagnosticar las características del aceite crudo vegetal.
2. Determinar el método de refinación necesario del aceite crudo de palma por medio de pruebas a nivel laboratorio.
3. Definir los requerimientos generales de equipos y especificaciones que cumplan con las condiciones determinadas para el método de refinación del aceite de palma.
4. Calcular el estimativo de costos del diseño propuesto.

1. GENERALIDADES

1.1 INGENIERÍA CONCEPTUAL

La ingeniería de diseño consiste en la transformación de información sobre condiciones, necesidades, demandas, requisitos y exigencias, en la formación de un producto que satisfaga dichos requerimientos. Existen diversos modelos de diseño, entre ellos se encuentra el modelo descriptivo, el cual comprende una serie de fases las cuales se observan en la figura 1, estas son comúnmente utilizadas en el desarrollo de un producto.

Figura 1. Modelo descriptivo del diseño.



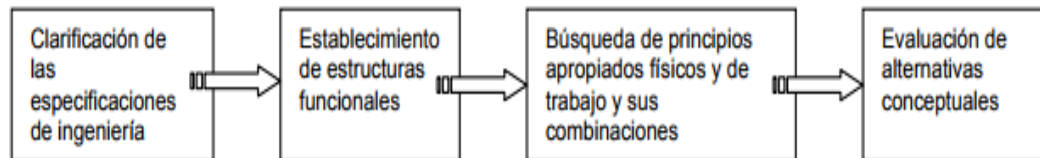
Fuente: CHAUR BERNAL, Jairo. Ingeniería del diseño.

Como se observa en la figura 1, el modelo descriptivo del diseño parte de la identificación de una necesidad, de la cual se desarrollan tres fases consecutivas para la obtención de un diseño final, las cuales consisten en el diseño conceptual, finalidad del presente proyecto, seguido por el diseño preliminar y el diseño detallado. La fase del diseño conceptual es el inicio en el desarrollo de un producto, de la cual se espera obtener soluciones que satisfagan los requerimientos del problema inicial. Su objetivo, por lo tanto, es explorar las

mejores alternativas para obtener uno o más conceptos de diseño que puedan utilizarse como base para desarrollar el producto en las subsiguientes fases².

En la figura 2, se observan las etapas que conlleva realizar un diseño conceptual, las cuales comprenden desde las especificaciones del producto deseado hasta la evaluación de las alternativas conceptuales, de la cual se realiza una pre-selección de condiciones.

Figura 2. Etapas del diseño conceptual



Fuente: Ingeniería de diseño.

Dentro de las etapas anteriores se encuentran tareas principales que permiten el desarrollo del diseño, estas son:

- Productos y capacidad de producción.
- Normativa y regulación.
- Descripción del proceso de fabricación y requerimientos de usuario.
- Descripción general de instalación.
- Plan, diagramas de bloques, distribución de salas, planos de flujos de materiales y personas, planos de áreas clasificadas, diagramas de proceso básico.
- Estimación de requerimientos de servicios auxiliares.
- Lista de equipos preliminar.
- Estimación económica la inversión $\pm 30\%$

Luego de un desarrollo experimental para la evaluación de un proceso, ya teniendo definido el producto con las condiciones y especificaciones requeridas, es necesario determinar la capacidad de producción para la que se diseñará la planta, teniendo en cuenta el porcentaje de pérdidas que pueda tener el proceso, además de los subproductos y/o desechos que se puedan obtener. Otro aspecto importante, es revisar la normatividad que rige el proceso o productos dentro del marco legal del lugar en el cual se piensa desarrollar el proyecto, esto en cuanto a la calidad del producto, el manejo de desechos, la comercialización y la relación del medio ambiente respecto a las condiciones necesarias del proceso.

Dentro del diseño conceptual, se debe realizar una descripción detallada del proceso de fabricación, esto se refiere a las condiciones del proceso entre las cuales están la temperatura y presión, además de las materias primas requeridas.

² CHAUR BERNAL, Jairo. Ingeniería del diseño. En: Diseño conceptual de productos asistido por ordenador. España: Universidad Politécnica de Cataluña, 2005. p.14-48

De dicha descripción se debe realizar básicamente un diagrama de bloques y un diagrama de proceso, estos ayudan a visualizar y a entender mejor las corrientes y flujos de materiales, las condiciones, lo que entra y sale de cada proceso unitario.

Finalmente se enlistan los equipos que se necesitan para la producción, estos dependen de cada unidad de proceso y las condiciones de manejo, es importante tener en cuenta principalmente el material que requiere cada equipo, debido a que estos difieren según el producto y/o insumos que se manejen, las condiciones a las que se lleven estos productos y la reacción que estos puedan tener con el medio ambiente, además en algunos países existe normatividad para cada material. Con la lista de dichos equipos, es posible realizar las cotizaciones pertinentes para calcular un estimativo económico de la inversión, el cual puede variar en un 30% al costo real, esta variación se tiene en cuenta debido a las fases de diseño preliminar y detallado, en las cuales es posible que este estimativo cambie para obtener un valor más preciso.

1.2 PLANTA PILOTO

Una planta piloto es la representación a pequeña escala de un proceso industrial, con esta se busca realizar una simulación a condiciones industriales reales luego de evaluar el comportamiento de dicho proceso a nivel laboratorio. Una planta piloto semicomercial es la encargada de producir una cantidad de producto lo suficientemente grande para probar su aceptación en el mercado, construida en base a los resultados de una planta piloto previa.

1.3 ACEITE CRUDO DE PALMA

El aceite de palma se extrae del mesocarpio del fruto de la semilla de la palma africana *Elaeis guineensis* jacq a través de procedimientos mecánicos. Está constituido por una mezcla de ésteres de glicerol (triglicéridos) y es fuente natural de carotenos y vitamina E³.

1.3.1 Historia. Las palmas aceiteras fueron llevadas al sudeste asiático a principios del siglo XX. En ese momento 250.000 toneladas de aceite de palma eran exportadas anualmente del sudeste asiático. Esta cantidad llegó a 2.400.000 toneladas anuales en 1982 y ha aumentado hasta los 60 millones de toneladas actuales. Malasia fue el mayor productor de aceite de palma a mediados del pasado siglo hasta que el gobierno indonesio comenzó a invertir en la industria en la década de los 70. Esta expansión llevó al país a encabezar la lista de productores en 2007 y actualmente abastece la mayor parte de la demanda

³ RINCÓN M. Sandra Milena y MARTÍNEZ C. Daniel Mauricio. Análisis de las propiedades de aceite de palma en el desarrollo de la industria. Palmas Vol. 30 No.2, 2009. 11 p.

mundial, ocupando más de 8 millones de hectáreas en Indonesia. Se estima que en 2020 la superficie ocupada será de 13 millones de hectáreas⁴.

En 1932 apareció en Colombia la palma de aceite africana y fue sembrada con fines ornamentales en Palmira (Valle del Cauca). El cultivo comercial comenzó en 1945, cuando la *United Fruit Company* estableció una plantación en la zona bananera del departamento del Magdalena.

La expansión del cultivo en el país ha mantenido un crecimiento sostenido, contando a 2011 con 266.921 hectáreas en producción y 160.446 hectáreas en desarrollo en 108 municipios distribuidos en cuatro zonas productivas:

- **Norte:** Antioquia, Magdalena, norte del Cesar, Atlántico, La Guajira, Chocó, Córdoba y Sucre.
- **Central:** Santander, Norte de Santander, sur del Cesar y Bolívar.
- **Oriental:** Meta, Cundinamarca, Casanare y Caquetá.
- **Suroccidental:** Cauca y Nariño.

Los departamentos que poseen más área sembrada en palma de aceite son, en su orden: Meta, Cesar, Santander, Magdalena, Nariño, Casanare, Bolívar, Cundinamarca y Norte de Santander.

Colombia es el primer productor en América Latina y el cuarto en el mundo. Tiene como fortaleza un gremio que cuenta con sólidas instituciones, ya que desde 1962 fue creada la Federación Nacional de Cultivadores de Palma de Aceite, Fedepalma⁵.

1.3.2 Composición. Las grasas y aceiten provenientes tanto de fuentes vegetales como animales, están constituidos principalmente por triglicéridos, estos son ésteres compuestos por una molécula de glicerina y tres ácidos grasos. La mayoría de los triglicéridos son mixtos; es decir, 2 o 3 de sus ácidos grasos son diferentes⁶. A continuación se muestra en la tabla 1 los ácidos grasos más importantes que componen los triglicéridos, así mismo su estructura y en el tipo de aceites que mayor tiene presencia.

⁴ <http://www.aceitedepalma.org/origen> [En línea] Citado el 17 de octubre de 2017.

⁵ CENIPALMA. Guía sobre el aceite de palma y sus aplicaciones. Bogotá D.C., Colombia. 2003, 10 p.

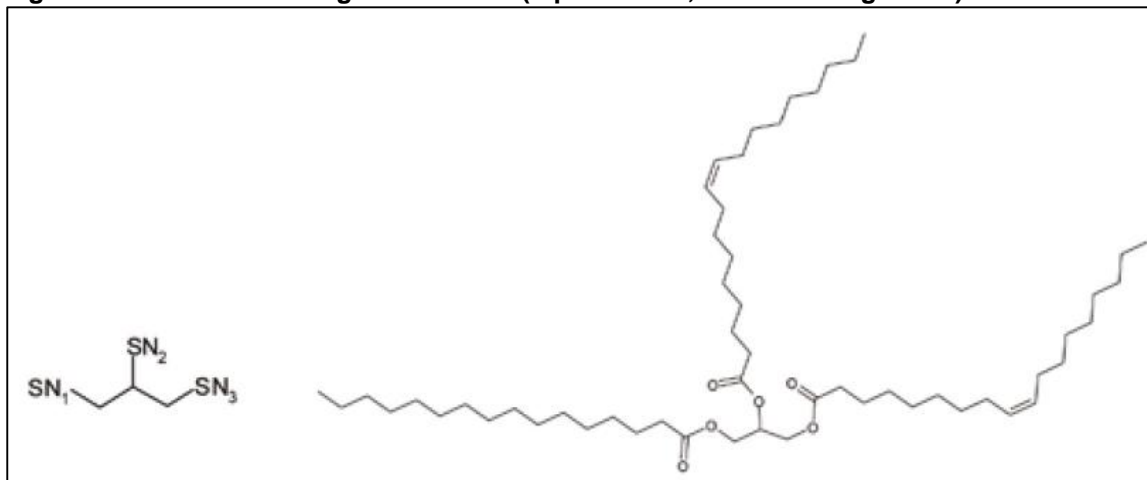
⁶ SANZ TEJEDOR, Ascensión. Tecnología de las grasas, aceites y ceras. En: Química orgánica industrial.

Tabla 1. Ácidos grasos de los triglicéridos

Ácido graso	Nº de C	Enl. dobles	Estructura
Láurico	12	-	CH ₃ -(CH ₂) ₁₀ -COOH (coco y semillas de palma)
Mirístico	14	-	CH ₃ -(CH ₂) ₁₂ -COOH (nuez moscada, coco y semillas de palma)
Palmítico (s)	16	-	CH ₃ -(CH ₂) ₁₄ -COOH (animales, casi todos los aceites vegetales)
Esteárico (s)	18	-	CH ₃ -(CH ₂) ₁₆ -COOH (animales, cacao y casi todos los aceites vegetales)
Araquídico	20	-	CH ₃ -(CH ₂) ₁₈ -COOH (cacahuete)
Palmitoleico	16	1	CH ₃ -(CH ₂) ₅ -CH=CH-(CH ₂) ₇ -COOH (animales y vegetales)
Oleico	18	1	CH ₃ -(CH ₂) ₇ -CH=CH-(CH ₂) ₇ -COOH (aceituna y almendra)
Linoleico	18	2	CH ₃ -(CH ₂) ₄ -CH=CH-CH ₂ -CH=CH-(CH ₂) ₇ -COOH (aceituna, girasol, soja)
Linolénico	18	3	CH ₃ -CH ₂ -CH=CH-CH ₂ -CH=CH-CH ₂ -CH=CH-(CH ₂) ₇ -COOH (lino)
Araquidónico	20	4	CH ₃ -(CH ₂) ₄ -(CH=CH-CH ₂) ₃ -CH=CH-(CH ₂) ₃ -COOH (vegetales)
Erúxico	22	1	CH ₃ (CH ₂) ₇ CH=CH(CH ₂) ₁₁ COOH (colza, uva)

Fuente: SANZ TEJEDOR, Ascensión. **Tecnología de las grasas, aceites y ceras.** En: Química orgánica industrial.

Los ácidos grasos insaturados que constituyen los triglicéridos (TG) del aceite de palma son el oleico (36-44%) y el linoleico (9-12%) que tienen configuración *cis*. También posee los ácidos grasos saturados palmítico (39.3-47.5%) y esteárico (3.5-6%). En lo fundamental, la composición de los triglicéridos del aceite es: 1-palmitoil-2,3-dioleoil-sn-glicerol (alrededor de 23%, Figura 3) y 1,3-dipalmitoil-2-oleoilsn-glicerol (cerca del 18%). Dichos triglicéridos se caracterizan porque el ácido oleico se encuentra en mayor proporción en la posición sn-2 del TG, lo que proporciona una mejor biodisponibilidad de ácidos grasos monoinsaturados⁷.

Figura 3. Estructura del triglicérido POO (1-palmitoil-2,3-dioleoil-sn-glicerol).

Fuente: RINCÓN M. Sandra Milena y MARTÍNEZ C. Daniel Mauricio. **Análisis de las propiedades de aceite de palma en el desarrollo de la industria.** Palmas Vol. 30 No.2, 2009.

⁷ RINCÓN M. Sandra Milena y MARTÍNEZ C. Daniel Mauricio. **Análisis de las propiedades de aceite de palma en el desarrollo de la industria.** Palmas Vol. 30 No.2, 2009. 12 p.

1.3.3 Usos. Los principales subproductos del aceite de palma son la estearina y la oleína de palma, los cuales tienen diversos usos en la industria alimentaria. La oleína es la fracción líquida y sus características físicas difieren significativamente de las del aceite de palma, y se mezcla perfectamente con cualquier aceite. La estearina es la fracción más sólida que se obtiene por el fraccionamiento del aceite de palma y es una fuente muy útil de componentes de grasas duras, enteramente naturales.

El aceite crudo puede seguir diferentes rutas dependiendo el tipo de subproducto que se quiera obtener, éste puede ser sometido a procesos de refinación y/ o procesos oleoquímicos. Algunos de estos procesos se exponen a continuación:

- **Usos alimenticios:** dentro de este grupo de subproductos se puede encontrar que después de una refinación y/o fraccionamiento del aceite crudo se producen margarinas, mantecas para panificación, shortenings, mayonesa, aderezos, grasas especiales y además, se utiliza como materia prima para la fabricación de alimentos para animales especialmente en concentrado para bovinos, ovinos, equinos, porcinos y aves.
- **Usos no alimenticios:** para obtener productos no alimenticios existe una ruta directa, en la cual no se realiza ningún tipo de transformación o refinación al aceite crudo, de esta deriva el uso del aceite como sustituto de diesel para los pozos de perforación, también como materia prima para la fabricación de jabones y productos epoxidantes tales como el PVC (polivinilcloruro); por otro lado, está la ruta oleoquímica, en la cual se realizan transformaciones químicas como hidrólisis y esterificación, de la que se obtienen ácidos grasos, alcoholes grasos, compuestos grasos nitrogenados y glicerol, que a su vez derivan en una cantidad de productos comerciales como anticongelantes, surfactantes, humectantes cosméticos, plastificantes, estabilizantes, entre otros.

En el presente proyecto se pretende realizar un diseño conceptual de una planta piloto para dar solución a la acumulación del subproducto que proviene de la extracción de aceite de palma. En este diseño inicialmente se va a caracterizar el residuo para luego definir cuáles serían las condiciones a las que se debe tratar para llegar a un producto refinado para consumo humano. El diseño conceptual comprenderá la descripción del proceso de fabricación para obtener el aceite comestible, del cual se va a desarrollar el diagrama de bloques y diagrama PFD básicos, la lista de equipos preliminar y la estimación económica de la inversión, además se realizará el diagrama de instrumentación preliminar y los sistemas de control que deberá tener la instalación.

2. DIAGNOSTICO INICIAL DEL ACEITE CRUDO DE PALMA

De la producción mundial de aceites y grasas en la actualidad cerca del 76% se destina a usos comestibles y el restante 24% a no comestibles. Colombia lidera la producción de aceite de palma en América con una participación del 30.9%.⁸ La principal aplicación en Colombia está en el mercado de alimentos puesto que el aceite de palma presenta una alta estabilidad a la oxidación en los procesos de fritura y versatilidad para la fabricación de grasas especiales y alimentos nutraceuticos.⁹, es decir, alimentos que proporcionan ventajas médicas para la salud, no obstante cuando se refiere a esta categoría alimenticia se habla de los siguientes criterios:

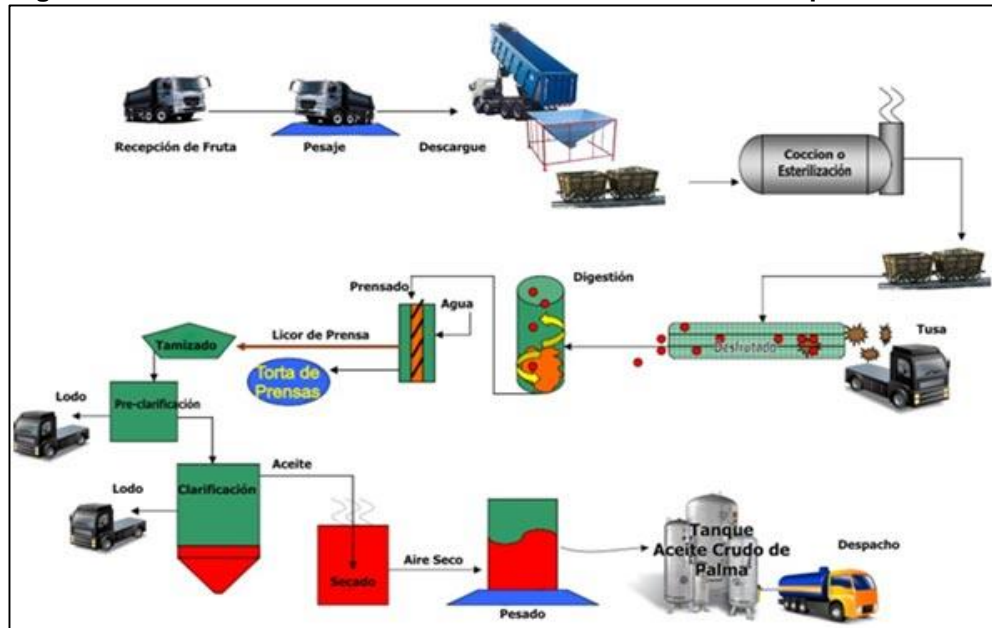
- Productos de origen natural que pueden tratarse con método químicos.
- Aporte a funciones biológicas con acción curativa.
- Contienen propiedades bioactivas (no son esenciales para la salud, pero tienen un impacto considerable en ciertas enfermedades).
- Algunos ejemplos son Vitamina E, Soja, Omega-3 y Omega-6.

Para el presente proyecto los factores, como lo son la resistencia a la oxidación y la calidad del aceite crudo mencionados previamente, se dan como consecuencia de la corriente final del proceso de extracción del residuo graso vegetal, el cual se lleva a cabo en las extractoras Cusiana Ltda., Hacienda la cabaña S.A. y Guaicaramo S.A.S., y que tienen como objetivo la obtención de productos como aceite crudo de palma, aceite crudo de palmiste y harina de palma a través de etapas físicas sin el uso de solventes químicos. Este procesamiento comprende, pues, un conjunto de etapas en las cuales el fruto de palma será sometido a una serie de operaciones unitarias para la obtención del aceite crudo obteniendo un efluente final que corresponde a línea de salida del proceso de secado como se muestra en la figura 4 del proceso productivo de extracción del aceite crudo de palma, esta corriente es el punto de partida para el desarrollo metodológico del trabajo de diseñar conceptualmente una planta piloto para el proceso de refinación de aceite crudo de palma.

⁸MESA DISHINGTON, Jens. La agroindustria de la palma de aceite en Colombia. [diapositivas] Bogotá D.C. Fedepalma, 2013. 53 diapositivas.

⁹ AMADO DÍAZ, María Antonia. Seguimiento a las pérdidas de fitonutrientes durante el proceso de refinación del aceite de palma. Trabajo de grado Especialista en ciencia y tecnología de alimentos. Bogotá D.C. Universidad nacional de Colombia. Departamento de ingeniería química y ambiental, 2010. 9 p.

Figura 4. Proceso Productivo de extracción del aceite crudo de palma



Fuente. GRUPO DÁVILA & DÁVILA. Proceso de extracción aceite crudo de palma. En: http://www.grupodaviladavila.com/es/content/departamento-de-produccion_14.html. Consultada: 17 de agosto de 2017.

Recepción de Frutos: a la planta extractora llega la materia prima en forma de racimos, en donde se pesa y clasifica de acuerdo a la calidad de maduración del fruto; se procede a realizar el descargue mediante una serie de tolvas las cuales vierten el fruto de palma en los vagones que los transportan a la etapa de esterilización.

Esterilización: el objetivo de esta fase es ablandar la cáscara de la fruta para facilitar la separación del aceite de la cáscara de nuez, no obstante, esta etapa permite:

- Inhibir el crecimiento de la enzima lipasa que es la causante del incremento del grado de acidez del ac
- eite crudo.
- Disminuir resistencia de la cáscara de nuez del fruto de palma.
- Remover el agua para facilitar la recuperación del aceite crudo.

La etapa se desarrolla ingresando los frutos seleccionados en la fase anterior a una serie de autoclaves (esterilizador) que a través de la inyección de vapor de agua saturada inactivan el crecimiento de ácidos grasos libres (AGL) a una temperatura de 60°C y presión de 40 psi, luego por la acción del vapor calentado se ablandan los tejidos de la nuez y es más fácil su remoción en la siguiente etapa.

Desfrutado: luego de ablandar los tejidos, se separa el fruto del raquis mediante un tambor rotatorio que a través del impacto contra las rejillas del equipo separa el fruto del racimo vacío, de esta manera, el fruto se lleva al digestor y el racimo se usa como abono en las plantaciones de palma.

Digestión: el fruto proveniente del desfrutado ingresa a un cilindro vertical cuya función es machacar el fruto mediante agitación dentro del tambor, de esta forma, se produce el desprendimiento de las celdas de aceite usando agua a una temperatura de 90°C.

Prensado: en la etapa de prensado se genera la separación de la fracción líquida de los frutos procedentes del digestor, se inicia esta fase ejerciendo presión para extraer el aceite por medio de tornillos giratorios y se añade agua caliente a una temperatura de 95°C para facilitar la salida del mismo y que este paso sea más efectivo y evite pérdidas de la respectiva materia prima, en consecuencia, de este equipo se producen dos efluentes, el primero de ellos correspondiente a la semilla del fruto y fibras sólidas, el segundo compuesto por aceite, agua y lodos, el cual continúa con el proceso de extracción respectivamente.

Tamizado: con el objetivo de mejorar la calidad del efluente líquido de la etapa anterior, se utilizan finos tamices que retienen las partículas sólidas excedentes (tierras y arenas) del proceso de prensado y mejorar así su aspecto visual.

Clarificación: este proceso separa las impurezas del licor prensado, que contiene, agua, pigmentos, gomas, arena, tierras y pectinas, para ello se realiza clarificación por centrifugación y posteriormente por decantación.

Al aceite no clarificado se procede a calentarlo en un gradiente de temperatura de 95-98°C, luego de esto pasa a un tanque de agitación (clarificador) y separar las impurezas solubles e insolubles, el aceite ya separado es decantado para eliminar la cantidad de agua mediante la diferencia de densidades y así obtener una corriente que corresponde al aceite libre de impurezas.

Secado: finalmente es necesario retirar el exceso de humedad generada en las etapas anteriores, por esta razón el aceite crudo clarificado se calienta a una temperatura de 50°C en un tanque destinado para este proceso y obtener el aceite extraído en su totalidad.

Para evaluar la calidad del aceite crudo de palma proveniente de la extracción se realizó el diagnóstico inicial por medio de la cuantificación de 8 parámetros, los cuales son aquellos que le otorgan la estabilidad al residuo graso vegetal y además son los requeridos por la normatividad colombiana referida a la resolución 2154 de 2012 emitida por el INVIMA:

- Densidad

- Humedad
- Índice de acidez
- Índice de yodo
- Índice de peróxidos
- Índice de saponificación
- Índice de refracción
- Contenido de materia insaponificable

2.1 ANÁLISIS DE LA MUESTRA DEL RESIDUO VEGETAL

Inicialmente se busca conocer las características del aceite recogido de los tanques de transporte, esto con el fin de saber la calidad y el estado en el que se encuentra y poder determinar el paso a seguir en cuanto a la refinación. A Bogotá fue enviada una muestra del aceite de 2L, la identificación de esta se estableció a través de procedimientos realizados por los laboratorios Colompack y Nutrianalysis S.A., a los cuales se enviaron 1.7 L y 0.3L respectivamente, debido a que en el segundo laboratorio se analizó únicamente el índice de refracción mientras que en el primero se analizaron las demás propiedades que se explican a continuación, los resultados obtenidos se exponen en la tabla 2 (ver Anexos A y B):

Densidad: se determinó la densidad en el laboratorio a partir de la norma NTC 336. Grasas y aceites animales y vegetales. Método de la determinación de la densidad (masa por volumen convencional) aplicando el método del picnómetro dando como resultado 0.910g/mL tomada a 25°C. Esta propiedad es muy importante para el proceso de refinamiento, transporte, almacenamiento y equipamiento de la planta, además el valor obtenido es un indicador bueno debido a que en el aceite crudo de palma se buscan valores por debajo de la densidad del agua (1.00g /mL), es decir, para que el residuo graso vegetal presente una mejor condición de fluidez y menor resistencia a la fricción.

Humedad (Contenido de Agua): en el laboratorio Colompack S.A. se analizó el contenido de agua por medio del método de Karl Fischer como lo indica la norma NTC 287, arrojando un porcentaje de humedad de 1.667%, el cual no es un valor recomendado para el aceite crudo de palma puesto que es necesario que exista bajo contenido de agua para evitar la acidificación del mismo y así no contribuir con el deterioro y merma de la calidad del residuo extraído.

Acidez titulable (Índice de Acidez): este parámetro hace referencia a la presencia de ácidos grasos libres presentes en la muestra de aceite crudo, puesto que a mayor cantidad de mg (miligramos) de hidróxido de potasio (KOH) menor es la calidad del residuo y se determina mediante titulación con etanol usando fenolftaleína como indicador según lo estipula la NTC 218. Determinación índice de acidez, la cual fue aplicada respectivamente, aunque es posible utilizar

hidróxido de Sodio (NaOH) para la medición de este parámetro, pero se usó la base mencionada (KOH) previamente porque es la estipulada por la normatividad.

Mediante la titulación de la muestra, el laboratorio Colompack S.A. caracterizó el aceite con una acidez titulable de 6.3 mg KOH/ g de aceite; es decir, el residuo vegetal necesita de 6.3 mg de base para neutralizar 1 g de sus respectivos ácidos grasos (palmítico, oleico, linoleico, esteárico), dicho valor obtenido no es bueno porque la presencia de ácidos grasos libres es causante del deterioro de la calidad del aceite debido al enranciamiento oxidativo e hidrólisis del mismo, por su respectiva degradación en sus dobles enlaces. Debido a la presencia de humedad y O_2 en la muestra analizada se evidencia un leve sabor amargo y olor medianamente fuerte.

Debido a que el ácido palmítico es el que se encuentra en mayor proporción respecto a los demás ácidos grasos libres, esta propiedad debe expresarse en porcentaje del mismo, realizando la respectiva conversión (Anexo C), se obtuvo un valor de 1.24% de ácido palmítico, el cual será tenido en cuenta posteriormente en la comparación con un aceite crudo promedio y en la selección del método de refinación, no obstante, el valor arrojado después de su respectiva conversión no es apto para uso alimenticio si se tiene en cuenta la resolución 2154 de 2012 que menciona un valor por debajo del 1.0% Ac. Palmítico por lo cual se busca disminuir este parámetro mediante el tratamiento de purificación.

Índice de yodo: el laboratorio Colompack S.A. analizó la propiedad mediante ensayos volumétricos de titulación usando $Na_2S_2O_3$ (Tiosulfato de sodio), a partir del método de Hannus, dichas pruebas indicaron que la muestra de aceite crudo de palma tiene un índice de yodo de 14.36.

El índice de yodo evidencia la cantidad de insaturaciones presentes en el residuo graso, por lo tanto, este será mayor a medida que aumente la cantidad de dobles enlaces, la presencia de insaturaciones en el aceite genera que este tenga mayor reactividad, debido a que estos son más susceptibles a la oxidación; es necesario mencionar que el resultado obtenido es un valor poco recomendable, puesto que se buscan valores de 50 -55, es decir, es necesario aumentar la cantidad de dobles enlaces para incrementar la reactividad del aceite crudo y así provocar la formación de triglicéridos a través del proceso de refinación.

Índice de peróxidos: esta propiedad es de gran importancia en la determinación de la calidad del aceite crudo de palma; debido a que mediante la cuantificación de los miligramos de oxígeno presentes en la muestra, se evidencia el grado de oxidación y/o enranciamiento. De manera que, mediante el método volumétrico, que consiste en una solución de KI con almidón y titulación de I_2 con $Na_2S_2O_3$, se obtuvo un resultado de 607.48 meq O_2 /kg aceite (mili equivalente de oxígeno), el valor determinado por el laboratorio Colompack permite afirmar que el aceite crudo cuenta con un índice alto el cual indica que el residuo está más expuesto al deterioro por oxidación, a su vez no es recomendable valores altos puesto que en

aceites crudos es más fácil su detrimento a mayor presencia de oxígeno en la muestra analizada., sin embargo a través del tratamiento de refinación se busca su respectiva disminución.

Índice de saponificación: la determinación del índice de saponificación realizado en Colompack S.A. se efectuó utilizando una solución de KOH (hidróxido de potasio) en exceso, la cual se valoró con una solución de ácido clorhídrico 0.5N usando fenolftaleína como indicador y obteniendo los miligramos de hidróxido de potasio gastado para el cambio de coloración; de la muestra analizada se obtuvo 247.65 mg KOH/g de aceite. Dicho índice es una medida aproximada del peso molecular promedio de los ácidos grasos y triglicéridos encontrados en el aceite vegetal, el valor obtenido es también indicador de la cantidad de miligramos de aceite que se pueden transformar en jabón, por ende es un valor alto y no recomendado para aceites crudos que deben estar valores de 100-200 mg KOH/g de aceite, porque se busca que exista pocos miligramos de jabón y mayor concentración de residuo graso vegetal aumentando así su calidad.

Índice de refracción: en cumplimiento a la norma NTC 289.grasas y aceites animales y vegetales. Determinación índice de refracción, se realizó el análisis mediante el refractómetro obteniendo un índice de refracción de 1.467 tomado a una temperatura de 22.7 °C, este índice está relacionado con el grado de insaturación, el deterioro por oxidación que presentan los aceites y la calidad visual del aceite crudo proveniente de los pigmentos y gomas presentes, en consecuencia es un resultado por fuera del promedio de 1.40-1.45 y poco sugerido, por lo que por medio de la clarificación se busca que este valor disminuya ligeramente , tampoco al extremo debido a que no se requiere que el aceite sea casi transparente, solo hasta alcanzar una coloración amarilla.

Contenido de materia Insaponificable: la metodología usada según la NTC 235. Determinación materia Insaponificable método extracción con éter etílico, por medio del principio de extracciones con éter de petróleo para valorarse posteriormente con KOH, usando fenolftaleína como indicador, para asegurar el resultado obtenido de la titulación, se purificó con agua para remover el hidróxido del medio, en consecuencia, el certificado de análisis dio un promedio de masa insaponificable de 0.14%.

Cuando se añade la solución alcalina (KOH) al aceite vegetal (palma) se saponifican primero los ácidos grasos libres generando la formación del agente emulsionante (jabón), mientras que los ácidos grasos no saponificables se disgregan gracias a la aparición de triglicéridos lo cual aumenta la superficie de contacto entre los reactivos e incrementa la velocidad de la reacción, el porcentaje obtenido es un valor adecuado menor al 1.0% , en donde el aceite crudo analizado no contiene grandes impurezas referidas a la materia Insaponificable, a su vez este resultado se disminuirá aún más para aumentar la calidad del producto final.

Tabla 2. Resultados de la caracterización de la muestra.

Parámetro	Resultado
Humedad (%)	1.667
Índice de acidez (% A. Palmítico)	1.24
Índice de yodo	14.36
Índice de peróxidos (meq O ₂ /kg de aceite)	607.48
Índice de saponificación (mg KOH/g de aceite)	247.65
Índice de refracción	14.668
Contenido de materia insaponificable (%)	0.14

Finalmente con el objetivo de complementar el diagnóstico inicial de la muestra estudiada, se evidenciaron las siguientes características organolépticas en el aceite crudo de palma:

- No presenta sustancias extrañas ni tampoco mezcla con otros aceites ni grasas.
- No presenta partículas sólidas extrañas en suspensión.
- Color rojo-anaranjado particular por la presencia de pigmentos y carotenoides.
- Olor y sabor rancio característico como consecuencia proceso de extracción normal de aceite crudo de palma.

Actualmente, los residuos de aceite se recogen de distintas extractoras del departamento del Meta, por lo tanto, se ha investigado la calidad del aceite proveniente de varias empresas, encontrando así la ficha técnica del aceite crudo producido por Hacienda la cabaña S.A., en la tabla 3 se exponen los parámetros fisicoquímicos con los que se obtiene dicho aceite y los cuales se determinaron anteriormente para la muestra tomada, esto con el fin de comparar los resultados de la tabla 2.

Tabla 3. Especificaciones técnicas del aceite crudo de palma de la extractora Hacienda la cabaña S.A.

Variable	Parámetro
Acidez	3.2% Á. Palmítico Máx.
Humedad	0.2% Máx.
Índice de yodo	50-58

Observando la tabla 2 y la tabla 3, se pueden comparar las siguientes propiedades: la acidez en porcentaje de ácido palmítico de la muestra es de 1.24%, por lo que es menor al máximo valor que se puede encontrar en un aceite crudo común de acuerdo a las especificaciones técnicas de la tabla 3, por otro lado, la humedad de la muestra que es de 1.667% se observa que es mayor al porcentaje máximo del aceite crudo, sin embargo, este exceso de agua es posible disminuirlo en el proceso de refinación, finalmente se evalúa el índice de yodo el cual está por fuera del rango en el que se obtiene el aceite de las refinerías, éste es de 14.36.

En efecto, teniendo en cuenta el primer diagnóstico realizado al aceite crudo de palma resulta necesario un proceso de refinación, con el cual se disminuyan los parámetros de humedad, índice de acidez e índice de peróxidos que son los mayores causantes de la reducción de la calidad del residuo graso. Dicho proceso de purificación está compuesto por una serie de etapas que permiten mejorar la calidad del mismo, haciendo que éste sea más agradable visualmente y tenga las propiedades aptas para ser consumido. A nivel industrial se realizan tratamientos el aceite por diferentes métodos, estos serán estudiados en el siguiente capítulo y así determinar el tratamiento más adecuado para la muestra diagnosticada.

3. REFINACIÓN DEL RESIDUO VEGETAL A NIVEL LABORATORIO

Tomando en consideración la comparación de la tabla 2, se evidencia el no cumplimiento de seis de los parámetros requeridos por la normatividad vigente de aceites crudos por lo que es necesario llevar a cabo un proceso de refinación, en el que se eliminen los compuestos indeseables que afectan el color, sabor, olor y la estabilidad del producto con fines alimenticios, para que estos cumplan de manera satisfactoria. A nivel industrial, existen dos métodos para la refinación de aceites: la refinación física y la refinación química. Por esto, se seleccionara el método que sea más apropiado para realizar la purificación a nivel laboratorio por medio de una tabla comparativa de los dos procesos, con base al tratamiento seleccionado se desarrolló la experimentación con el residuo vegetal para luego comparar los resultados de una caracterización posterior al proceso con la que se realizó previamente.

3.1 PROCESOS DE REFINACIÓN DE ACEITE CRUDO DE PALMA

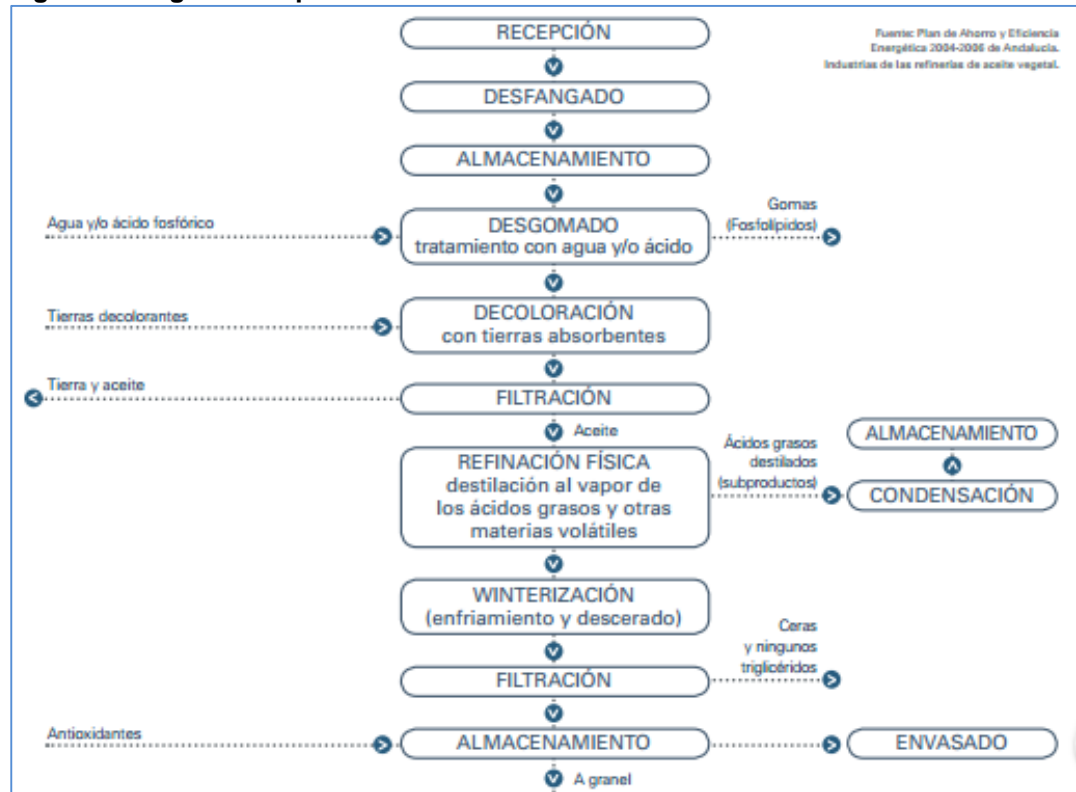
El proceso de refinación busca purificar los aceites no aptos para consumo humano; se consideran no comestibles de acuerdo a su índice de acidez y debido a la presencia de tocoferoles, gomas, antioxidantes, aldehídos, alquenos y butenos. Existen dos métodos de refinación: física y química, estos difieren en una etapa en la cual se remueven los ácidos grasos libres, a continuación se explica la descripción del proceso en general:

- **Desfangado:** consiste en la eliminación de partículas sólidas suspendidas en el aceite, esto se hace por medio de separación por centrifugación.
- **Desgomado:** en esta etapa se realiza la eliminación de gomas y/o fosfolípidos, debido a que existen fosfolípidos hidratables y no hidratables, se hace un tratamiento con ácido fosfórico de una concentración del 85% (concentración estándar comercial) o ácido cítrico de un 50% de pureza¹⁰, con el fin de convertir los no hidratables, para una separación posterior con adición de agua.
- **Blanqueo o decoloración:** este proceso consiste en eliminar los pigmentos del aceite para mejorar su aspecto, se lleva a cabo mediante el contacto con tierras absorbentes (carbón activado, arcillas o silicatos), las cuales se separan por filtración.
- **Desodorización:** la desodorización se realiza principalmente para eliminar los ácidos grasos libres existentes, además de sustancias que provocan malos olores y sabores. Esto se hace mediante una destilación con arrastre de vapor.

¹⁰ BLANCO RODRÍGUEZ, Pilar. Diseño de una planta de refinación de aceites vegetales. Proyecto de fin de carrera de ingeniería química. Cádiz, España. Universidad de Cádiz. Facultad de ciencias, 2007. 40-41 p

- **Winterización:** es una etapa de enfriamiento en la cual se busca cristalizar ceras, las cuales generan un aspecto turbio al aceite.
- **Filtración:** con el fin de eliminar las ceras cristalizadas se realiza una separación por filtración obteniendo así el aceite refinado

Figura 5. Diagrama de proceso de la refinación física



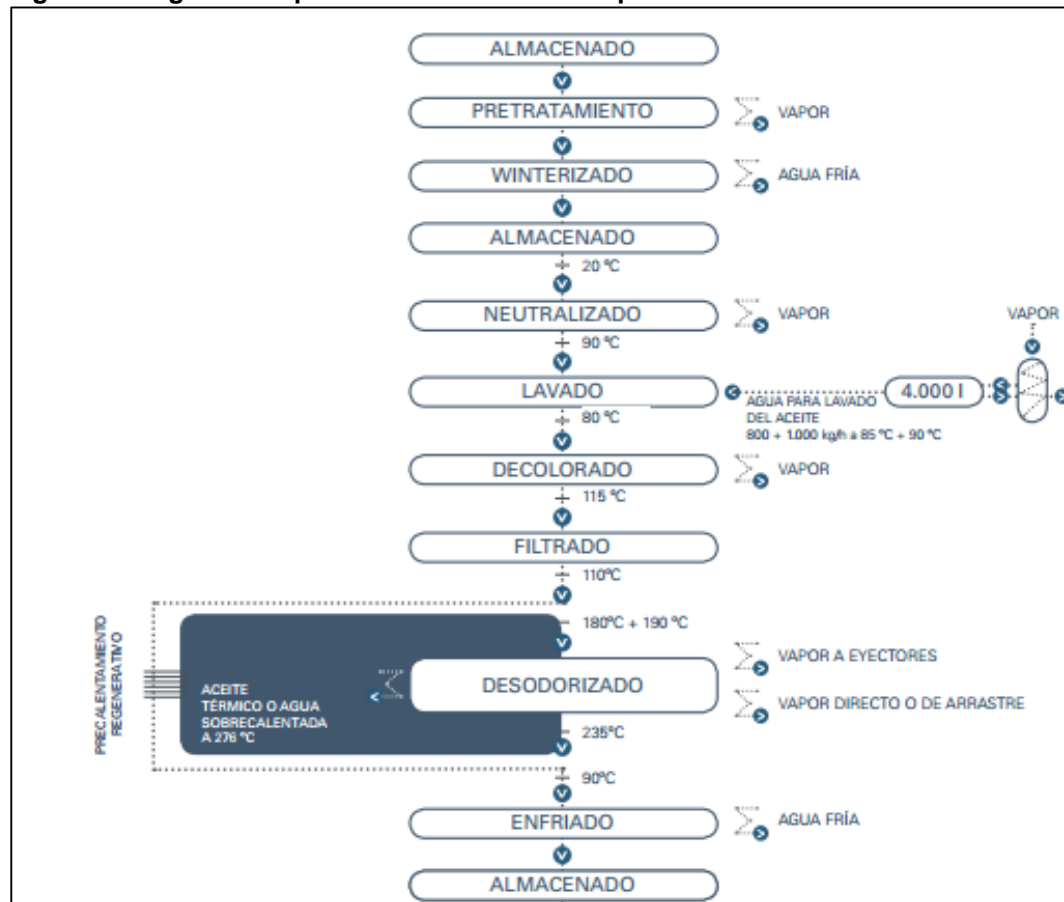
Fuente: Manual de eficiencia energética para pymes¹¹

Esta es la línea de procedimiento que sigue cualquier tipo de refinación, pero la refinación química comprende una etapa más:

- **Neutralización:** esta es la etapa que diferencia a la refinación química, se realiza antes de la etapa de decoloración, con el fin de neutralizar los ácidos grasos libres para facilitar su separación. Mediante el tratamiento de los ácidos grasos libres con soda cáustica, se permite la formación de jabones que se eliminan posteriormente con un subproceso de lavado, y adicionalmente se realiza un proceso de secado para eliminar el exceso de agua.

⁹BLÁZQUEZ, Daniel y DEL OLIVIO, Marta. Fabricación de aceites y grasas vegetales y animales, Manual de eficiencia energética para pymes. Gas natural Fenosa

Figura 6. Diagrama de proceso de la refinación química.



Fuente: Manual de eficiencia energética para pymes¹²

Los diagramas de proceso de la refinación física (figura 5) y la refinación química (figura 6), se exponen con el fin de dar una idea más clara de cada proceso, evidentemente se observan las diferencias nombradas en la explicación anterior.

3.2 SELECCIÓN DEL MÉTODO DE REFINACIÓN A NIVEL LABORATORIO

Teniendo en cuenta los procesos anteriormente mencionados y la necesidad de realizar un proceso de refinación al residuo vegetal, se realiza la selección del método mediante el estudio de la acidez y la calidad del aceite ya caracterizado en el capítulo anterior.

La elección del proceso de refinación que requiere un aceite vegetal, depende básicamente de dos factores, la acidez y la calidad del mismo, ambos se evalúan a partir de la caracterización de una muestra. En este caso, la calidad hace referencia a la cantidad de impurezas que tenga el aceite, estas se miden con el

¹² BLÁZQUEZ, Daniel y DEL OLIVIO, Marta. Fabricación de aceites y grasas vegetales y animales, Manual de eficiencia energética para pymes. Gas natural Fenosa

porcentaje de materia Insaponificable, por otro lado, la acidez, hace referencia a la cantidad de ácidos grasos presentes en la muestra, la cantidad de estos limitan que se pueda llevar a cabo la refinación física, esto debido a que en aceites con acidez elevada pueden provocar un efecto de interesterificación (modificación de triglicéridos) en el aceite refinado. Por tanto, cuando la acidez del aceite supera el 2% aproximadamente, se realizará refinación química, mientras que para valores inferiores se realizará, siempre que la calidad del aceite lo permita, refinación física¹³. Dicho lo anterior, se observan los valores obtenidos por las dos propiedades de interés en la tabla 3 y se selecciona el método adecuado para el residuo, primero se observa que la calidad del aceite en términos de materia Insaponificable es de 0.14%, lo cual indica que la calidad del aceite es buena ya que el valor es menor al 1%, segundo se observa el valor del índice de acidez el cual es de 1.24% ácido palmítico, siendo este menor al 2%, concluyendo así que los dos factores favorecen el proceso de refinación física, el cual se llevará a cabo a nivel experimental.

Además de lo anterior se realizó la tabla 4, la cual compara y presenta tanto las ventajas como las desventajas que se obtienen de los dos procesos de refinación, de lo cual se afirma que la refinación física sigue siendo la mejor opción para realizar la purificación del residuo vegetal.

Tabla 4. Comparación entre la refinación física y química.

Refinación física	Refinación química
<ul style="list-style-type: none"> • Tasa de refinación alta, menos pérdida de aceite. • No se desperdicia el agua descargada • Mas ácidos grasos destilados • Especialmente indicado para los ácidos, y los de bajo contenido de goma. 	<ul style="list-style-type: none"> • Excelente capacidad de adaptación y menos requisitos para aceites de alta de calidad. • El aceite final es consistente y estable • Menos de tierra de blanqueo necesaria en comparación con el refinado físico.¹⁴

3.3 REFINACIÓN FÍSICA A NIVEL LABORATORIO

Según la tabla comparativa expuesta en el apartado anterior se llevó a cabo la refinación física a nivel laboratorio teniendo en consideración los artículos de Fedepalma: refinación de aceite de palma con sílice (WEL- LIN SIEW.- YEW -AL TAN Y THIN SUE TANG) y refinación del aceite rojo de palma (C.K. Ooi; Y.M. CHOO; S.C. YAP; A.N. MA) respectivamente, que proveen las condiciones adecuadas del protocolo de refinación a pequeña escala, debido a que en estos artículos evalúan diferentes condiciones y así mismo, definen las mejores para el

¹³ 26 p.

¹⁴ <http://www.refinaciondeaceites.com/planta-de-refineria-de-aceite/>

proceso; este método se compone principalmente de seis etapas, las cuales se describen a continuación:

A través de cada una de las etapas del proceso de refinación física se eliminan sólidos suspendidos por medio de centrifugación, se remueven fosfolípidos hidratables y no hidratables con calentamiento y reactivos (agua/ácido fosfórico), se clarifica el residuo mediante tierras blanqueadoras, se evaporan AGL (Ácidos grasos libres) e impurezas orgánicas volátiles a través de destilación y se precipitan ésteres de ácidos grasos mediante enfriamiento, permitiendo la purificación del aceite adecuado para uso alimenticio y con la ventaja de menos pérdida de muestra frente a la refinación química.

Para la experimentación se tomó una muestra de 160ml a la cual se le realizó la refinación física a nivel laboratorio con el fin de evaluar cómo se comporta el residuo vegetal y saber si por el método físico es posible llegar a los parámetros requeridos por la norma

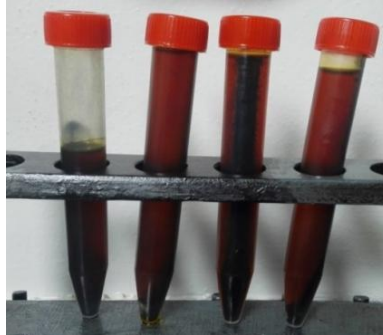
- **DEFANGADO:** para el aceite crudo de palma no es necesario realizar esta etapa puesto que este residuo vegetal no posee ninguna sedimentación de impurezas, es decir, está libre de sustancias sólidas extrañas en suspensión.
- **DESGOMADO:** este proceso se dividió en dos partes; en la primera se convirtieron los fosfolípidos no hidratables en hidratables para luego, en la segunda parte, eliminar todos los fosfolípidos mediante hidratación. Primero se montó un matraz de fondo plano de 250mL junto con una malla de alambre encima de un mechero Bunsen donde se agregaron 0.8 mL de ácido fosfórico correspondientes al 0.5% de la cantidad de aceite a tratar, el cual se decide utilizar en vista de que es el más utilizado a nivel industrial para este proceso, por otro lado, es el ácido que se utiliza en el protocolo definido por los artículos nombrados anteriormente y además, este compuesto es más económico en comparación con el ácido cítrico. Esta mezcla se calentó hasta 90°C por aproximadamente 10 minutos, de esta manera los fosfolípidos no hidratables se convirtieron en hidratables. En consecuencia, para la eliminación de todos los fosfolípidos, se adicionaron 3.2 mL de agua equivalentes al 2% de la muestra, esto se calentó a 70°C por 10 minutos al igual que la mezcla anterior pero con agitación constante (ver figura 7).

Figura 7. Eliminación de fosfolípidos.



Durante el proceso los fosfolípidos se aglomeraron y se precipitaron, facilitando su remoción por medio de una centrifugación llevada a cabo a 1500rpm durante 10 minutos, gracias a dicho proceso se acentuaron en el fondo de los tubos de ensayo los fosfátidos tal como se observa en la figura 8.

Figura 8. Sedimentación de fosfolípidos.



- **DECOLORACIÓN O BLANQUEO:** esta etapa de la refinación es un proceso físico de separación por medio de adsorción, en este caso por contacto con tierras blanqueadoras, en el que se remueven pigmentos y en algunos casos se eliminan trazas de impurezas como gomas y jabones.

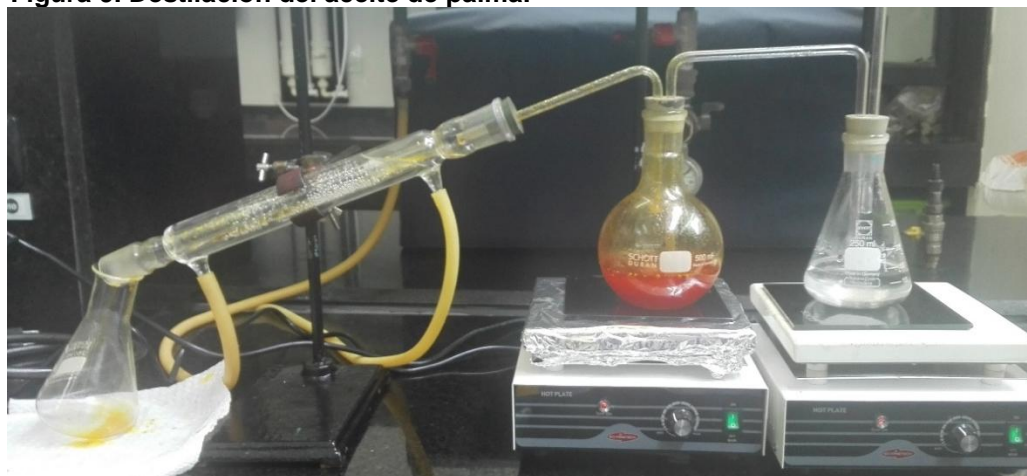
Para este proceso se eligió trabajar con el carbón activado, debido a que este es un material altamente poroso, utilizado para eliminar compuestos principalmente orgánicos presentes en líquidos. Además de ser uno de los compuestos más utilizados en la purificación y blanqueamiento de líquidos tales como el agua, bebidas alcohólicas, aceites, entre otros, y es el más fácil de manejar a nivel laboratorio, esto por las bajas temperaturas y menores tiempos de contacto necesarios con respecto a las arcillas o silicatos de aluminio utilizados en la industria con una mayor precisión en cuanto al manejo de condiciones, además de ser el más accesible en el mercado.

El aceite desgomado se puso en contacto con el carbón activado agregándole 2.912g, correspondientes al 2% de la muestra, durante 30 minutos a una temperatura de 110°C en constante agitación. Al terminar el proceso se pasó la mezcla por centrifugación para separar los compuestos y al terminar esto se observó que no hubo mayor cambio en el color de la muestra, sin embargo, para lograr la efectiva clarificación o blanqueamiento del residuo graso vegetal es recomendable aplicar una presión de vacío de 2-3 torr, elevar la temperatura hasta 125°C y aumentar el tiempo de 40 minutos para mejorar las condiciones de esta etapa y así remover los pigmentos presentes en la muestra.

- **DESTILACIÓN A VACÍO POR ARRASTRE CON VAPOR O DESODORIZACIÓN:** Mediante la destilación se busca eliminar compuestos volátiles tales como aldehídos, cetonas, peróxidos y otros compuestos orgánicos, además de los ácidos grasos libres que contiene el residuo vegetal.

El proceso de desodorización se realizó en un montaje de destilación por arrastre con vapor como se observa en la figura 9, el proceso se mantuvo durante dos horas en un gradiente de temperaturas entre 230 y 250°C, se puso en una plancha de calentamiento controlando la temperatura por medio de un termómetro, durante este tiempo se pudo observar la evidente separación de los compuestos nombrados anteriormente, debido a que estos formaban una capa de grasa suspendida sobre el agua destilada (ver figura 9), la cual representaba el excedente en el porcentaje de humedad en los resultados de los análisis fisicoquímicos y se espera que haya disminuido después de este procedimiento.

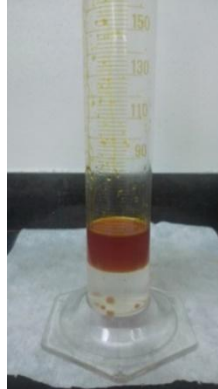
Figura 9. Destilación del aceite de palma.



Al finalizar el proceso de destilación se midió el total de residuo destilado que fue de 48 mL (ver figura 10), y se observó una cantidad de 21mL de material graso

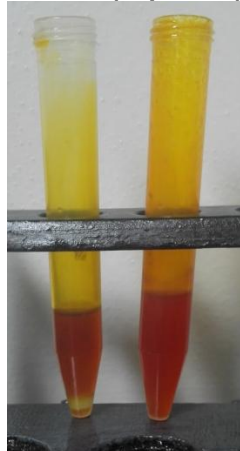
suspendido, con lo cual se espera haber eliminado por completo los peróxidos e impurezas presentes en el aceite refinado en un 80%.

Figura 10. Residuos volátiles



- **WINTERIZACIÓN:** El proceso de descerado se realiza para aceites vegetales como el aceite de oliva, aceite de calabaza, entre otros, con el fin de cristalizar las ceras presentes en el mismo, a pesar de que éstas no representan riesgo en la salud humana es una etapa opcional para mejorar el aspecto del producto frente al consumidor, no obstante, el aceite crudo de palma no es aplicable para esta etapa debido a que no es necesario el proceso de fraccionamiento de las ceras para obtener aceite refinado RBD.(Aceite de palma refinado)
- **FILTRACIÓN:** Finalmente se realizó la filtración del aceite desodorizado en un embudo de separación, y así se dio por terminado el proceso de refinación, esperando que la muestra de aceite cumpla con todos los requisitos de la norma (ver figura 11).

Figura 11. Producto refinado(Izquierda).



3.4 ANÁLISIS DE RESULTADOS DEL PROCESO DE REFINACIÓN

Después de la refinación física experimental, fue llevado el producto al laboratorio Colompack S.A. donde se realizó la caracterización final, con el fin de realizar un análisis comparativo que involucre los mismos parámetros fisicoquímicos relevantes para el cumplimiento normativo del aceite refinado.

En la tabla 5 se verifica el cumplimiento de la norma con respecto a las propiedades exigidas y se hace la comparación entre los valores obtenidos antes y después de la refinación, en ésta, se observó que solo los parámetros de contenido de materia Insaponificable e índice de saponificación cumplen con la norma, el primero ya cumplía antes de la refinación, mientras que el segundo se disminuyó lo suficiente para estar dentro del rango de 109-209mgKOH/g de aceite, lo cual indica que el aceite quedó con un porcentaje aceptable de aceite refinado.

Tabla 5. Verificación del cumplimiento de la normatividad.

Parámetro	Normatividad	Aceite crudo de palma	Aceite refinado	Cumple/ No cumple
Humedad (%)	<0.2	1.667	1.1	No cumple
Índice de Acidez (%Á. Palmítico)	<0.10%	1.24	1.94	No cumple
Índice de yodo	50-55	14.36	16.28	No cumple
	Virgen ≤ 20			
Índice de peróxidos (meq O ₂ /kg de aceite)	Refinado fuera de planta <5	607.48	40.13	No cumple
Índice de saponificación (mg KOH/g de aceite)	109-209	247.65	159.07	Cumple
Índice de refracción	1.454-1.456	1.4668	1.4668	No cumple
Contenido de materia insaponificable (%)	≤ 12	0.14	0.04	Cumple

Teniendo en cuenta la tabla 5 es necesario analizar cada uno de los parámetros que no cumplen a partir del desarrollo experimental a nivel laboratorio como se muestra a continuación:

Humedad: el porcentaje de humedad disminuyó hasta un valor de 1,1% lo cual es un causante para el aumento de la acidificación del aceite por el contenido de agua presente, además este no cumplimiento se da como consecuencia de las condiciones y tiempo de operación las etapas de desgomado y desodorización, en otras palabras, debido a que se clasifica como residuo las variables de operación (temperatura y presión) de cada una de las etapas anteriores son más severas y dichas recomendaciones se tienen en cuenta en el siguiente capítulo para el escalamiento a nivel industrial, es decir, se recomienda en la etapa de desgomado aplicar presión de vacío de 2-3 torr y en la desodorización utilizar una alta presión de 20-25 x 10³ torr para lograr eliminar el exceso de agua presente en la muestra analizada.

Índice de acidez: este parámetro fundamental es el de mayor importancia puesto que el contenido de ácidos grasos libres es la causa directa del detrimento de la calidad del aceite debido a la acidificación e hidrólisis del mismo, por la degradación en los dobles enlaces.

Esta propiedad se expresará en porcentaje de ácido palmítico, realizando la respectiva conversión (Anexo D), se obtuvo un valor de 1.94% cual será tenido en cuenta para su análisis, por esta razón se observó que no se disminuyó este parámetro por factores como la temperatura y presión en la etapa de desodorización, porque al catalogarse como residuo crudo de palma es necesario aseverar la temperatura y aplicar presión de vacío en esta fase y a nivel laboratorio es difícil de controlar estas variables de operación, sin embargo en el capítulo 4 se tomarán en cuenta las respectivas recomendaciones que generan la disminución de este importante indicador. Cabe resaltar que el indicador se encuentra por debajo del 2% por lo que es acertado concluir que el método de refinación física sí es el adecuado pero se recomienda modificar parámetros de operación, a su vez la muestra de aceite crudo refinada se acidificó porque los siguientes factores:

- No hubo estricto control de temperatura en su almacenamiento.
- En el laboratorio no se evitó de manera satisfactoria el contacto con aire, provocando el deterioro del aceite crudo.
- No se removió la totalidad de agua en exceso presente en la muestra por lo que se provocó el aumento de los ácidos grasos libres.
- No se manejó la presión de vacío de 2-3 torr en la etapa de desgomado, temperatura de 125°C y presión de 2-3 torr en la fase de blanqueamiento y aumento de la presión en la desodorización hasta un valor de 20-25 x 10³ torr respectivamente.

Índice de Yodo: luego del proceso de refinación este parámetro no cumple puesto que el diagnóstico final arroja un valor de 16.28, es decir, el índice de yodo da muestra de la cantidad de ácidos grasos insaturados en el residuo graso, por lo que, este será mayor a medida que aumente la cantidad de dobles enlaces, el contenido de insaturaciones en el aceite genera que este tenga mayor nivel reactivo y es lo que se busca en la normatividad, al aumentar la temperatura en todas las etapas del tratamiento físico se aumenta este valor y es la recomendación que se realiza para el escalamiento industrial.

Índice de peróxidos: se obtuvo un valor de 40.13 meq O₂/kg de aceite, el resultado anterior indica que el aceite, aún después del proceso de refinación, contiene cantidades de impurezas de oxígeno, que a pesar de la evidente disminución, el valor de este índice no llega a cumplir con la normatividad, debido a que se recomienda que en las etapas de desgomado y desodorización exista un aumento de la temperatura para disminuir este indicador, a su vez dicha recomendación se toma en consideración en el momento del diseño conceptual del proceso.

Índice de Refracción: el índice de refracción no alcanza el valor exigido; esto puesto que en la etapa de decoloración no se alcanza a blanquear el residuo graso en su totalidad como consecuencia del agente adsorbente usado, de la temperatura y tiempo de contacto, por lo que se recomienda usar tierras filtrantes que logren remover en mayor medida los pigmentos contenidos en el aceite crudo de palma.

4. DISEÑO CONCEPTUAL DE LA PLANTA PILOTO PARA LA REFINACIÓN DE ACEITE CRUDO DE PALMA

Como se dijo en el primer capítulo, la ingeniería conceptual es el inicio del desarrollo de un producto, en este caso, el producto de interés es el aceite RBD, el cual se obtiene de la refinación del residuo que se recoge de los tanques de transporte. En este proyecto, en cuanto a la ingeniería conceptual, se abarcará la descripción del proceso para llevarlo a cabo en una planta piloto, así mismo se hará el diagrama de flujo de proceso y un presupuesto preliminar.

En el siguiente capítulo se hará el desarrollo inicial del diseño conceptual de la refinación del aceite crudo de palma, tomando en cuenta los dos primeros ítems nombrados en el párrafo anterior, se describirá el proceso a nivel industrial, escalando la experimentación que se realizó en el capítulo anterior con ayuda de los balances de materia. A partir de los resultados obtenidos en la a nivel laboratorio, además de lo investigado en la literatura, se plantean las etapas para el proceso en planta piloto con el fin de definir los equipos, materias primas y costos de los mismos, también se realizan las recomendaciones adecuadas en cada paso con referencia a las observaciones del proceso experimental.

4.1 DESCRIPCIÓN DEL PROCESO INDUSTRIAL

El proceso de refinación física del aceite crudo de palma comprende una serie de tratamientos etapa por etapa en donde se eliminan fosfolípidos, pigmentos, compuestos volátiles, sabores, olores y ceras respectivamente. Luego de la descripción de cada etapa, se presenta el balance de materia que se va a manejar en la planta piloto, esto es con base en el proceso experimental que se describe en el capítulo anterior. Se propone manejar una producción de 1000 kg/h de aceite refinado, debido a que es una planta piloto condicionada a la recepción de las mermas de transporte. En el proyecto se tienen en cuenta la eliminación de las diferentes impurezas que representan aproximadamente el 16.9% del aceite crudo, por este motivo y con base en el balance de materia se calculó que la alimentación debe ser de mínimo 1229kg/h con el fin de garantizar una producción de 1030kg/h. Finalmente, se presenta el diagrama de proceso de cada etapa, describiendo como se compone cada corriente y el producto que se obtiene de cada proceso.

4.1.1 Unidad de desgomado. El proceso de desgomado consiste en la eliminación de fosfolípidos presentes en el aceite. Los también llamados fosfátidos o gomas, son compuestos constituidos por un polialcohol, unido por dos ácidos grasos y un grupo fosfato, estos pueden ser hidratables o no hidratables.

A nivel industrial existen diferentes tipos de desgomado, los más utilizados son el desgomado con agua, el desgomado ácido y el desgomado especial.

En el presente proyecto se eligió realizar un desgomado ácido seguido de un desgomado con agua, puesto que la muestra de aceite contenía un porcentaje de humedad del 1.667% la cual es superior a la estipulada por la norma y es necesaria la remoción de los fosfátidos hidratables, además el contenido de gomas presente justifica el uso del ácido fosfórico para su respectiva eliminación. Adicionalmente, se puede afirmar que la elección tomada hace posible que la planta sea aplicable a cualquier tipo de aceite crudo vegetal.

Primero se llevará a cabo un proceso con ácido fosfórico al 85%, el residuo vegetal se calienta antes de entrar al tanque en una caldera hasta alcanzar una temperatura de 90°C, seguidamente ingresa al recipiente mezclador en donde reacciona con ácido fosfórico durante 10 minutos para asegurar la totalidad de la remoción de los fosfolípidos no hidratables. El efluente proveniente del tanque mezclador se incorpora en un agitador estático junto con la adición de agua en un tiempo de residencia de 10 minutos y cuyo objetivo es la eliminación de humedad presente en el aceite y es recomendable manejar una presión de vacío de 2-3 torr para evitar el contacto con aire en el proceso. Por último la mezcla se separa mediante un equipo de centrifugación, generando una corriente de aceite desgomado y otra con las impurezas eliminadas. Se menciona que la cantidad de ácido y agua suministrados en esta unidad corresponden al 0.5% y 2% del volumen de materia prima entrante respectivamente.

A continuación, se realiza el balance de la unidad en la cual se adicionan los dos componentes que hacen posible la eliminación de fosfolípidos, al primer desgomado entran dos corrientes, la corriente M1 que se compone por el residuo a tratar y la corriente M2 en la que entra en ácido fosfórico necesario.

Tabla 6. Balance de materia de la unidad de desgomado ácido.

Corriente/ Componente	Entradas		Salida
	M1	M2	M3
Flujo	1228,5	12,69	1241,19
Humedad	0,0167	0	0,0165
AGL	0,1139	0	0,1127
Fosfolípidos	0,0158	0	0,0156
Materia Insaponificable	0,0014	0	0,0014
TGL	0,8385	0	0,8300
Pigmentos	0,0137	0	0,0136
H ₃ PO ₄	0	1	0,0102
H ₂ O	0	0	0
Carbón Activado	0	0	0
Σ Flujos	1241,19		1241,19

Luego de la adición de ácido fosfórico, la corriente M3 entra en contacto con la corriente M4 que se compone solamente de agua, y de esta unidad sale una corriente M5 que contiene tanto el aceite como el agua y el ácido fosfórico.

Tabla 7. Balance de materia de la unidad de desgomado con agua

Corriente/ Componente	Entradas		Salida
	M3	M4	M5
Flujo	1241,19	27	1268,19
Humedad	0,0165	0	0,0161
AGL	0,1127	0	0,1103
Fosfolípidos	0,0156	0	0,0153
Materia Insaponificable	0,0014	0	0,0014
TGL	0,8300	0	0,8123
Pigmentos	0,0136	0	0,0133
H ₃ PO ₄	0,0102	0	0,0100
H ₂ O	0	1	0,0213
Carbón Activado	0	0	0
Σ Flujos	1268,19		1268,19

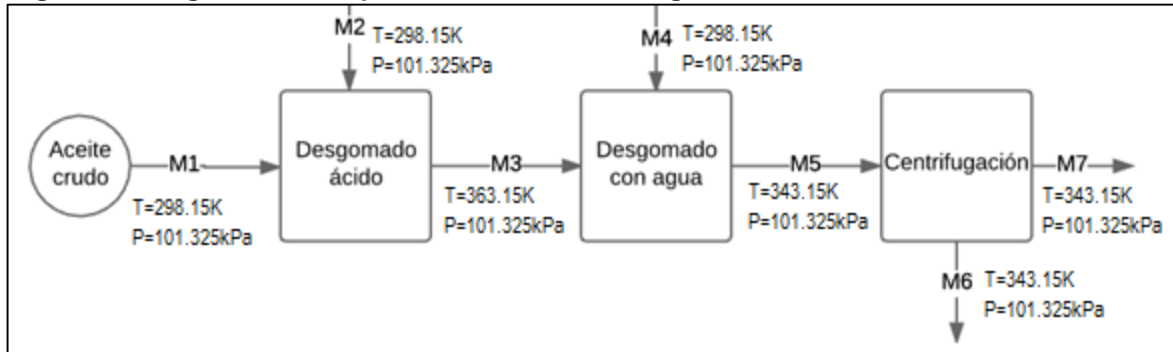
Finalmente la corriente M5 que sale del desgomado con agua, pasa por una separación de la cual se obtienen las corrientes M6 y M7.

Tabla 8. Balance de materia de la centrifugación.

Corriente/ Componente	Entradas		Salida
	M5	M6	M7
Flujo	1268,19	59,063445	1209,1266
Humedad	0,0161	0	0,0169
AGL	0,1103	0	0,1157
Fosfolípidos	0,0153	0,3280	0
Materia Insaponificable.	0,0014	0	0,0014
TGL	0,8123	0	0,8520
Pigmentos	0,0133	0	0,0139
H ₃ PO ₄	0,0100	0,2149	0
H ₂ O	0,0213	0,4571	0
Carbón Activado	0	0	0
Σ Flujos	1268,19		1268,19

En la figura 12 se observa la entrada del aceite por la corriente M1 a un tanque mezclador en el cual se adiciona H_3PO_4 por la corriente M2, la mezcla de estos dos compuestos (M3) pasa a un tanque de agitación en el cual se añade agua por la corriente M4, generando una corriente M5 que finalmente pasa a una centrifuga de la cual se obtiene dos corrientes, una compuesta por fosfolípidos, agua y ácido fosfórico, y otra de aceite desgomado, M6 y M7 respectivamente, esta última pasa a la siguiente unidad de decoloración.

Figura 12. Diagrama de bloques de la unidad de desgomado.



4.1.2 Unidad de decoloración o blanqueo. La operación de decoloración tiene como fundamento principal la retención de los pigmentos, trazas de gomas, clorofila, entre otras impurezas menores, mediante el uso de un agente adsorbente. Los materiales adsorbentes tienen una característica principal que es ser altamente porosos y generan la separación debido a las fuerzas de interacción o diferencias de peso molecular entre las moléculas presentes en el adsorbato y adsorbente.

Inicialmente, en este proyecto se utilizó el carbón activado, por su alta porosidad, capacidad de eliminar compuestos orgánicos presentes en aceites, facilidad de manejo, recuperabilidad, menor tiempo de contacto y accesibilidad en el mercado, sin embargo se recomienda el uso de silicatos o tierras filtrantes especializadas en este tipo de proceso. El tratamiento que se lleva a cabo en esta etapa es el siguiente:

Se bombea el aceite desgomado hacia un tanque mezclador que se agita junto con el carbón activado, este se adiciona por la parte superior del recipiente, de esta manera entran en contacto la sustancia a decolorar y el adsorbente, el cual tiene que ser estimulado mediante el incremento de temperatura, por esta razón la mezcla anteriormente mencionada entra en un tanque de decoloración en donde se calienta a $110^{\circ}C$ revolviendo constantemente; de esta manera con la interacción durante 30 minutos se remueven los pigmentos. Luego por la parte inferior del equipo se va retirando el efluente y se pasa a través de una caldera para disminuir su temperatura y preparar la mezcla para la etapa de filtración, es necesario resaltar en al igual que la etapa anterior se recomienda operar el tanque a vacío de 3 torr.

Finalmente la corriente enfriada ingresa a un tratamiento para recuperar el adsorbente del aceite, este consiste en una centrifuga la cual retiene el carbón activado dejando pasar la grasa líquida y así obtener el residuo clarificado.

Se debe tener en cuenta que existen más opciones para el blanqueamiento de aceites tales como el tratamiento con ácido fosfórico con secado usando vacío y el uso de soda caustica; a su vez se recomienda operar el tanque de clarificación a vacío lo cual permitirá menores probabilidades de oxidación de la materia prima tratada.

En la tabla 9 se muestra el balance de materia del tanque de agitación de la unidad de decoloración, al cual ingresa una corriente M7 compuesta del aceite desgomado anteriormente, igualmente entra la corriente M8 compuesta por el agente adsorbente, las cuales se mezclan y pasan a una centrifuga por la corriente M9.

Tabla 9. Balance de materia de la unidad de decoloración (Tanque de agitación)

Corriente/ Componente	Entradas		Salida
	M7	M8	M9
Flujo	1209,13	24,57	1233,70
Humedad	0,0169	0	0,0166
AGL	0,1157	0	0,1134
Fosfolípidos	0	0	0
Materia Insaponificable	0,0014	0	0,0014
TGL	0,8520	0	0,8350
Pigmentos	0,0139	0	0,0137
H ₃ PO ₄	0	0	0
H ₂ O	0	0	0
Carbón Activado	0	1	0,0199
Σ Flujos	1233,70		1233,70

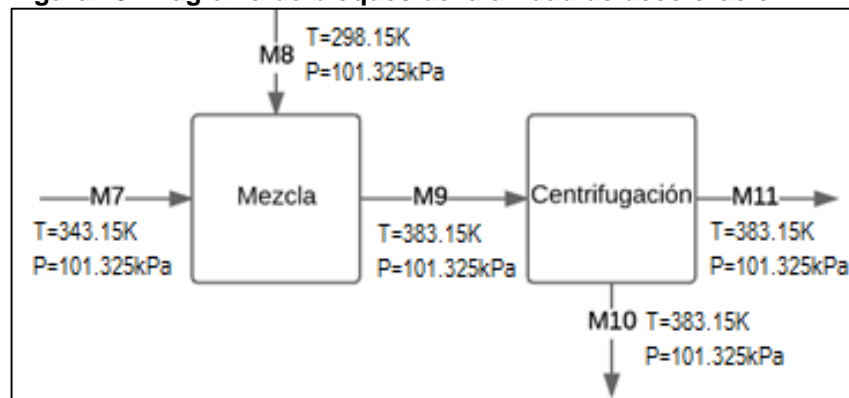
Luego de ingresar la corriente M9 a la centrifuga, se lleva a cabo la separación de los componentes en dos corrientes, la primera (M10) por la cual sale el carbón activado recuperado junto con los pigmentos que contiene el aceite, y la segunda (M11) por la cual sale el aceite decolorado.

Tabla 10. Balance de materia de la unidad de decoloración (Centrifugación)

Corriente/ Componente	Entrada		Salidas
	M9	M10	M11
Flujo	1233,70	41,4373	1192,26
Humedad	0,0166	0	0,0172
AGL	0,1134	0	0,1174
Fosfolípidos	0	0	0
Materia Insaponificable	0,0014	0	0,0014
TGL	0,8350	0	0,8640
Pigmentos	0,0137	0,4071	0
H ₃ PO ₄	0	0	0
H ₂ O	0	0	0
Carbón Activado	0,0199	0,5929	0
Σ Flujos	1233,70	1233,70	

A continuación, se esquematiza el proceso mencionado en el balance de materia, en la figura 13 se evidencia la entrada de las corrientes M7 y M8 al tanque de mezcla, las cuales salen por la corriente M9 directamente a la centrifuga, donde se separa dicha corriente en dos efluentes (M10 y M11).

Figura 13. Diagrama de bloques de la unidad de decoloración



4.1.3 Unidad de destilación o desodorización. Constituye la fase más importante del método de refinación física, esta etapa del proceso busca eliminar compuestos altamente volátiles como los ácidos grasos libres causantes de olores fuertes en el aceite de palma tratado.

La desodorización consiste en un proceso de destilación con vapor de agua y que remueve odorantes a partir de diferencia de puntos de ebullición; esta operación consta de la separación de los compuestos que son más volátiles que los AGL (ácidos grasos libres) de los que son más pesados, correspondientes a los TGL.

En el caso puntual que ocupa a este proyecto las impurezas conforman la fase vapor, en tanto que la fase líquida es el aceite desodorizado. Por lo tanto, para que el problema se pueda entender mejor, la composición del aceite hasta esta parte del proceso, teniendo en cuenta las etapas anteriores, es la siguiente:

Tabla 11. Composición del aceite previo a la etapa de destilación.
Componentes

AGL (Ácidos Grasos Libres)
Humedad (H ₂ O)
Materia Insaponificable
TGL (Triglicéridos)

Como se había resaltado en párrafos anteriores la manera más factible de eliminar sustancias indeseadas del aceite es mediante aumento de temperatura y manejo de presión de forma controlada, para evitar perder propiedades del aceite, es por esto que se utiliza inyección de vapor de agua, lo que permite reducir la temperatura de ebullición de la mezcla siendo más fácil su separación, además de aumentar la presión hasta 20-25 x 10³ torr para remover la totalidad de impurezas volátiles y el exceso de agua.

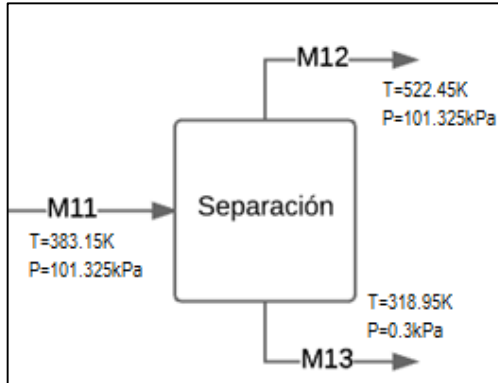
Tabla 12. Balance de materia de la unidad de desodorización.

Corriente/ Componente	Entrada		Salidas
	M11	M12	M13
Flujo	1192,26	161,8992	1030,36
Humedad	0,0172	0,1251	0,0002
AGL	0,1174	0,8642	0
Fosfolípidos	0	0	0
Materia Insaponificable.	0,0014	0,0106	0
TGL	0,8640	0	0,9998
Pigmentos	0	0	0
H ₃ PO ₄	0	0	0
H ₂ O	0	0	0
Carbón activado	0	0	0
Σ Flujos	1192,26	1192,26	

En la etapa de desodorización se realiza un proceso de separación mediante una torre de separación para eliminar los AGL, el contenido de humedad y materia

Insaponificable contenidos en el aceite proveniente de la unidad de blanqueo, el cual sale por los fondos del separador y pasa a la siguiente unidad.

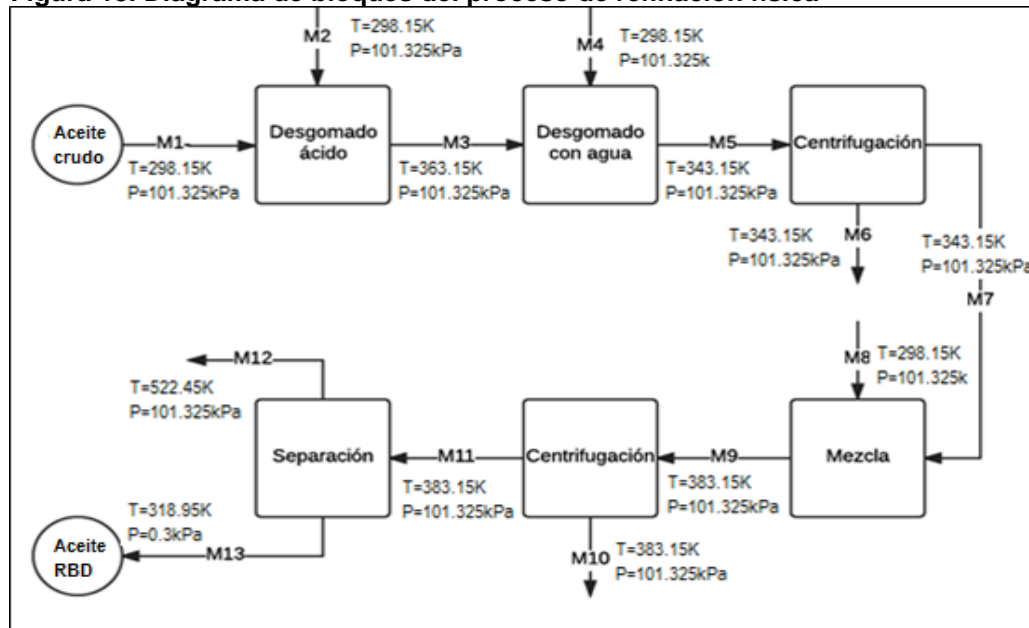
Figura 14. Diagrama de bloques de la unidad de desodorización.



4.2 DIAGRAMA DE BLOQUES

La esquematización del proceso etapa por etapa permite entender de forma más clara el desarrollo de la propuesta, es así, que a partir de la descripción del proceso de la planta piloto se plasmaron cada una de las unidades de operación, diferenciando cada una de las corrientes y efluentes que salen de cada equipo, así como también los productos obtenidos después del tratamiento, dicho esquema se presenta a continuación:

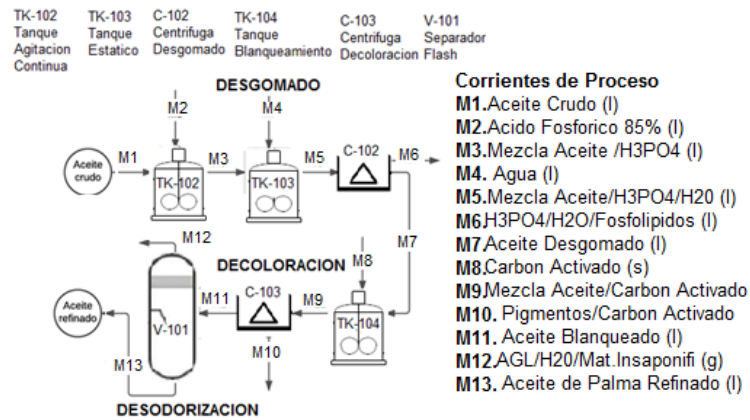
Figura 15. Diagrama de bloques del proceso de refinación física



4.3 DIAGRAMA FLUJO DE PROCESO (PFD)

Teniendo en cuenta el diagrama de bloques planteado, al igual que el balance de materia del capítulo anterior, con cada una de las corrientes generadas, se propone el siguiente diagrama de flujo del proceso de refinación de aceite crudo de palma:

Figura 16. Diagrama PFD de la refinación física



CORRIENTE/ COMPONENTE	UNIDAD DESGOMADO							UNIDAD DECOLORACION				UNIDAD DESODORIZACION	
	M1	M2	M3	M4	M5	M6	M7	M8	M9	M10	M11	M12	M13
Masa Total (g/h)	145.6	1.504	147.104	3.2	150.304	7	143.304	2.912	146.216	4.912	141.304	17.8068	123.4972
Humedad	0.01667	0	0.0164996	0	0.0161483	0	0.0169371	0	0.0165998	0	0.0171768	0.0600137	0.011000249
AGL	0.1138991	0	0.1127346	0	0.1103344	0	0.115724	0	0.1134192	0	0.1173619	0.9313132	0
Fosfolipidos	0.0157692	0	0.015608	0	0.0152757	0.328	0	0	0	0	0	0	0
Mat. Insapon.	0.0014	0	0.0013857	0	0.0013562	0	0.0014224	0	0.0013941	0	0.0014426	0.0086731	0.000400009
TGL	0.8385254	0	0.8299523	0	0.8122824	0	0.8519602	0	0.8349928	0	0.8640187	0	0.988599742
Pigmentos	0.0137363	0	0.0135958	0	0.0133064	0	0.0139563	0	0.0136784	0.4071661	0	0	0
H3PO4	0	1	0.0102241	0	0.0100064	0.2148571	0	0	0	0	0	0	0
H2O	0	0	0	1	0.0212902	0.4571429	0	0	0	0	0	0	0
Carbon Activado	0	0	0	0	0	0	0	1	0.0199157	0.5928339	0	0	0
Σ	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Temperatura(K)	298.15	298.15	363.15	298.15	343.15	343.15	343.15	298.15	383.15	383.15	383.15	522.45	318.95
Presion(kPa)	101.325	101.325	101.325	101.325	101.325	101.325	101.325	101.325	101.325	101.325	101.325	101.325	0.3

4.4 EQUIPOS Y MATERIALES

De acuerdo a las unidades de proceso descritas en el apartado anterior, se expondrán a continuación los equipos y materias primas necesarias en cada una de las etapas. Para esto, se tendrá en cuenta la capacidad de producción de la planta piloto que será de 1350kg/h, como se estipuló para el balance de materia.

A partir del párrafo previo, se realiza el análisis de la densidad del aceite como un factor a tener en cuenta en el equipamiento de la planta, puesto que este parámetro tiene las siguientes implicaciones:

- Cantidad de Aceite: Teniendo en cuenta la densidad del aceite de palma refinado 0.910g/mL el cual es menos denso en comparación con agua⁽¹⁾, permitió realizar el siguiente análisis, un fluido con el valor de densidad manejado en la planta piloto concede la libertad de manejar mayores volúmenes en la capacidad de producción, puesto que, a menor es la densidad del aceite mayor será el volumen producido, además el fluido ocupara menos espacios dentro de las tuberías de la planta y esto permite bombear más residuo crudo vegetal y aumentar la cantidad de producto final.
- Material de los equipos: El valor de la densidad guarda relación directa con el peso específico del aceite crudo de palma, por ende a menor densidad menor es el peso específico del residuo vegetal, en consecuencia no son necesarios materiales altamente resistentes que soporten la cantidad de aceite manejado en la propuesta de la planta piloto debido a que el fluido no es altamente pesado y es una ventaja en materiales menos costosos que se acoplen a los requerimientos del proceso de refinación.
- Geometría de los equipos: Finalmente la densidad es un parámetro que influye en la geometría de los equipos, porque depende de la forma de equipamiento mayor o menor será el volumen contenido, es decir, se buscan geometrías que contenga volúmenes grandes de aceite para aumentar la producción de la planta piloto.

4.4.1 Requerimientos de materias primas y químicos del proceso. El proceso de refinación, en general, no requiere de una gran cantidad de materias primas y por lo que se trata de la obtención de un producto alimenticio el uso de químicos y productos industriales, está restringido por la resolución 2154 de 2012. A continuación, según la etapa que lo necesite, se exponen los insumos requeridos, asimismo la cantidad y especificaciones de cada uno.

- **UNIDAD DE DESGOMADO.** Teniendo en cuenta que la remoción de fosfolípidos se hará mediante el desgomado ácido, se presenta en la tabla 13 las materias primas requeridas y de igual modo la cantidad de estas en referencia a la producción definida anteriormente

Tabla 13. Materias primas para la unidad de desgomado

Materia prima	Cantidad
Aceite crudo de palma	1350 kg
Ácido fosfórico	6.75g (0.5%)
Agua	27g (2%)

- **UNIDAD DE DECOLORACIÓN O BLANQUEO.** Para la eliminación de pigmentos contenidos en el aceite de palma, es necesaria la adición de un agente adsorbente, durante este proyecto se utilizó el carbón activado por los diferentes criterios que se tuvieron en cuenta para su elección anteriormente. Al realizar la experimentación no se obtuvo el blanqueamiento esperado, sin embargo esto se atribuye a la calidad del carbón y la dificultad de filtración del mismo. A continuación en la tabla 14 se muestra la cantidad que se debe agregar de agente adsorbente con relación a la capacidad de producción de la planta piloto.

Tabla 14. Materias primas para la unidad de decoloración o blanqueo.

Materia prima	Cantidad
Aceite desgomado	1350kg
Agente adsorbente	24.57kg (0,2%)

Para obtener un aceite más claro, esta investigación sugiere el uso de sílices o silicatos naturales, pues estos materiales tienen mayor capacidad de adsorción y no sólo de pigmentos sino también de fosfolípidos, jabones y metales, además presenta un coste más bajo que las tierras de blanqueo, debido a que estas necesitan un proceso de activación antes utilizarse en el blanqueamiento.

4.4.2 Lista de equipos. Para cada una de las unidades de proceso que se plantearon anteriormente en la descripción del proceso se definirán los equipos que se van a emplear, los criterios de elección.

UNIDAD DE DESGOMADO

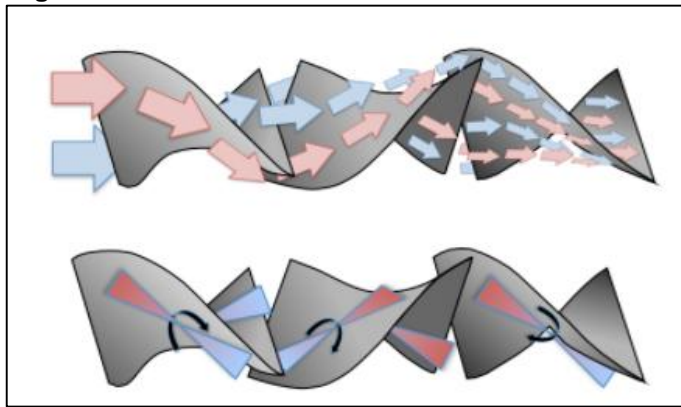
- **Tanque de almacenamiento.** Como se mencionó en el capítulo 2 correspondiente al diagnóstico inicial del aceite crudo de palma, el residuo vegetal a tratar viene de distintas extractoras de la zona del Meta, por esto no se hace necesario un proceso de homogenización previo a la refinación, cabe aclarar que *sólo* se procesará aceite crudo de palma y no se mezclarán aceites de ningún otro tipo, esto en cumplimiento a la resolución 2154 de 2012 y a las especificaciones del proceso descritas en diagrama de bloques y PFD de la planta. Al recibir el residuo, es necesario descargarlo en un tanque de almacenamiento para hacerlo homogéneo y poder comenzar con el proceso.

Los tanques de almacenamiento se dividen en dos tipos, cilíndricos horizontales o cilíndricos verticales de fondo plano, para este acondicionamiento se utilizará un tanque cilíndrico vertical de fondo plano, teniendo en cuenta que se manejará a presión atmosférica en el momento de contener el aceite crudo y que su geometría permite almacenar grandes volúmenes y de un material como acero inoxidable 304 resistente a la corrosión. Además, teniendo en cuenta el estándar A.P.I. 650 en la clasificación de los tanques de acuerdo al tipo de techo, se elige trabajar con uno de techo fijo, por lo que el aceite no se considera un producto volátil y también porque es importante evitar la contaminación de este.

- **Tanque mezclador.** Al igual que el tanque de almacenamiento de la unidad anterior, en este proceso de mezcla entre el aceite y el ácido fosfórico será necesario utilizar un tanque cilíndrico de acero inoxidable 304 resistente a la corrosión que se puede producir por la inclusión de H_3PO_4 al 85%. Además, para realizar el proceso de mezclado es necesario utilizar un implemento de agitación, entre los diferentes tipos de agitadores industriales se encuentran los agitadores de hélice, de paletas y de turbina, en este caso, se ha elegido trabajar con un agitador de turbina, por lo que se evidencia que este es capaz de manejar un amplio rango de viscosidades que permite hasta los 500mPa, además es eficaz en líquidos poco viscosos como el aceite debido a que producen corrientes intensas en todo el tanque evitando el estancamiento del líquido debido a que maneja un flujo radial y tangencial, necesarias en este proceso para mezclar el aceite con el ácido fosfórico y así convertir completamente los fosfolípidos no hidratables.

- **Tanque estático.** Al igual que el tanque anterior se utiliza un tanque cilíndrico de especificaciones Acero Inoxidable tipo 304, a excepción del instrumento de agitación, que en este caso, será estático debido al contacto del agua con el aceite a altas temperaturas. Para este tanque es necesario introducir un mezclador estático AISI 304 que actúa en función de la formación de gomas, haciendo que los fosfolípidos tengan un ligero contacto con el agua y los arrastren para una posterior separación. Los mezcladores estáticos funcionan mediante elementos helicoidales como se muestra en la figura 17, estos dividen la corriente de entrada produciendo una mezcla continua entre los dos fluidos, son ideales para este proceso debido a que estos elementos son muy eficaces en la mezcla de líquidos viscosos.

Figura 17. Mezclador estático.



Fuente: Aplicación de mezclador estático en pozos de crudo pesado¹⁵

- **Centrifuga.** En esta unidad la función de la centrifugación es eliminar las gomas que se forman durante el tratamiento con ácido fosfórico y agua, por esto, se propone el uso de una centrífuga a nivel industrial, estas mantienen el mismo principio de separación gravitacional que las de nivel laboratorio. Los equipos se dividen principalmente en centrifugación-filtración y sedimentación centrífuga, se diferencian por un elemento filtrador y la salida de las dos fases. En este caso, se selecciona una centrífuga de sedimentación por lo que el aceite contiene una baja cantidad de sólidos, pero a su vez, las centrífugas sedimentadoras se dividen en tubulares, de cámara múltiple, de tazón sólido, decantadoras o de discos, se decide comparar en la tabla 15, entre las de tipo tubular y de discos para la toma de decisión.

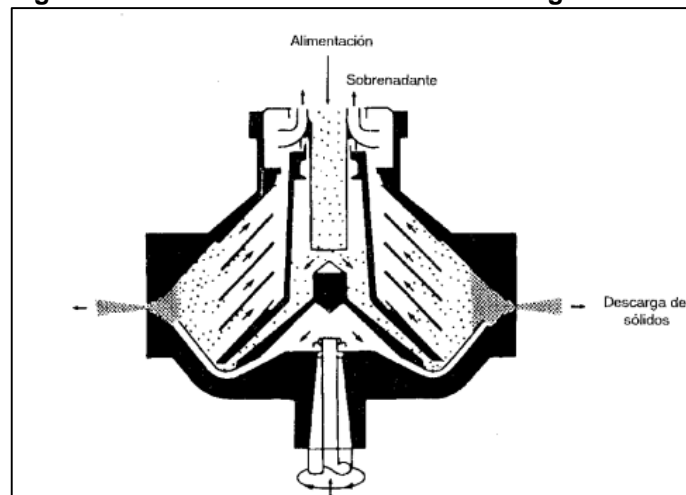
¹⁵ MARFISSI, Steve. Aplicación de mezclador estático en pozos de crudo extrapesado. 2012

Tabla 15. Diferencia entre una centrifuga tubular y una de disco

Centrifuga tubular	Centrífuga de disco
<ul style="list-style-type: none">• Separa partículas hasta de $1\mu m$.• Tiene una velocidad hasta de 15000rpm• Tiene una capacidad entre 500 y 3500 L/h.• Capacidad de sólidos de 2 a Kg por lote.• La torta de sólidos debe ser retirada manualmente.	<ul style="list-style-type: none">• Capacidad de sólidos de 5 a 20 L.• Tiene una capacidad de flujo de 0.4 a 1500 L/min.• Maneja velocidades entre 1600 y 6000rpm.• Maneja suspensiones concentradas.• No existe acumulación de sólidos ni formación de tortas.

Por lo anterior, se elige manejar la sedimentación con una centrifugadora de discos de boquilla con descarga continua al igual que los otros equipos de acero inoxidable, debido a las ventajas que presenta, en especial por la descarga de sólidos la cual no implica detener el equipo ni taponamiento del mismo. En la figura 18 se muestra el funcionamiento de dicho equipo, el cual recibe la alimentación continuamente en el fondo del tazón a través de la parte central de la flecha, y fluye hacia arriba entre las placas hacia la salida en la parte central superior del equipo.

Figura 18. Funcionamiento de una centrifuga de discos.



Fuente: Bioseparaciones, Centrifugación.¹⁶

¹⁶ TEJEDA, A. MONTESINOS, R.M., GUZMAN, R. Centrifugación, En: Bioseparaciones, 2 ed, 2011.p.130.

- **Caldera.** Inicialmente se debe aumentar la temperatura del aceite a 90°C para que la reacción entre el ácido fosfórico y los fosfolípidos ocurran de manera inmediata y así mismo al ponerse en contacto con el agua se formen las gomas y sea fácil su eliminación. A nivel industrial existen diferentes equipos para el intercambio de calor entre fluidos, estos varían según el tipo de fluido a tratar y según las temperaturas que se manejen en el proceso, las calderas son intercambiadores de calor que aportan energía por un proceso de combustión o del paso de un gas, generalmente agua.

Existen diferentes tipos de calderas en la industria, sin embargo, cada una cuenta con diferentes características en su funcionamiento, se clasifican según la disposición de los fluidos en pirotubulares y acuatubulares. Se elige trabajar con una caldera tipo pirotubular, puesto que el funcionamiento será a una presión inferior a los 22 bares, mientras que el otro tipo de calderas manejan presiones mayores, además esta presenta mejores ventajas que la acuatubular con respecto al manejo del agua de alimentación. También se estudió la elección del fluido caloportador, y sabiendo que la temperatura que requiere el aceite es de 90°C se descartan las opciones diferentes al agua caliente. Teniendo en cuenta lo anterior y la capacidad a manejar que será mínimo de 1350kg/h de aceite, se estima que la potencia de la caldera debe ser de 10 BPH.

UNIDAD DE DECOLORACIÓN O BLANQUEO

- **Tanque de agitación continua.** Este tanque de agitación continua contará con las mismas características de los tanques anteriores, será un tanque cilíndrico que utilizará el mismo tipo de agitador de turbina y del mismo material de acero inoxidable AISI 304.
- **Centrifuga.** Para la separación del carbón activado, se utilizará una centrifuga de discos de boquilla con descarga continua con las mismas características a la descrita en la unidad de desgomado, este equipo garantiza que la eliminación de partículas sólidas no bloqueen la corriente de salida, por lo que es ideal para utilizar con otros agentes adsorbentes como las arcillas o tierras blanqueadoras.

UNIDAD DE DESODORIZACIÓN

La unidad de desodorización tiene la finalidad de disminuir la cantidad de ácidos grasos libres (AGL) del aceite para cumplir la norma, pero también, contribuye con la eliminación de la humedad y el contenido de materia Insaponificable en exceso, estos compuestos se separan de los triglicéridos (TGL), que son el componente principal del aceite vegetal. Por lo anterior, se puede inferir que se hace una separación entre AGL y TGL, puesto que las composiciones de agua y materia insaponificable son casi despreciables (0.0172% y 0.0014% respectivamente); además, estos dos últimos tienen una temperatura de ebullición menor en

comparación al ácido palmítico, componente que se encuentra en mayor proporción en los AGL. Por lo anteriormente analizado, los cálculos y la elección del equipo necesario para esta operación sólo tendrán en cuenta la separación de los AGL y TGL.

Esta etapa a nivel laboratorio, se llevó a cabo mediante una destilación por arrastre de vapor, con base en esto, se realiza el proceso para conocer el número de etapas necesarias que requiere el proceso de destilación en un equipo industrial como una torre de separación, así como las dimensiones del equipo (diámetro, altura y área trasversal). Inicialmente, se utilizará la ecuación de Rachford-Rice, con la cual, por medio de un proceso iterativo se calcularán las temperaturas de salida en fondos y el destilado, las cuales están implicadas en el desarrollo para llegar a la ecuación de Fenske (cálculo de etapas mínimas).

Previo a utilizar la ecuación de Rachford-Rice, es necesario saber cómo se calculan las presiones de vapor de los componentes a separar, en este caso para los compuestos grasos, para esto se utiliza la ecuación 1, la cual se basa en el método de contribución de grupos.

Ecuación 1. Logaritmo natural de la presión de vapor

$$\ln P_i^{vp} = \sum_k N_k \left(A_{1k} + \frac{B_{1k}}{T^{1.5}} - C_{1k} \ln T - D_{1k} T \right) + \left[M_i \sum_k N_k \left(A_{2k} + \frac{B_{2k}}{T^{1.5}} - C_{2k} \ln T - D_{2k} T \right) \right] + Q$$

Donde

N_k : Número de grupos k en la molécula

$A_{1k}, B_{1k}, C_{1k}, D_{1k}, A_{2k}, B_{2k}, C_{2k}, D_{2k}$: Parámetros obtenidos a partir de la regresión de datos experimentales.

T: Temperatura (K)

M_i : Peso molecular (g/mol)

K: Grupos del componente i

Q: un término de corrección expresado como:

$$Q = \varepsilon_1 q + \varepsilon_2 \quad \text{Ecuación 2}$$

El término de corrección Q, va relacionado con las siguientes ecuaciones:

$$q = \alpha + \frac{\beta}{T^{1.5}} - \gamma \ln(T) - \delta T \quad \text{Ecuación 3}$$

$$\varepsilon_1 = f_0 + N_c f_1 \quad \text{Ecuación 4}$$

$$\varepsilon_2 = s_0 + N_{cs} s_1 \quad \text{Ecuación 5}$$

Para el uso de la ecuación de la presión de vapor, se debe conocer el número de grupos funcionales que componen a los AGL y los TGL (tabla 16).

Tabla 16. Grupos que componen cada molécula de AGL y TGL

COMPUESTO	F.M.	Nk					
		CH3	CH2	COOH	CH-cis	COO	CH2-CH-CH2
A. Mirístico	C13H27COOH	1	12	1	0	0	0
A. Palmítico	C15H31COOH	1	14	1	0	0	0
A. Estearico	C17H35COOH	1	16	1	0	0	0
A. Oléico	C17H33COOH	1	14	1	2	0	0
A. Linoléico	C17H31COOH	1	12	1	4	0	0
PPP	C51H98O6	3	44	0	0	3	1
PPS	C53H102O6	3	46	0	0	3	1
POP	C53H100O6	3	44	0	0	3	1
POS	C55H104O6	3	44	0	2	3	1
POO	C55H102O6	3	44	0	2	3	1

Una vez definidos los grupos que componen cada molécula de ácidos grasos libres y triglicéridos, se procede con el cálculo de los parámetros que se requieren para las presiones de saturación, para este desarrollo, es necesario aplicar las ecuaciones de la 2 a la 5, con base en la información registrada en la tabla 17 para cada uno de los componentes, abarcando así los AGL y TGL.

Tabla 17. Parámetros para calcular la presión de vapor de compuestos grasos.

Grupo	A _{1k}	B _{1k}	C _{1k}	D _{1k}	A _{2k}	B _{2k}	C _{2k}	D _{2k}
CH ₃	-117,5	7232,3	-22,7939	0,0361	0,00338	-63,3963	-0,0011	0,000015
CH ₂	8,4816	-10987,8	1,4067	-0,00167	-0,00091	6,7157	4,1E-05	-1,3E-06
COOH	8,0734	-20478,3	0,0359	-0,00207	0,00399	-63,9929	-0,0013	0,00001
CH-cis	2,4317	1410,3	0,7868	-0,004	0	0	0	0
CH-trans	1,843	526,5	0,6584	-0,00368	0	0	0	0
COO	7,116	49152,6	2,337	-0,00848	0,00279	10,0396	-0,0003	2,95E-06
OH	28,4723	-16694	3,257	0	0,00485	0	0	0
CH ₂ -CH-CH ₂	688,3	-349293	122,5	-0,1814	-0,00145	0	0	0
Compuesto	f ₀	f ₁	s ₀	s ₁				
Ésteres	0,2773	-0,00444	-0,4476	0,0751				
Acilglicéridos	0	0	0	0				
Ácidos grasos	0,001	0	0	0				
Alcoholes	0,7522	-0,0203	0	0				
q								
	α	B	Γ	Δ				
	3,4443	-499,3	0,6136	-0,00517				

Fuente: Predicting vapor-liquid equilibria of fatty systems

Debido a que la presión de saturación es dependiente de la temperatura, ésta será variable durante el proceso de iteración. Dicho proceso busca minimizar la sumatoria de los valores hallados por ecuación de Rachford-Rice para cada uno de los componentes, la cual está relacionada con el coeficiente de distribución (K_i), que a su vez está en relación con las presiones de saturación:

Ecuación 6. Rachford-Rice

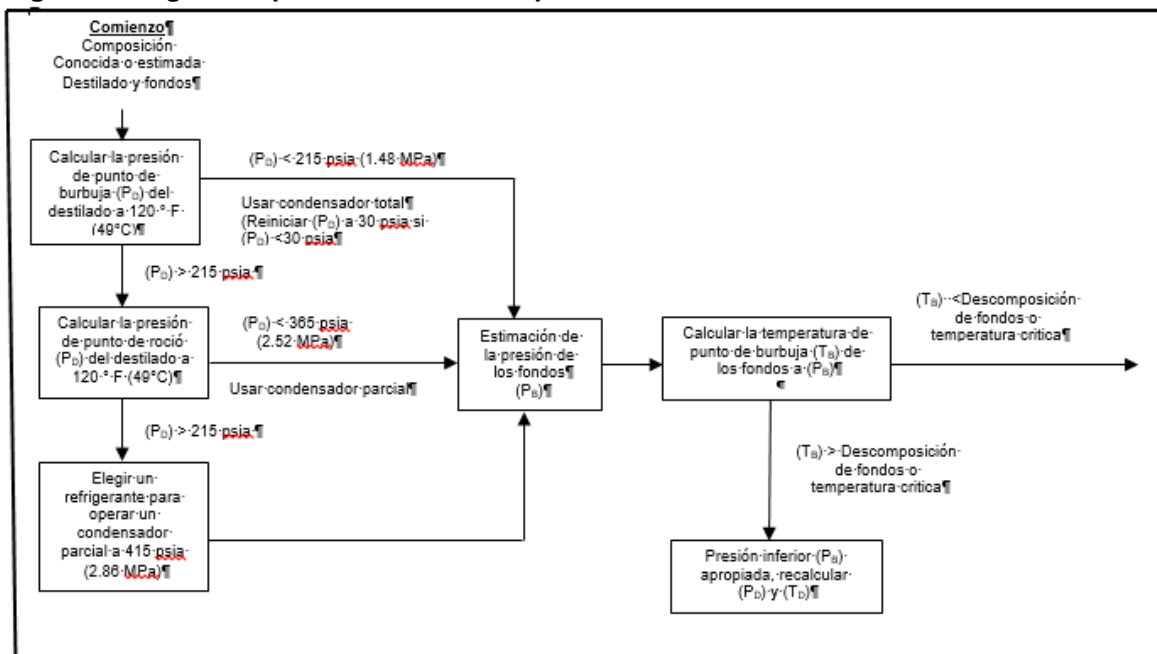
$$\frac{\sum z_i(K_i - 1)}{1 + \varphi(K_i - 1)} = 0$$

Dónde: $K_i = \frac{P_s}{P}$ **Ecuación 7**

Como lo anteriormente nombrado, la temperatura es un factor que influye directamente en la presión del destilado, Por ende, siguiendo el algoritmo de la figura 19, se inicia el proceso iterativo para hallar dicha presión a 49°C, con el fin de conocer el camino para calcular la temperatura de los fondos.

Una vez calculada la presión de destilado, se observa que es menor a 30 psia (tabla 17), lo que indica que la temperatura de los fondos debe ser determinada a 30 psia.

Figura 18. Algoritmo para la establecer la presión de la columna de destilación.



Fuente. Operaciones de separación por etapas de equilibrio en ingeniería química¹⁷.

Tabla 18. Presión de destilado a 49°C

T (K)	322,2
Pd (Pa)	0,00184157

Para calcular la temperatura de fondos se debe estimar una presión de fondos mayor a 30 psia debido a que estas propiedades son proporcionales, lo cual indica que a una mayor presión se tendrá una mayor temperatura¹⁸ que es lo que se requiere en los fondos, para garantizar la eliminación de los ácidos grasos, iterando de nuevo la sumatoria de los valores de los componentes hallados por ecuación de Rachford-Rice, es calculada una temperatura igual a 393,31°C para los fondos, siendo menor que la temperatura crítica (984,98°C)¹⁹ así que se acepta el valor según el algoritmo. De igual manera se calcula la temperatura del destilado, la cual es de 382.74°C.

Finalmente, se procede con el cálculo del número de platos por medio de la ecuación de Fenske, que relaciona las volatilidades (α) de un componente clave

¹⁷ SEADER. J.D., HENLEY.E.J. Operaciones de separación por etapas de equilibrio en ingeniería química. Estados Unidos 1968. 434p

¹⁸ MOLINA MARTINEZ, Myrna, REYES GOMEZ, Ana. Influencia de la presión sobre el punto de ebullición. En: <https://es.scribd.com/doc/73029711/Influencia-de-la-presion-sobre-el-punto-de-ebullicion>

¹⁹ RINCON, Sandra Milena y MARTÍNEZ, Daniel Mauricio. Análisis de las propiedades del aceite de palma en el desarrollo de su industria, Revista Palmas, Vol. 3 No. 2, 2009. 18p

ligero y un componente clave pesado, las cuales para este caso serán del ácido palmítico y del palmito-dioleína respectivamente. Dichas volatilidades, se calculan con base en la ecuación 7 que involucra los coeficientes de distribución calculados a las condiciones de los fondos y el destilado registrados en la tabla 19.

Tabla 19. Coeficientes de distribución para los compuestos claves.

Compuesto	K _d	K _b
LK (Acido palmítico)	0.906	0.8722
HK (Palmito-dioleína)	0.0067	0.0111

$$\alpha_{ij} = \frac{k_i}{k_j} \text{ Ecuación 8}$$

Con las volatilidades calculadas para los componentes claves, se tienen completos los parámetros requeridos para el uso de la ecuación de Fenske (ecuación 8).

Ecuación 9. Ecuación de Fenske para N_{mín}

$$N_{\min} = \frac{\log \left[\left(\frac{x_{LK,l}}{x_{LK,n}} \right) \left(\frac{x_{HK,n}}{x_{HK,l}} \right) \right]}{\log(\alpha_{LK} - \alpha_{HK})_m}$$

Dónde:

$$(\alpha_{LK-HK})_m = [(\alpha_{LK-HK})_l (\alpha_{LK-HK})_n]^{1/2} \text{ Ecuación 10}$$

l: destilado de la torre

n: fondos de la torre

X_{LK}: Composición del componente clave ligero.

X_{HK}: Composición del componente clave pesado.

En la tabla 20, se reflejan los valores de las volatilidades de los componentes clave ligero y pesado tanto en los fondos como en el destilado.

Tabla 20. Volatilidades en el destilado y fondos

α _{LK-HK, l}	136,305761
α _{LK-HK, n}	78,2527947
α _{LK-HK, m}	103,277813
N _{min}	0,61808799

Finalmente, se obtiene la cantidad mínima de platos ($N_{\min}=0,61$) para la separación, que según los criterios de diseño para equipos de separación, indican que si la cantidad mínima de platos es menor a 1 no se precisa una etapa para que involucre un equipo de destilación, por lo cual se propone utilizar un separador flash con inyección de vapor para el desarrollo del desodorizado en un material de Acero Inoxidable AISI 304 debido a su resistencia a altas temperaturas entre .2550- 2650°F.

4.4.2.1 Requerimientos generales de los equipos. En esta parte del proyecto, se tendrá en cuenta el dimensionamiento de los equipos que lo requieran, así como el material y las especificaciones relacionadas a cada uno de estos.

TANQUE DE ALMACENAMIENTO

- **Tanque de almacenamiento.** Para los tanques, tanto el de almacenamiento como los de mezclado, se realizará el cálculo de las dimensiones mínimas requeridas bajo la misma relación de altura/diámetro²⁰:

Este tanque solo servirá para el almacenamiento y la homogeneización del aceite crudo, por lo tanto, sólo se tiene en cuenta el volumen de alimentación al proceso que será de 1225L y el factor de seguridad tomado de la literatura.

$$V_{\text{tanque}} = V_{\text{entrada}} * \text{Factor de Seguridad}$$

$$V_{\text{tanque}} = 1350 \text{ L} * (1.20)$$

$$V_{\text{tanque}} = 1620 \text{ L}$$

$$V_{\text{tanque}} = 1.62 \text{ m}^3$$

Así pues, se procede con el cálculo del diámetro necesario para el tanque:

$$\text{Relación} = \frac{h}{D} = 1.5$$

$$V_{\text{tanque}} = \frac{\pi}{4} * D^2 * h$$

$$V_{\text{tanque}} = \frac{\pi}{4} * D^2 * 1.5 D$$

$$1.62 \text{ m}^3 = \frac{1.5 \pi}{4} * D^3$$

$$\sqrt[3]{\frac{4 * 1.62 \text{ m}^3}{1.5 \pi}} = D = 1.172 \text{ m}$$

²⁰ ROMERO ROJAS. Jairo. Alberto. Tratamiento de Aguas Residuales Teoría y Principios de Diseño. Editorial escuela Colombiana de Ingeniería. 1999. Página 1232

Y finalmente, con el diámetro, se despeja la altura de la relación altura/diámetro, y se calcula esta dimensión:

$$\frac{h}{D} = 1.5$$

$$\frac{h}{1.172m} = 1.5$$

$$h = 1.5 * 1.172 m$$

$$h = 1.759m$$

UNIDAD DE DESGOMADO

- **Tanque mezclador.** Las dimensiones de este tanque se calculan igual que el tanque de almacenamiento de la unidad anterior, a excepción de que a este equipo se incorpora el ácido fosfórico para el desgomado además del aceite pre-tratado. Por lo cual, se tiene en cuenta el volumen que se agrega de ambos compuesto, el cual se observa en la tabla 21.

Tabla 21. Cantidad de alimentación al tanque mezclador

Materia prima	Cantidad
Aceite crudo de palma	1350 L
Ácido fosfórico	12.69 L (0,5%)

$$V \text{ tanque} = V \text{ total} * \text{Factor de Seguridad}$$

$$V \text{ tanque} = 1362.69 L * (1.20)$$

$$V \text{ tanque} = 1635.228 L$$

$$V \text{ tanque} = 1.6352m^3$$

Por ende, el dimensionamiento será:

$$\text{Relación} = \frac{h}{D} = 1.5$$

$$V \text{ tanque} = \frac{\pi}{4} * D^2 * h$$

$$V \text{ tanque} = \frac{\pi}{4} * D^2 * 1.5 D$$

$$1.6352 \text{ m}^3 = \frac{1.5 \pi}{4} * D^3$$

$$\sqrt[3]{\frac{4 * 1.6352 \text{ m}^3}{1.5 \pi}} = D = 1.1781 \text{ m}$$

Con el valor del diámetro hallado y la relación altura/diámetro, puede ser encontrada la altura del tanque de la siguiente manera:

$$\frac{h}{D} = 1.5$$

$$\frac{h}{1.1781 \text{ m}} = 1.5$$

$$h = 1.5 * 1.1781 \text{ m}$$

$$h = 1.7672 \text{ m}$$

- **Tanque estático.** Al igual que el tanque anterior se calculan las dimensiones (volumen, diámetro y altura), teniendo en cuenta la alimentación del aceite proveniente con ácido fosfórico y la adición de agua que se hace en este punto para desgomar (ver tabla 22).

Tabla 22. Cantidad de alimentación al tanque estático.

Materia prima	Cantidad
Aceite crudo de palma	1350 L
Ácido fosfórico	12.69 L (0,5%)
Agua	27 L (2%)

$$V \text{ tanque} = V \text{ total} * \text{Factor de Seguridad}$$

$$V \text{ tanque} = 1389.69 \text{ L} * (1.20)$$

$$V \text{ tanque} = 1667.628 \text{ L}$$

$$V \text{ tanque} = 1.6676 \text{ m}^3$$

Teniendo en cuenta el valor del volumen y la geometría de un cilindro, se calcula el diámetro del tanque:

$$\text{Relación} = \frac{h}{D} = 1.5$$

$$V \text{ tanque} = \frac{\pi}{4} * D^2 * h$$

$$V \text{ tanque} = \frac{\pi}{4} * D^2 * 1.5 D$$

$$1.6676 \text{ m}^3 = \frac{1.5 \pi}{4} * D^3$$

$$\sqrt[3]{\frac{4 * 1.6676 \text{ m}^3}{1.5 \pi}} = D = 1.1897 \text{ m}$$

Luego, se calcula la altura del tanque con el uso de la relación altura/diámetro:

$$\frac{h}{D} = 1.5$$

$$\frac{h}{1.1309 \text{ m}} = 1.5$$

$$h = 1.5 * 1.1897 \text{ m}$$

$$h = 1.7846 \text{ m}$$

UNIDAD DE DECOLORACIÓN O BLANQUEO

- **Tanque de agitación continua.** En este tanque se pone en contacto el carbón activado o tierras blanqueadoras para llevar a cabo la adsorción de los pigmentos, por esto, se tiene en cuenta el volumen que debe agregarse respecto a la cantidad de aceite entrante.

$$V \text{ tanque} = V \text{ total} * \text{Factor de Seguridad}$$

$$V \text{ tanque} = 1374.57 \text{ L} * (1.20)$$

$$V \text{ tanque} = 1649.484 \text{ L}$$

$$V \text{ tanque} = 1.6494 \text{ m}^3$$

$$\text{Relación} = \frac{h}{D} = 1.5$$

$$V \text{ tanque} = \frac{\pi}{4} * D^2 * h$$

$$V \text{ tanque} = \frac{\pi}{4} * D^2 * 1.5 D$$

$$1.6494 \text{ m}^3 = \frac{1.5 \pi}{4} * D^3$$

$$\sqrt[3]{\frac{4 * 1.6494 \text{ m}^3}{1.5 \pi}} = D = 1.1833 \text{ m}$$

Calculado el valor del diámetro y con base en la relación altura/diámetro, se calcula la altura mínima requerida para el tanque:

$$\frac{h}{D} = 1.5$$

$$\frac{h}{1,1833 \text{ m}} = 1.5$$

$$h = 1,5 * 1.1833 \text{ m}$$

$$h = 1.7749 \text{ m}$$

UNIDAD DE DESODORIZACIÓN

- **Separador flash.** Una vez seleccionado el tipo de separador a utilizar, el siguiente paso es calcular las dimensiones que debe tener el equipo. Para determinar el área y el diámetro de la unidad, es necesario hallar la velocidad permisible de vapor²¹ con las composiciones y flujos de vapor determinados anteriormente.

$$u_{perm} = k_{tamb} \sqrt{\frac{\rho_L - \rho_V}{\rho_V}} \quad \text{Ecuación 11}$$

La densidad del líquido, fue la suministrada por el análisis fisicoquímico realizado al final del proceso de refinación, y la densidad del vapor, tuvo que ser calculada por medio del peso molecular promedio y la ecuación de estado para gases ideales debido que trabaja a bajas presiones y altas temperaturas²².

$$\rho = \frac{PM.P}{RT} \quad \text{Ecuación 12}$$

²¹ WANKAT. C. Phillip. Ingeniería de procesos de separación, 2 ed. México. Pearson, 2008, 45p.

²² BLANCO RODRÍGUEZ, Pilar. Diseño de una planta de refinación de aceites vegetales. Proyecto de fin de carrera de ingeniería química. Cádiz, España. Universidad de Cádiz. Facultad de ciencias, 2007. 163 p.

Tabla 23. Condiciones de operación para calcular la densidad del vapor

T operación.(K)	533
P operación.(Pa)	0.3
R (LkPa/K mol)	8.314

Con base en la ecuación la ecuación 12 y en las condiciones de la tabla 23 además de mencionar que el proceso se lleva a cabo de manera continua puesto que están ingresando constantemente aceite crudo de palma para aumentar la capacidad de producción de la planta, se halla la densidad del vapor, la cual arroja un valor de 0,0182 g/ml.

Teniendo las densidades de líquido y vapor, solo falta realizar el cálculo de K_{tamb} , la cual se halla por medio de las constantes encontradas en el mismo libro, y un parámetro denominado (F_{lv}) que relaciona los flujos de líquido y vapor con sus respectivas densidades como en la ecuación 13.

$$F_{lv} = \frac{W_L}{W_V} \sqrt{\frac{\rho_V}{\rho_L}} \quad \text{Ecuación 13}$$

Dónde:

W_V : Flujo de vapor.

W_L : Flujo de líquido.

ρ_V : Densidad de vapor.

ρ_L : Densidad de líquido.

$$k_{tamb} = \exp[A + B \ln F_{lv} + C (\ln F_{lv})^2 + D (\ln F_{lv})^3 + E (\ln F_{lv})^4] \quad \text{Ecuación 14}$$

Tabla 24. Constantes para calcular la constante K_{tamb} .

A	-1,877478097
B	-0,81458046
C	-0,187074409
D	-0,014522867
E	-0,001014852

Fuente. Ingeniería de procesos de separación

Teniendo las constantes y el F_{lv} (0,0141), se procede con el cálculo de la constante (K_{tamb}), cuyo valor es de 0,3623 ft/s; el cual es usado en la ecuación 13

para encontrar la velocidad permisible de vapor (U_{perm}) que con el desarrollo de la ecuación anteriormente nombrada arroja un valor de 18040,3763ft/s.

Con el cálculo de la velocidad permisible, se encuentra el área transversal por medio de la ecuación 15.

$$Ac = \frac{(V).(PMV)}{(U_{perm}).(3600)(\rho v)} \quad \text{Ecuación 15}$$

El valor de Ac encontrado con el desarrollo de la ecuación 15 es de 123,058ft². Como último paso, se utiliza el valor obtenido de la velocidad permisible en la ecuación 16 para encontrar el diámetro mínimo que debe tener el separador flash vertical.

$$D = \sqrt{\frac{4.Ac}{\pi}} \quad \text{Ecuación 16}$$

El valor encontrado es 12,52ft para el diámetro mínimo que debe tener el separador, cuyo equivalente en metros es de 3,82m.

La relación altura/diámetro que debe ser usada en esta torre vertical es igual a 3, se usa esta relación con el fin de disminuir costos del equipo²³; dado lo anterior, por medio de la ecuación 17 se halla la altura del separador.

$$\frac{h}{D} = 3 \quad \text{Ecuación 17}$$

$$h = 3,82m * 3 = 11,446m$$

Dado lo anterior, se tiene que las dimensiones del separador serán de 3,82m de diámetro por 11,446m de altura; cabe aclarar que este método contempla un valor de inundación del 80% con el fin de favorecer la separación, lo que implica que el volumen sea alto.

En la tabla 25, se relacionan los valores obtenidos y las condiciones de operación del proceso de destilación en el flash.

Tabla 25. Dimensiones del separador y condiciones del proceso

CONDICIONES DE OPERACIÓN		DIMENSIONES DEL SEPARADOR	
T_{operación} (K)	533	D (m)	3.82
P_{operación} (Pa)	0.3	h (m)	11.446

²³ WANKAT. C. Phillip. Ingeniería de procesos de separación, 2 ed. México. Pearson, 2008, 46p.

AREA REQUERIDA PARA LA PLANTA PILOTO

Para el diseño propuesto anteriormente, en el cual se incluyen los equipos básicos, es necesario disponer un área determinada, esta se calculó mediante el área calculada para cada equipo, que se muestra a continuación en la tabla 26:

Tabla 26. Área de equipo y total de la planta piloto

Equipo	Área (m²)
Tanque de almacenamiento	8.634
Tanque de agitación (TK-102)	8.721
Tanque de agitación (TK-103)	8.893
Tanque de agitación (TK-104)	8.797
Separador flash (V-101)	11.43
Centrifugas (x2)	12
Área total	58.48

El cálculo del área total se aproxima a 60m² necesarios para la instalación de dichos equipos, debido a que el diseño conceptual comprende solamente la primera parte del diseño se debe estimar un rango de ± 12 m² que representan el rango de error del 30% contemplado desde el comienzo del proyecto.

5. COSTOS DEL DISEÑO CONCEPTUAL DE LA PLANTA PILOTO PROPUESTO PARA LA REFINACIÓN FÍSICA

De acuerdo al diagrama de flujo de proceso de la refinación física, se seleccionaron los equipos que requiere cada etapa del proceso, con base a dicha información en el presente capítulo se realizará un estimativo de los costos que implicaría la implementación de la propuesta planteada, en el cual se contemplan las materias primas y los equipos propuestos para cada unidad.

5.1 ESTIMATIVO DE COSTOS

A continuación se muestran los costos de los equipos según la unidad de proceso distinguida en los capítulos anteriores, así mismo las materias primas solamente en las etapas que sean requeridas.

- **UNIDAD DE DESGOMADO.** Para la etapa de desgomado del aceite crudo de palma, se observa un requerimiento de cuatro equipos de proceso, en los que se encuentran dos tanques uno con sistema de agitación continua y el otro con agitación estática, además de una caldera para aumentar la temperatura del aceite y una centrifuga para separación, esta última requerida en la unidad de proceso anterior, por lo cual se registra el mismo costo, detalladamente se relacionan cada uno de los costos de los equipos nombrados en la tabla 27:

Tabla 27. Costos de la unidad de desgomado.

Equipo	Costo
Caldera pirotubular	\$36.000.000
Tanque de agitación continua	\$13.000.000
Tanque estático	\$14.500.000
Centrífuga	\$18.000.000
TOTAL	\$51.000.000

A partir de los parámetros de diseño y selección de dichos equipos desarrollado en el capítulo 5, se calculó el estimativo económico tomando como base los costos de empresas encargadas en el equipamiento industrial como VR Ingeniería, Colmaquinas, Equitecnos y EQUIPROCESS, las cuales proveen soluciones en fabricación de equipos y constituyen una segunda inversión \$51.000.000.

Además de lo anterior en la fase de desgomado del aceite se requieren las siguientes materias primas:

Tabla 28. Costos de materias primas para la unidad de desgomado

Materia prima	Cantidad	Costo
Aceite crudo de palma	1350 kg	N.A.
Ácido fosfórico (85 %)	6.75g (0,5%)	\$720.500
Agua	27g (2%)	N.A.

Tomando como base la empresa elementos químicos LTDA., se cotizó el reactivo (Ácido fosfórico 85%) necesario para el desgomado, añadiendo una inversión de \$720.500 para continuar con la ejecución de la planta piloto.

- **UNIDAD DE BLANQUEAMIENTO.** Para el proceso de blanqueamiento se hace necesaria la implementación de un tanque de agitación continua en el cual se pondrá en contacto al agente adsorbente de pigmentos, además de una centrifuga para el proceso de separación de dicho agente, por lo cual se relacionan los costos de estos equipos en la tabla 29:

Tabla 29. Costos de la unidad de blanqueamiento.

Equipo	Costo
Tanque de agitación continua	\$13.000.000
Centrífuga	\$18.000.000
TOTAL	\$31.000.000

Teniendo en cuenta la información de costos de los proveedores de equipos en la etapa anterior, se registraron los valores indagados anteriormente, obteniendo un costo total de la unidad de blanqueamiento de \$31.000.000 de pesos.

En este proceso también se requiere calcular el costo de una materia prima, la cual es el agente adsorbente, específicamente el carbón activado, para el cual se evaluaron diferentes cotizaciones y se tomó la más económica:

Tabla 30. Materias primas para la unidad de decoloración o blanqueo.

Materia prima	Cantidad	Costo
Aceite desgomado	1209kg	N.A.
Agente adsorbente (Carbón Activado)	24.57g (0.2%)	\$561.834

La empresa Elementos químicos LTDA. Presentó una cotización del carbón activado de \$561.834 pesos, valor que se suma a los costos de los equipos, dando así un total de \$31561834 pesos para implementar la unidad decoloración.

- **UNIDAD DE DESODORIZACIÓN.** En la etapa de desodorización se requiere de un separador flash, el cual constituye la inversión económica más alta dentro del proyecto y se muestra en la tabla 31 de la siguiente forma:

Tabla 31. Costos de la unidad de desodorización.

Especificación de equipo	Costo
Unidad de Desodorizacion (Separador Flash)	
Volumen: 65,42m ³	\$30.000.000
Diámetro3,81m	
Área:11,43m ²	
TOTAL	\$30.000.000

Debido a que la unidad de desodorización es en la cual se produce la separación de los ácidos grasos libres se afirma que es la etapa fundamental de la refinación física, debido a esto requiere un equipo especial para el proceso, el cual a nivel industrial se fabrica según su dimensionamiento y requerimientos de operación, en este caso, se obtuvo un valor correspondiente a \$30.000.000 aproximados.

Además de los costos por equipos e insumos requeridos, se hace un estimativo del costo comprendido por el área mínima requerida, teniendo en cuenta que las plantas extractoras de aceite de palma se encuentran en la zona de los llanos, se determinó con los socios interesados en el proyectos ubicar la planta piloto en la zona industrial de Villavicencio, con base a esto y el área mínima calculada se estima que el costo aproximado es de \$ 29'329.268 millones de pesos.

Finalmente, de acuerdo al estimativo total de costo de cada uno de los equipos, materias primas y área mínima requerida, la totalidad de dinero para dar ejecución a la propuesta planteada corresponde a un valor de \$ 173.111.602. Cabe aclarar que los costos estimados por el presente proyecto están sujetos a cambios por indicaciones de las diferentes empresas.

6. CONCLUSIONES

- Según los resultados de la caracterización realizada por medio de las propiedades fisicoquímicas tales como la humedad, índice de acidez, índice de yodo, índice de peróxidos, índice de saponificación, índice de refracción y contenido de materia Insaponificable, se evidencia que los aceites crudos deben ser sometidos a procesos de refinación luego de su extracción, debido a que no salen con las condiciones adecuadas para su consumo, además a partir de dichas propiedades es posible afirmar que el mayor enemigo del aceite es el oxígeno, el cual está directamente relacionado con el deterioro de dicho alimento.
- Para la selección del método de refinación de un aceite, las dos propiedades más importantes a tener en cuenta, son el índice de acidez y la cantidad de materia Insaponificable presente. En este caso, el proceso seleccionado, es decir, la refinación física, consistió en 3 etapas: desgomado, blanqueo y desodorización.
- Se planteó el diseño conceptual de la planta piloto para la refinación de aceite crudo de palma, adecuada para una producción mínima de 1030kg/h, teniendo en cuenta el porcentaje de pérdidas equivalente a 16.8%. Se escogieron los equipos generales tales como los tanques de almacenamiento y agitación, centrifugas y un separador flash, del cual se pretende separar el 99% de los ácidos grasos presentes en el aceite.
- De acuerdo al estimativo total de costo del diseño presentado, teniendo en cuenta los equipos y materias primas, la totalidad de dinero necesario para ejecutar la propuesta planteada corresponde a un valor de \$ 173.111.602.

7. RECOMENDACIONES

De acuerdo a la propuesta de diseño presentada y con el objetivo que exista mejora continua en el proceso, se recomienda:

- En la etapa de blanqueamiento del aceite crudo de palma evaluar el comportamiento del aceite con el uso del 2% (3 g) de tierras filtrantes o sílices como material adsorbente para retener una mayor cantidad de pigmentos y carotenos mejorando así el aspecto del producto vegetal y así comparar los resultados de la etapa de decoloración.
- Operar el tanque de agitación continua en la etapa de decoloración con presión de vacío de 2-3 torr y con temperatura de 125°C para disminuir el tiempo de residencia y aumentar eficiencia de la unidad de proceso.
- Evaluar cambios en el separador flash como la operación a mayor presión de vacío de 20-25 x 10³ torr o la inyección de vapor de agua para incrementar la eficiencia del desodorizador.
- Plantear un manejo adecuado del almacenamiento del residuo graso por medio de tanques de acero inoxidable sin exposición a la luz, con control de gradiente de temperatura (6-10°C) y fácil limpieza, para disminuir o evitar por completo el contacto del aceite con el oxígeno controlando así su grado de deterioro y permitiendo un mejor resultado de la refinación.
- Estudiar y plantear un diseño de distribución de planta para la implementación del diseño conceptual, además de definir los lazos de control teniendo en cuenta el diagrama de flujo del proceso (PFD) que se planteó para el control de variables del tratamiento.
- Realizar y analizar el perfil lipídico del aceite crudo de palma para proveer un complemento anexo del proceso de caracterización inicial y final del residuo graso vegetal en el proceso de refinación.

BIBLIOGRAFÍA

AGROCADENAS, La cadena de oleaginosas aceites y grasas. Bogotá. Ministerio de agricultura y desarrollo rural. Observatorio de competitividad, 2001.

AMADO DÍAZ, María Antonia. Seguimiento a las pérdidas de fitonutrientes durante el proceso de refinación del aceite de palma. Trabajo de grado Especialista en ciencia y tecnología de alimentos. Bogotá D.C. Universidad nacional de Colombia. Departamento de ingeniería química y ambiental, 2010.

BLANCO RODRÍGUEZ, Pilar. Diseño de una planta de refinación de aceites vegetales. Proyecto de fin de carrera de ingeniería química. Cádiz, España. Universidad de Cádiz. Facultad de ciencias, 2007.

BLÁZQUEZ, Daniel y DEL OLIVIO, Marta. Fabricación de aceites y grasas vegetales y animales, Manual de eficiencia energética para pymes. Gas natural Fenosa.

HERNÁNDEZ AMAYA, Luz Helena. Tecnología de oleaginosas. Sogamoso. Universidad nacional abierta y a distancia. Programa de ingeniería de alimentos, 2014.

INSTITUTO COLOMBIANO DE NORMAS TÉCNICAS Y DE CERTIFICACIÓN. Documentación. Presentación de tesis, trabajos de grado y otros trabajos de investigación. NTC 1486. Sexta actualización. Bogotá. El instituto, 2008. 110 p.

-----Referencias bibliográficas, contenido, forma y estructura. NTC 4490. Bogotá: El Instituto, 1998. 12 p.

-----Referencias documentales para fuentes de informaciones electrónicas. NTC 5613. bogota: El Instituto, 1998. 8 p

Laborbedarf Bochem. Lab supply,[Página web][Citado el 18 de Julio de 2017]
Disponible en:
<http://www.bochem.com/es/Informaci%C3%B3n+%C3%BAtil/Tipos+de+agitadores.html>

MARFISSI, Steve. Aplicación de mezclador estático en pozos de crudo extrapesado. 2012

MESA DISHINGTON, Jens. La agroindustria de la palma de aceite en Colombia. [diapositivas] Bogotá D.C. Fedepalma, 2013. 53 diapositivas.

MESA DISHINGTON, Jens. La agroindustria de la palma de aceite en Colombia. [diapositivas] Bogotá D.C. Fedepalma, 2013. 53 diapositivas.

MOLINA MARTINEZ, Myrna, REYES GOMEZ, Ana. Influencia de la presión sobre el punto de ebullición. Disponible en: <https://es.scribd.com/doc/73029711/Influencia-de-la-presion-sobre-el-punto-de-ebullicion>.

ONNOPHOS, [Hoja de seguridad de materiales], Hoja de seguridad del ácido fosfórico, 2010.

QUESADA HERRERA, German. Cultivo e industria de la palma, palma aceitera. Costa rica. Ministerios de agricultura y ganadería, Dirección de investigadores.

RINCON, Sandra Milena y MARTÍNEZ, Daniel Mauricio. Análisis de las propiedades del aceite de palma en el desarrollo de su industria, Revista palmas, Vol. 3 No. 2, 2009. 18p

ROMERO ROJAS. Jairo. Alberto. Tratamiento de Aguas Residuales Teoría y Principios de Diseño. Editorial escuela Colombiana de Ingeniería. 1999.

SEADER. J.D., HENLEY.E.J. Operaciones de separación por etapas de equilibrio en ingeniería química. Estados Unidos, 1968. 434p

TEJEDA, A. MONTESINOS, R. M., GUZMAN, R. Centrifugación, En: Bioseparaciones, 2 ed, 2011.p.130.

Universidad de Córdoba, Prácticas de laboratorio. Grado de ingeniería agroalimentaria y del medio rural, Córdoba, 2013.

WANKAT. C. Phillip. Ingeniería de procesos de separación, 2 ed. México. Pearson, 2008.

ANEXOS

A|NEXO A

(CARACTERIZACIÓN INICIAL DEL ACEITE DE PALMA)



CERTIFICADO DE ANALISIS MATERIA PRIMA
COLOMPACK S.A (COMÚN)

CARRERA 46 # 20B-32
PBX: 3691253-7456887
BOGOTÁ COLOMBIA

N° Parte 0425 /17

Artículo: Aceite crudo de palma	Orden de compra: NA
N° de Lote: Feb2017-2	Consecutivo Interno: NA
Proveedor: ND	País Origen: ND
Fabricante: ND	Fecha Fabricación: feb-17
Fecha entrada: 20/02/2017	Fecha Vencimiento: ND
	Fecha Re análisis: N.A
Ciente: Richard Alexander Mallama Díaz	C.C. 1.010.212.148 de Bogotá
Cantidad recibida: 1,7 litros	Tamaño de la muestra: 1,7 litros
Cantidad aprobada: NA	Cantidad Rechazada: NA
Cantidad Cuarentena: NA	Fecha Emisión : 09/03/2017

Ensayo	Especificación	Método	Resultado	Concepto
Descripción	Informativa	COLOMPACK	Líquido de color amarillo rojizo. Libre de partículas extrañas.	Cumple
pH	Informativa	COLOMPACK	4,6	Cumple
Densidad (25°C) g/mL	Informativa	COLOMPACK	0,910 g/mL 25°C	Cumple
Viscosidad (25°C) cPs	Informativa	COLOMPACK	107,2 cPs 25°C	Cumple
% Humedad (Contenido de agua por Karl Fischer)	Informativa	COLOMPACK	1,667%	Cumple
Acidez titulable (Índice de acidez) (mg KOH/g de aceite)	Informativa	COLOMPACK	6,30mg KOH/g de aceite	Cumple
Índice de Yodo	Informativa	COLOMPACK	14,36	Cumple
Índice de peróxidos (meq O ₂ /1000 g de aceite)	Informativa	COLOMPACK	607,48 meq O ₂ /1000g de aceite	Cumple
Índice de saponificación (mg KOH/g de aceite)	Informativa	COLOMPACK	247,65 mg KOG/g de aceite	Cumple
% Contenido de materia insaponificable	Informativa	COLOMPACK	0,14%	Cumple

DESCRIPCIÓN DE DEFECTOS		
Defecto	Cantidad	Decisión
NA	NA	NA

Análisis válido para la muestra analizada

Sólo se puede realizar reproducción parcial o total del documento previa autorización de Colompack S.A.

APROBADO

RECHAZADO

Anexos: Certificado de proveedor y hoja de datos primarios.

J. Hernández
Analizado

E. Estreps
Revisado

D. Cordero
Aprobado

Elaborado por / Fecha: J. Díaz / ELO 09-03-17

Fecha de emisión: 10-16 Próxima revisión: 10-18

LPLAP002-F1V03

COLORMPACK

HOJA DE DATOS PARA ENSAYOS FISICOQUIMICOS

Fecha: 06-03-17 Nombre: Acido Citrico de Polvora Lote: JTA Feb 2017-2

Descripción: Líquido de color amarillo rojizo cuerdos
partículas extrañas

1. Pérdida por: Secado Incineración
 Peso recipiente vacío (PRV): _____
 Peso recipiente + muestra (PRM): _____
 Peso muestra (PM): _____
 Peso recipiente + mtra seca (PMS): _____
RESULTADO (%): _____
 Estufa: _____ Fecha Cal: _____

$$\% \text{ pérdida por secado} = 100 - \frac{PMS - PRV}{PM} * 100$$
 Realizado: _____ Fecha: _____
 Verificado: _____ Fecha: _____

3. Densidad:
 Temperatura: 25.2
 PIC vacío (PV): 16.2551 g
 PIC + Muestra (PM): 22.1723 g
 PIC + Agua (PA): 22.9026 g
RESULTADO: 0.910 g/ml ✓
 Balanza: 2 Fecha Cal: 03-16

$$\text{Densidad} = \frac{PM - PV}{PA - PV} * 1 \text{mg/ml}$$
 Realizado: J. Hernandez Fecha: 06-03-17
 Verificado: E. Restrepo Fecha: 08-03-17

2. Residuo de incineración:
 Peso crisol Vacío (PCV): _____
 Peso crisol + muestra: _____
 Peso muestra (PM): _____
 Peso crisol + residuo (PCR): _____
RESULTADO (%): _____
 Mufla: _____ Fecha Cal: _____

$$\text{Residuo incineración} = \frac{PCR - PCV}{PM} * 100$$
 Realizado: _____ Fecha: _____
 Verificado: _____ Fecha: _____

4. Viscosidad:
 Aguja: 07 T°: 28° RPM: 100
RESULTADO: 107.2
 Viscosímetro: _____ Fecha Cal: _____
 Realizado: J. Hernandez Fecha: 06-03-17
 Verificado: E. Restrepo Fecha: 08-03-17

5. pH
 Lectura: 6.55 ± 0.06 Temp (°C) 25°
 Potenciómetro: 3 Fecha Cal: 12-16
 Realizado: J. Hernandez Fecha: 06-03-17
 Verificado: E. Restrepo Fecha: 08-03-17

6. Valoración titrimétrica

Titulante - Concentración:	Equivalente:	Fecha prep.	Responsable	Pg. Bitácora
T.1				
T.2				

	Peso (mg)	Volumen T.1	Resultado Val	Peso (mg)	Volumen T.2	Resultado Val.
Blanco:						
Muestra 1:						
Muestra 2:						

Realizado: _____ Fecha: _____
 Verificado: _____ Fecha: _____

7. Conductividad:

Temp (°C): _____
Conductividad agua: _____
Conductividad muestra: _____

RESULTADO: _____
Fecha Cal: _____

$Conductividad = Cond. Mtra - Cond. Agua$

Realizado: _____ Fecha: _____
Verificado: _____ Fecha: _____

8. Rotación óptica:

Temp (°C): _____ Ángulo: _____
Peso muestra: _____ Dilución: _____
Concentración g/100 mL: _____

RESULTADO: _____
Fecha Cal: _____

$Rotación\ óptica = \frac{100 \times Ang}{1dm \times C \left(\frac{g}{100mL}\right)}$

Realizado: _____ Fecha: _____
Verificado: _____ Fecha: _____

9. Cálculos y observaciones

índice Acidez := info
 $= (nr \times v) \times (N/w).$

$nr = 56.11$

$v = 2.8$

$N = 0.5N$

$w = 25041g$

$(56.11 \times 2.8) (0.5 / 25041g) = 6.3 \checkmark$



HOJA DE DATOS PARA ENSAYOS FISICOQUIMICOS

Fecha: 06-03-17 Nombre: Acido acido de palma Lote: HHS Feb 2014-2
Descripción: Licuado de leche amonli rosado Libre de
particlos extrañas.

1. Pérdida por: Secado Incineración
Peso recipiente vacío (PRV):
Peso recipiente + muestra (PRM):
Peso muestra (PM):
Peso recipiente + mtra seca (PMS):
RESULTADO (%):
Estufa: Fecha Cal:
% perdida por secado = 100 - (PMS - PRV / PM) * 100
Realizado: Fecha:
Verificado: Fecha:

3. Densidad:
Temperatura:
PIC vacío (PV):
PIC + Muestra (PM):
PIC + Agua (PA):
RESULTADO:
Balanza: Fecha Cal:
Densidad = (PM - PV) / (PA - PV) * 1mg/mL
Realizado: Fecha:
Verificado: Fecha:

2. Residuo de incineración:
Peso crisol Vacío (PCV):
Peso crisol + muestra:
Peso muestra (PM):
Peso crisol + residuo (PCR):
RESULTADO (%):
Mufa: Fecha Cal:
Residuo incineración = (PCR - PCV) / PM * 100
Realizado: Fecha:
Verificado: Fecha:

4. Viscosidad:
Aguja: T°: RPM:
RESULTADO:
Viscosímetro: Fecha Cal:
Realizado: Fecha:
Verificado: Fecha:

5. pH
Lectura: Temp (°C)
Potenciometro: Fecha Cal:
Realizado: Fecha:
Verificado: Fecha:

6. Valoración titrimétrica

Table with 5 columns: Titulante - Concentración, Equivalente, Fecha prep, Responsable, Pg. Bitácora. Rows T.1 and T.2.

Table with 7 columns: Blanco, Muestra 1, Muestra 2, Peso (mg), Volumen T.1, Resultado Val, Peso (mg), Volumen T.2, Resultado Val.

Realizado: Fecha:
Verificado: Fecha:

7. Conductividad:

Temp (°C): _____
Conductividad agua: _____
Conductividad muestra: _____
RESULTADO: _____
Fecha Cal: _____

Conductividad = Cond. Mtra - Cond. Agua

Realizado: _____ Fecha: _____
Verificado: _____ Fecha: _____

8. Rotación óptica:

Temp (°C): _____ Ángulo: _____
Peso muestra: _____ Dilución: _____
Concentración g/100 mL: _____
RESULTADO: _____
Fecha Cal: _____

Rotación óptica = $\frac{100 * Ang}{1dm * C \left(\frac{g}{100mL}\right)}$

Realizado: _____ Fecha: _____
Verificado: _____ Fecha: _____

9. Cálculos y observaciones

índice de yodo: INFORMATIVO

met Hand.

Ar = 126.90
Vb = 40.4 ml
Vt = 6.4 ml
N = 0.5 N
W = 3.0042g

Formula = $[Ar * (Vb - Vt) * N] / (10 * W)$

$\frac{126.90 * (40.4 - 6.4) * 0.5}{10 * 3.0042g} = 14.36 \checkmark$

índice de Peróxido: IAO

T.V 23.4
Vb = 8.5 ml
N = 0.1
W = 2.5186g

Formula $1000[(Vt - Vb) * N] / W$

$\frac{1000(23.4 - 8.5) * 0.1}{2.5186g} = 607.48 \checkmark$

índice de Saponificación: INFO

Mr = 56.11
Vt = 26.3 ml
Vb = 42.6 ml
N = 0.5 N
W = 1.8642g

Formula $[Mr * (Vb - Vt) * N] / W$

$\frac{(56.11 * (42.6 - 26.3) * 0.5)}{1.8642g} = 247.65 \checkmark$

Contenido de material saponificable: INFO

Formula = $100 * (w2 / w1)$

w1 = 0.0034g
w2 = (2.5002)g

$100 * \frac{0.0034g}{2.5002} = 0.14 \checkmark$

ANEXO B
(ÍNDICE DE REFRACCIÓN DEL ACEITE CRUDO)



INFORME DE ENSAYOS No. 84877

Fecha de Ingreso: 2017-02-21	Fecha del Informe: 2017-02-24
Procedencia: JOHANNA LORENA CUBIDES GARCIA	Remitente: JOHANNA LORENA CUBIDES GARCIA
Dirección: CALLE 44D # 45-86 INT 1 APTO 502	Ciudad: BOGOTÁ, D.C.
Teléfonos: +57 3114693184	Número Interno: 4953
Número de Muestras: 1	

Muestra No. 1 - ACEITE CRUDO DE PALMA

<u>Análisis</u>	<u>Resultado</u>	<u>Unidades</u>
INDICE DE REFRACCION	1.4672	

La contramuestra se retendra hasta el 2017-03-23

OBSERVACIONES:
Temperatura 22.7°C.

Los resultados corresponden a las muestras aquí mencionadas. Este informe no podrá ser reproducido en modo alguno sin previa autorización de NUTRIANALISIS LTDA.

Firma Autorizada:

A handwritten signature in black ink that reads "Maria Cristina Otalora".

Q.F. MARIA CRISTINA OTALORA
JEFE DE LABORATORIO

ANEXO C

(ACIDEZ TITULABLE EN PORCENTAJE DE ÁCIDO PALMÍTICO DEL ACEITE CRUDO)

Debido a que la acidez titulable determinada por el laboratorio Colompack no se realizó con base al ácido palmítico, en este apartado se realiza la respectiva conversión:

$$\text{Indice de Acidez (\% de ácido palmítico)} = \frac{V_{KOH} * M * N}{10 * P_{aceite}}^{24}$$

Dónde:

V= volumen en ml de la disolución de KOH utilizada

N= normalidad de la solución de KOH utilizada

M= masa molecular (Ácido palmítico)

P= peso Muestra problema

$$\text{Indice de acidez (\% de ácido palmítico)} = \frac{2.8ml * \frac{256g}{mol} * 0.1N}{10 * 2.504g} = 2.8626$$

Este valor obtenido es necesario multiplicarlo por la composición de ácido palmítico presente en el aceite crudo que corresponde a un valor promedio de 43,4%:

$$2.8626 * \frac{43,4\% \text{ Acido Palmítico}}{100\% \text{ Aceite Crudo}} = \mathbf{1,2423 \%}$$

²⁴ Universidad de Córdoba, Prácticas de laboratorio. Grado de ingeniería agroalimentaria y del medio rural, Córdoba, 2013.

ANEXO D

(CARACTERIZACIÓN DEL ACEITE REFINADO)



CERTIFICADO DE ANALISIS MATERIA PRIMA
 COLOMPACK S.A (COMÚN)
 CARRRERA 46 # 20B-32
 PBX: 3691253-7456667
 BOGOTÁ COLOMBIA

N° Parte 0425 /17

Artículo: Aceite Refinado de palma N° de Lote: Jul2017-1 Proveedor: ND Fabricante: ND Fecha entrada: 07/2017	Orden de compra: NA Consecutivo Interno: NA País Origen: ND Fecha Fabricación: feb-17 Fecha Re análisis: N.A
Cliente: Richard Alexander Mallama Díaz Cantidad recibida: 1,7 litros Cantidad aprobada: NA Cantidad Cuarentena: NA	C.C. 1.010.212.148 de Bogotá Tamaño de la muestra: 1,7 litros Cantidad Rechazada: NA Fecha Emisión : 21/07/2017

Ensayo	Especificación	Método	Resultado	Concepto
Descripción	Líquido de color amarillo rojizo. Libre de partículas extrañas	COLOMPACK	Cumple	Cumple
pH	Informativa	COLOMPACK	4,7 (4,65)	Cumple
Densidad (25°C) g/mL	Informativa	COLOMPACK	0,912 g/mL 25°C	Cumple
Viscosidad (25°C) cPs	Informativa	COLOMPACK	120 cPs 25°C	Cumple
% Humedad (Contenido de agua por Karl Fischer)	Informativa	COLOMPACK	1,1% (1,1415%)	Cumple
Acidez titulable (Índice de acidez) (mg KOH /g de aceite)	Informativa	COLOMPACK	9,82 mg KOH/g de aceite	Cumple
Índice de Yodo	Informativa	COLOMPACK	16,28	Cumple
Índice de peróxidos (meq O ₂ /1000 g de aceite)	Informativa	COLOMPACK	40,13g meq O ₂ /1000g de aceite	Cumple
Índice de saponificación (mg KOH/g de aceite)	Informativa	COLOMPACK	159,07 mg KOG/g de aceite	Cumple
% Contenido de materia insaponificable	Informativa	COLOMPACK	0,04%	Cumple

DESCRIPCIÓN DE DEFECTOS		
Defecto	Cantidad	Decisión
NA	NA	NA

Análisis válido para la muestra analizada.

Sólo se puede realizar reproducción parcial o total del documento previa autorización de Colompack S.A.

APROBADO

RECHAZADO

Anexos: Certificado de proveedor y hoja de datos primarios.

Altamirano
Analizado


P.L. Cruz
Revisado

D. Cordero
Aprobado

Elaborado por / Fecha: D. Valle 21/07/17

Fecha de emisión: 10-16 Próxima revisión: 10-18

LPLAP002-F1V03

 COLOMYPACK	HOJA DE DATOS PARA ENSAYOS FISICOQUIMICOS																																											
Fecha: <u>19-07-17</u> Nombre: <u>Acate refinado de Palma</u> Lote: <u>1062017-3</u> Descripción: <u>liquido de color amarillo rojizo libre de</u> <u>particulas extrañas</u>																																												
1. Pérdida por: Secado <u> </u> Incineración <u> </u> Peso recipiente vacío (PRV): _____ Peso recipiente + muestra (PRM): _____ Peso muestra (PM): _____ Peso recipiente + muestra seca (PMS): _____ RESULTADO (%): _____ Estufa: _____ Fecha Cal: _____ $\% \text{ pérdida por secado} = 100 - \frac{PMS - PRV}{PM} * 100$ Realizado: _____ Fecha: _____ Verificado: _____ Fecha: _____	3. Densidad: <u>inf</u> Temperatura: <u>25°</u> PIC vacío (PV): <u>16.2558 g</u> PIC + Muestra (PM): <u>22.1395 g</u> PIC + Agua (PA): <u>27.2106 g</u> RESULTADO: <u>0.912 g/ml</u> Balanza: <u> </u> Fecha Cal: <u>12-16</u> $\text{Densidad} = \frac{PM - PV}{PA - PV} * 1 \text{mg/mL}$ Realizado: <u>J. Hernandez</u> Fecha: <u>19-07-17</u> Verificado: <u>P.S. Cue</u> Fecha: <u>21-07-17</u>																																											
2. Residuo de incineración: Peso crisol Vacío (PCV): _____ Peso crisol + muestra: _____ Peso muestra (PM): _____ Peso crisol + residuo (PCR): _____ RESULTADO (%): _____ Mufla: _____ Fecha Cal: _____ $\text{Residuo incineración} = \frac{PCR - PCV}{PM} * 100$ Realizado: _____ Fecha: _____ Verificado: _____ Fecha: _____	4. Viscosidad: <u>info</u> Aguja: <u>05</u> T°: <u>25</u> RPM: <u>10</u> RESULTADO: <u>170 CPS</u> Viscosímetro: <u> </u> Fecha Cal: <u>12-16</u> Realizado: <u>J. Hernandez</u> Fecha: <u>19-07-17</u> Verificado: <u>P.S. Cue</u> Fecha: <u>21-07-17</u>																																											
6. Valoración titrimétrica <table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse; margin-bottom: 10px;"> <thead> <tr> <th>Titulante - Concentración:</th> <th>Equivalente:</th> <th>Fecha prep.</th> <th>Responsable</th> <th>Pg. Bitácora</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>T.1</td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>T.2</td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> </tbody> </table> <table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse; margin-bottom: 10px;"> <thead> <tr> <th></th> <th>Peso (mg)</th> <th>Volumen T.1</th> <th>Resultado Val</th> <th>Peso (mg)</th> <th>Volumen T.2</th> <th>Resultado Val.</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Blanco:</td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>Muestra 1:</td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>Muestra 2:</td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> </tbody> </table> Realizado: _____ Fecha: _____ Verificado: _____ Fecha: _____	Titulante - Concentración:	Equivalente:	Fecha prep.	Responsable	Pg. Bitácora	T.1					T.2						Peso (mg)	Volumen T.1	Resultado Val	Peso (mg)	Volumen T.2	Resultado Val.	Blanco:							Muestra 1:							Muestra 2:							5. pH Lectura: <u>465.347</u> Temp (°C) <u>25°</u> Potenciómetro: <u> </u> Fecha Cal: <u>05-17</u> Realizado: <u>J. Hernandez</u> Fecha: <u>19-07-17</u> Verificado: <u>P.S. CUE</u> Fecha: <u>21-07-17</u>
Titulante - Concentración:	Equivalente:	Fecha prep.	Responsable	Pg. Bitácora																																								
T.1																																												
T.2																																												
	Peso (mg)	Volumen T.1	Resultado Val	Peso (mg)	Volumen T.2	Resultado Val.																																						
Blanco:																																												
Muestra 1:																																												
Muestra 2:																																												

<p>7. Conductividad:</p> <p>Temp (°C): _____</p> <p>Conductividad agua: _____</p> <p>Conductividad muestra: _____</p> <p>RESULTADO: _____</p> <p>Fecha Cal: _____</p> <p style="text-align: center;"><i>Conductividad = Cond. Mtra - Cond. Agua</i></p> <p>Realizado: _____ Fecha: _____</p> <p>Verificado: _____ Fecha: _____</p>	<p>8. Rotación óptica:</p> <p>Temp (°C): _____ Ángulo: _____</p> <p>Peso muestra: _____ Dilución: _____</p> <p>Concentración g/100 mL: _____</p> <p>RESULTADO: _____</p> <p>Fecha Cal: _____</p> <p style="text-align: center;"><i>Rotación óptica = $\frac{100 * Ang}{1dm * C \left(\frac{g}{100mL}\right)}$</i></p> <p>Realizado: _____ Fecha: _____</p> <p>Verificado: _____ Fecha: _____</p>
--	---

9. Cálculos y observaciones

Índice de Acidez: info / fórmula $(M_r \times V) \times (N/w)$

$M_r = 56.11$
 $V = 9 \text{ mL}$
 $N = 0.5 \text{ N}$
 $w = 5.1425 \text{ g}$

$(56.11 \times 9) \times \frac{(0.5)}{5.1425 \text{ g}}$
 R/ ~~10.07~~ 9.82

• Determinación de Agua: Informativa

Índice de yodo: info / fórmula $\frac{(A_r \times (V_B - V_S) \times N)}{10 \times w}$

$A_r = 126.90$
 $V_B = 43.9$
 $V_S = 33 \text{ mL}$
 $N = 0.5$
 $w = 3.1640$

$\frac{126.90 (43.9 - 33) \times 0.5}{(10 \times 3.1640)}$ R/ 16.28

Índice de Peróxidos: info / fórmula $\frac{(1000 (V_T - V_B) \times N)}{w}$

$V_T = 50.7$
 $V_B = 30.2$
 $N = 0.05$
 $w = 5.1072$

$\frac{1000 (50.7 - 30.2) \times 0.05}{5.1072}$ R/ 40.13

Índice de Saponificación: info / fórmula $\frac{(M_r \cdot (V_B - V_T) \cdot N)}{w}$

$M_r = 56.11$
 $V_B = 53.4$
 $V_T = 43.0$
 $N = 0.5$
 $w = 1.8342$

$\frac{(56.11 \times (53.4 - 43.0) \times 0.5)}{1.8342}$ R/ 759.07

Índice de material insaponificable: info / fórmula

$w_2 = 0.0020 \text{ g}$
 $w_5 = 5.2780 \text{ g}$
 $V_B = 1.0717$

$100 \times \frac{0.0020 \text{ g}}{5.2780 \text{ g}} = 0.04$ $100 \times (w_2/w_5)$

ANEXO E

(ACIDEZ TITULABLE EN PORCENTAJE DE ÁCIDO PALMÍTICO DEL ACEITE REFINADO)

Debido a que la acidez titulable determinada por el laboratorio Colompack no se realizó con base al ácido palmítico, en este apartado se realiza la respectiva conversión:

$$\text{Indice de Acidez (\% de ácido palmítico)} = \frac{V_{KOH} * M * N}{10 * P_{aceite}}^{25}$$

Dónde:

V= volumen en ml de la disolución de KOH utilizada

N= normalidad de la solución de KOH utilizada

M= masa molecular (Ácido palmítico)


P= peso Muestra problema

$$\text{Indice de acidez (\% de ácido palmítico)} = \frac{9.0ml * \frac{256g}{mol} * 0.1N}{10 * 5.1425g} = 4.4803$$

Este valor obtenido es necesario multiplicarlo por la composición de ácido palmítico presente en el aceite crudo que corresponde a un valor promedio de 43,4%:

$$4.4803 * \frac{43,4\% \text{ Acido Palmítico}}{100\% \text{ Aceite Crudo}} = \mathbf{1,9444\%}$$

²⁵ Universidad de Córdoba, Prácticas de laboratorio. Grado de ingeniería agroalimentaria y del medio rural, Córdoba, 2013.

 Fundación Universidad de América	FUNDACIÓN UNIVERSIDAD DE AMÉRICA	Código:
	PROCESO: GESTIÓN DE BIBLIOTECA	Versión 0
	Autorización para Publicación en el Repositorio Digital Institucional – Lumieres	Julio - 2016


AUTORIZACIÓN PARA PUBLICACIÓN EN EL REPOSITORIO DIGITAL INSTITUCIONAL LUMIERES




Nosotros **Johanna Lorena Cubides García** y **Richard Alexander Mallama Díaz** en calidad de titulares de la obra **Diseño conceptual de una planta piloto para el proceso de refinación de aceite crudo de palma para uso alimenticio**, elaborada en el año 2016, autorizamos al **Sistema de Bibliotecas de la Fundación Universidad América** para que incluya una copia, indexe y divulgue en el Repositorio Digital Institucional – Lumieres, la obra mencionada con el fin de facilitar los procesos de visibilidad e impacto de la misma, conforme a los derechos patrimoniales que nos corresponden y que incluyen: la reproducción, comunicación pública, distribución al público, transformación, en conformidad con la normatividad vigente sobre derechos de autor y derechos conexos (Ley 23 de 1982, Ley 44 de 1993, Decisión Andina 351 de 1993, entre otras).

Al respecto como Autores manifestamos conocer que:

- La autorización es de carácter no exclusiva y limitada, esto implica que la licencia tiene una vigencia, que no es perpetua y que el autor puede publicar o difundir su obra en cualquier otro medio, así como llevar a cabo cualquier tipo de acción sobre el documento.
- La autorización tendrá una vigencia de cinco años a partir del momento de la inclusión de la obra en el repositorio, prorrogable indefinidamente por el tiempo de duración de los derechos patrimoniales del autor y podrá darse por terminada una vez el autor lo manifieste por escrito a la institución, con la salvedad de que la obra es difundida globalmente y cosechada por diferentes buscadores y/o repositorios en Internet, lo que no garantiza que la obra pueda ser retirada de manera inmediata de otros sistemas de información en los que se haya indexado, diferentes al Repositorio Digital Institucional – Lumieres de la Fundación Universidad América.
- La autorización de publicación comprende el formato original de la obra y todos los demás que se requiera, para su publicación en el repositorio. Igualmente, la autorización permite a la institución el cambio de soporte de la obra con fines de preservación (impreso, electrónico, digital, Internet, intranet, o cualquier otro formato conocido o por conocer).
- La autorización es gratuita y se renuncia a recibir cualquier remuneración por los usos de la obra, de acuerdo con la licencia establecida en esta autorización.
- Al firmar esta autorización, se manifiesta que la obra es original y no existe en ella ninguna violación a los derechos de autor de terceros. En caso de que el trabajo haya sido financiado por terceros, el o los autores asumen la responsabilidad del cumplimiento de los acuerdos establecidos sobre los derechos patrimoniales de la obra.
- Frente a cualquier reclamación por terceros, el o los autores serán los responsables. En ningún caso la responsabilidad será asumida por la Fundación Universidad de América.
- Con la autorización, la Universidad puede difundir la obra en índices, buscadores y otros sistemas de información que favorezcan su visibilidad.

Conforme a las condiciones anteriormente expuestas, como autores establecemos las siguientes condiciones de uso de nuestra obra de acuerdo con la **licencia Creative Commons** que se señala a continuación:

 Fundación Universidad de América	FUNDACIÓN UNIVERSIDAD DE AMÉRICA	Código:
	PROCESO: GESTIÓN DE BIBLIOTECA	Versión 0
	Autorización para Publicación en el Repositorio Digital Institucional – Lumieres	Julio - 2016

	Atribución- no comercial- sin derivar: permite distribuir, sin fines comerciales, sin obras derivadas, con reconocimiento del autor.	<input checked="" type="checkbox"/>
	Atribución – no comercial: permite distribuir, crear obras derivadas, sin fines comerciales con reconocimiento del autor.	<input type="checkbox"/>
	Atribución – no comercial – compartir igual: permite distribuir, modificar, crear obras derivadas, sin fines económicos, siempre y cuando las obras derivadas estén licenciadas de la misma forma.	<input type="checkbox"/>

Licencias completas: http://co.creativecommons.org/?page_id=13

Siempre y cuando se haga alusión de alguna parte o nota del trabajo, se debe tener en cuenta la correspondiente citación bibliográfica para darle crédito al trabajo y a sus autores.

De igual forma como autores autorizamos la consulta de los medios físicos del presente trabajo de grado así:


AUTORIZAMOS	SI	NO
La consulta física (sólo en las instalaciones de la Biblioteca) del CD-ROM y/o Impreso	X	
La reproducción por cualquier formato conocido o por conocer para efectos de preservación	X	

Información Confidencial: este Trabajo de Grado contiene información privilegiada, estratégica o secreta o se ha pedido su confidencialidad por parte del tercero, sobre quien se desarrolló la investigación. En caso afirmativo expresamente indicaré (indicaremos), en carta adjunta, tal situación con el fin de que se respete la restricción de acceso.	SI	NO
		X

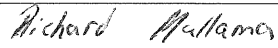
Para constancia se firma el presente documento en Bogotá, a los 26 días del mes de octubre del año 2017.

LOS AUTORES:

Autor 1

Nombres	Apellidos
Johanna Lorena	Cubides García
Documento de identificación No	Firma
1.026.286.951	

Autor 2

Nombres	Apellidos
Richard Alexander	Mallama Díaz
Documento de identificación No	Firma
1.010.212.148	

Nota: Incluya un apartado (copie y pegue el cuadro anterior), para los datos y la firma de cada uno de los autores de la obra.