

CAPÍTULO I
MARCO TEÓRICO

1.1.ORIGEN DE LA CHÍA

La chía es una especie originada en la cultura Mesoamericana, nativa del sur de México y el norte de Guatemala donde su cultivo se remota a unos 3.500 años antes de Cristo. Es un alimento básico que empleaba el imperio azteca; usaba la semilla como alimento, medicina, ofrenda a los dioses y materia prima para producir un aceite que era empleado como base en pinturas decorativas y cosméticos. Los subproductos de la semilla de chía, eran utilizados para la elaboración de una popular bebida nutritiva denominada “Chía fresca” (agua, limón, chía). Pero años después del descubrimiento de América, los cereales aportados por los españoles desplazaron su cultivo, el cual casi llegó a desaparecer. Su cultivo solo sobrevivió en las áreas montañosas de México y Guatemala y a finales del siglo pasado, el interés por la chía resurgió por considerarla buena fuente de Omega-3, fibra alimentaria, proteína y antioxidantes (Ayerza, and Coates, 2004)

Su presente importancia lo ha caracterizado como uno de los alimentos que aportan valor nutritivo al ser humano debido a su elevado contenido de ácidos grasos, linoléicos y alfa-linolénicos. Posee desde un 19 a un 23 % de proteínas, sin embargo a diferencia de otros granos, los aminoácidos de las proteínas de chía no tienen factores limitantes en la dieta de las personas adultas. Es una buena fuente de vitamina B¹², calcio, fósforo, potasio, zinc, cobre y de omega 3. Los antioxidantes de la semilla chía le otorgan una enorme ventaja sobre todas las demás fuentes de ácidos grasos omega3, ya que permiten que pueda almacenarse por años, sin que se deteriore el sabor, el olor o el valor nutritivo. Es el cereal con el más alto contenido de omega 3 que es un ácido graso esencial que nuestro metabolismo es incapaz de producir. Los ácidos grasos están presentes en cada célula del cuerpo y son críticos para el normal crecimiento y la funcionalidad de células, nervios y órganos. Sus beneficios son múltiples. Actuando en las enfermedades que afectan al sistema.

1.2.DESCRIPCION BOTÁNICA Y TAXONÓMICA DE LA CHÍA

La chía es una planta herbácea anual de la familia de las lamiaceae, crece en suelos arcillosos o arenosos, no soporta las heladas; mide aproximadamente de 1-1,5 metros de altura, con tallos ramificados, aromático de sección cuadrangular, con pubescencias cortas y blancas.

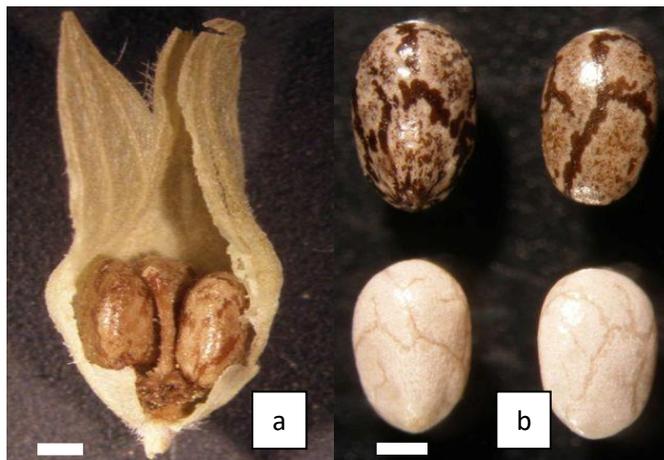
Las hojas miden de 8-12 cm de largo y 4-7 cm de ancho, se encuentran opuestas con bordes aserrados y de color verde intenso. Las flores son hermafroditas de un tono púrpuras a blancas, y aparecen en ramilletes de seis o más grupos; florece entre julio y agosto en el hemisferio norte.

Figura 1-1. Descripción botánica de la chía



Fuente: Di Sapio et al, 2012

El fruto proveniente de cada flor es un carcerulo que a la madurez produce pequeñas mericarpios indehiscentes denominados núculas o clusas “semilla”, en número de 1-4, incluidas en el cáliz frecuentemente acrescente (Figura 1-2a). Son monospermas ovalados y tamaño de 1.5-2 mm de longitud.

Figura 1-2. Frutos de la chía

Fuente: Di Sapio et al, 2012

En lo que respecta a su clasificación taxonómica es la que se muestra en la siguiente tabla I-4.

Tabla I-1. Clasificación taxonómica de la chía

Clasificación taxonómica	
Reino	Vegetal o Plantae
Subreino	Tracheobionta
División	Magnoliophyta
Clase	Magnoliopsida
Sub clase	Asteridae
Orden	Laamiales
Familia:	Lamiaceae
Tribu	Mentheae
Género	Salvia
Nombre científico	Salvia Hispanica L.
Nombre común	Chía

Fuente: Ixtaina, V. (2010)

La chía perteneciente al género *salvia*, que es uno de los géneros más numerosos dentro de la familia *lamiaceae* que comprende aproximadamente de 700 a 900 especies de arbustos. Generalmente estas especies son hierbas, perennes o anuales, también plantas arbustivas e incluso árboles; estos usualmente son aromáticos, de tallos cuadrangular, sus hojas son opuestas y con flores pediceladas.

1.3.SEMILLA DE CHÍA

La semilla es horizontal, albuminosa tiene una forma ovalada y muy pequeña. En mayor porcentaje se presentan en color pardo grisáceo con abundantes manchas de contornos muy irregulares de color castaño oscuro y que se destacan más en los límites de las areolas. En menor proporción se observan clusas de color blanquecino con los límites de las areolas de color castaño (Figura 1-2b.). Es rica en mucílago, fécula, aceite, proteínas vitaminas y algunos minerales.(Di Sapio et al, 2012)

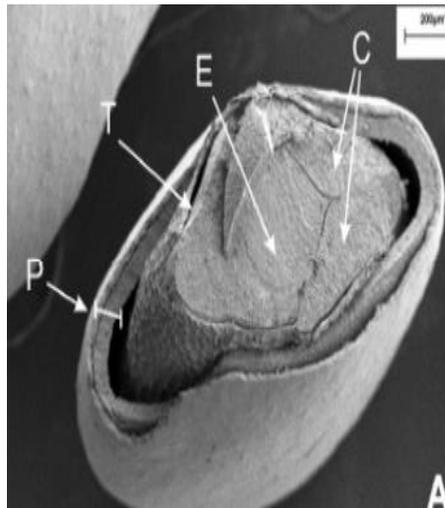
La semilla está cubierta por una superficie llamada pericarpio, la cual es lisa (sin pelo) en cuyo interior se encuentra la semilla verdadera. La semilla consta de una cubierta seminal (testa), el endosperma y el embrión (Figura 1- 3).

Testa.- Recubre la semilla y se halla constituida por dos estratos de celular alargadas con paredes rectas.

Endosperma.- Es la parte celular muy abundante, incluido en células andes alargadas, de contorno poligonal, paredes delgadas y con abundantes cuerpos proteicos lenticulares, de origen vacuolar y cuerpos lípidos esféricos.

Embrión.- Está compuesto principalmente por las caras de los cotiledones paralelas a las caras seminales.

Figura 1-3. Partes de la semilla de chía



Fuente: Di Sapio et al.Ixtaina, V.

1.4.PROPIEDADES DE LA SEMILLA DE CHÍA

La semilla de chía es una fuente muy importante para la alimentación debido a que contiene alto valor nutritivo para el consumo humano, entre ellos se encuentran cantidades de proteínas, hidratos de carbono, lípidos, minerales, aminoácidos esenciales, fibra insoluble y algunas vitaminas (magnesio, zinc, hierro entre otros).

La semilla de chía contiene antioxidantes naturales que le otorgan una enorme ventaja, ya que permiten que pueda almacenarse por años, sin que se deteriore el sabor, el olor o el valor nutritivo.

Tabla I-2. Composición nutricional de la chía.

Componente	100g
Proteínas (g)	17.2 (19-27)
Hidratos de carbono (1)	44
Lípidos (g)	34.3(30-38.6)
Colesterol mg	0
Fibra dietética total	28.32(23.81-32.64)
Potasio mg	700
Calcio mg	820
Fósforo mg	924
Vitamina A µg E	44

Fuente: Ixtaina, V. (2010)

1.5. ACEITES VEGETALES

Los aceites vegetales son compuestos orgánicos que se obtienen a partir de las semillas o frutos de las plantas vegetales. En general, todas las semillas y frutos contienen aceite, pero solo los llamados oleaginosos sirven para la producción industrial de aceite.

1. 5.1. DEFINICIÓN DE ACEITE

La palabra aceite proviene del árabe *azzayt*, el jugo de la aceituna y este del arameo *zayta*, es un término que engloba a todos los líquidos grasos que son sustancias de origen vegetal insolubles en el agua, pero solubles en disolventes orgánicos.

Todos los aceites están constituidos exclusivamente por triacilglicéridos los que a su vez son esteres de ácidos grasos con glicerol.

1.5.2. ÁCIDOS GRASOS

Los ácidos grasos son ácidos monocarboxílicos de cadena alifática con número par de átomos de carbono que podrían ser saturados o insaturados.

- **Ácidos grasos saturados:** Generalmente son de cadena recta que varían de 4 a 26 átomos de carbono y su temperatura de fusión aumenta con el peso molecular o el largo de la cadena: así, los de C4 a C8 son líquidos a 25°C, mientras que los de C10 en adelante son sólidos (Badui D.S. ,2006).
- **Ácidos grasos insaturados:** Son muy abundantes en los aceites vegetales y marinos; su temperatura de fusión disminuye con el aumento de las dobles ligaduras y siempre es menor que la de los saturados. Los de una insaturación se llaman monoinsaturados y a los demás se les denomina poliinsaturados. Se dividen en dos grandes grupos: los omega-6, ω_6 que lo tienen en el sexto carbono como el ácido linoléico y los ω_3 con su primer doble enlace en el tercer carbono como el ácido linolénico (Badui D.S. ,2006).

1.6. ACEITE DE CHÍA

Es un aceite de origen vegetal proveniente de las semillas de chía, el cual brinda numerosos beneficios para la salud. El aceite de chía tiene un contenido elevado de ácido α -linolénico, que es esencial en la alimentación y muy efectivo para combatir enfermedades cardiovasculares (Beltrán- Orozco y Romero, 2003). En la actualidad, el aceite de chía no es ampliamente utilizado comercialmente a pesar de que tiene características que son muy adecuadas, dado que el aceite de semilla de chía es un producto que tiene una composición química variable dependiendo de varios factores tales como el entorno de cultivo y el sistema de extracción.

El aceite de chía es un aceite claro que no llega a tomar un color amarillo con el tiempo y, es por lo tanto un preservativo excelente para los colores en lona, cerámica y madera. También ha demostrado que tiene una importancia significativa en gran cantidad de compuestos industriales tales como barnices, pinturas, etc. (Beltrán- Orozco y Romero, 2003).

1.6.1. PROPIEDADES DEL ACEITE DE CHÍA

El aceite de chía contiene una gran cantidad de ácidos grasos (omega 3 y omega 6), antioxidantes que protegen el organismo y contribuye al sistema inmunológico. El aceite de chía no contiene gluten ni colesterol además contiene bajo nivel de grasas saturadas a diferencia de otros aceites vegetales.

Actualmente, se disponen en el mercado de cuatro fuentes de ácidos grasos ω -3. Las dos más importantes en volumen de producción son las asociadas al pez “menhaden” (*Brevoortiatyrannus*) y a las semillas de lino, mientras que las fuentes minoritarias son la de semilla de chía y las algas marinas. De estas cuatro materias primas, el lino y la chía son los cultivos agrícolas que presentan la mayor concentración de ácido α -linolénico (Ayerda, 1995. Citado por Guiotto E. N., 2014).

Tabla I-3. Características comparativas del perfil de ácidos grasos

Aceite	Ácido graso (% del total de ácidos grasos)				
	C16:0	C18:0	C18:1 w9	C18:2 w6	C18:3 w3
Menhaden	15,2	7,5	14,5	2,1	1,5
Algas	14,5	0,5	5,4	2,3	1,7
Chía	6,9	2,5	6,6	19,0	63,5
Lino	5,5	1,4	19,5	15,0	57,5

Fuente: Guiotto, E. N. 2014

La tabla I-3 muestra las características comparativas del perfil de ácidos grasos, donde los aceites de chía, lino y algas no contienen cantidades apreciables de colesterol y ácidos grasos polisaturados a diferencia del aceite de pez.

Por otra parte, en lo que respecta al enriquecimiento de alimentos con ω -3, la chía no presenta ni transmite el característico olor a pescado; la estabilidad de dichos ácidos grasos ω -3 es otorgada por los antioxidantes presentes en la semilla (Tosco, 2004. Citado por N. Guiotto Estefanía, 2014).

1.6.2. USOS Y APLICACIONES DEL ACEITE DE CHÍA

El aceite de las semillas de chía se puede utilizar para las pinturas o como sustituto del aceite de linaza. En la actualidad, existe una amplia oferta de productos alimenticios en los cuales se ha incorporado el aceite de chía, tales como: pan multigrano, cereales, pasta, aceites de oliva y margarinas. Además, el aceite se vende a través de Internet, como suplementos nutricionales en cápsulas blandas o como aceites para preparaciones gastronómicas (Jaramillo, 2013). Algunos de esos productos se pueden encontrar en páginas de internet como se muestra en el siguiente cuadro.

Cuadro I-1. Productos elaborados con aceite de chía a nivel mundial

Nombre de compañía	Sitio web	Aplicación	Producto
Agrobeck International	http://www.o3chiapremium.com/chía-cápsulas.php	Cápsulas de aceite de chía-omega 3	
Buena salud	http://www.revistabuena salud.com/cremas-con-omega-3/	En cremas por su elevada cantidad de omega 3 y antioxidantes	
Terramater Chile	www.terramater.cl	Aceite gourmet Oliva & Chía	
Fuente Natura México	www.fuente natura.cl	Suplemento nutricional (aceite de chía)	
Madaus&Co.Argentina	www.drmdaus.ar	Suplemento nutricional	

Fuente: Jaramillo, Y. (2013)

1.7.PROCESO DE EXTRACCIÓN MEDIANTE SOLVENTE

La extracción por solvente es uno de los métodos más tradicionales para la obtención de aceites de semillas oleaginosas. El principio de extracción se basa que el componente soluto del sólido se hace miscible ante la presencia del solvente, y es atrapado por este mismo.

Este es un procedimiento muy eficaz para la extracción de aceites vegetales y puede reducir el contenido de aceite hasta un 1%. Además, se ha verificado que la mayor parte de aceite extraído proviene de las células que se rompen durante los procesos de trituración y cocción (Bernardini, 1971).

Figura 1-4. Diagrama del proceso de extracción de semillas oleaginosas



Fuente: Bernardini, 1971

1.7.1. PREPARACIÓN DE LAS SEMILLAS OLEAGINOSAS

LIMPIEZA

Las semillas oleaginosas, al llegar contienen sustancias extrañas como ser: tierra, piedra, elementos metálicos y diversos cuerpos. Todos estos elementos extraños deben separarse antes que la semilla pase a ser procesada, ya que se pueden originar graves daños en la industria de proceso.

SECADO

El proceso de secado es uno de los métodos que se utiliza para eliminar el agua contenida en las semillas oleaginosas, de modo que favorecerá el proceso de trituración o molienda.

MOLIENDA

La experiencia ha demostrado que la extracción de aceite de una semilla oleaginosa, se realiza mucho más rápidamente cuando la semilla se somete a una trituración previa, molienda o un laminado.

Algunos estudios han demostrado que el aceite está contenido en una infinidad de células, y la rotura de estas células se puede realizar solo por la fuerte compresión sobre la semilla. Dichos estudios han confirmado que aun después de una fuerte trituración o molienda de las semillas hay todavía células que no se rompen, de ahí la dificultad de poder extraer la totalidad de aceite de la semilla (Bernardini, 1971).

TAMIZADO

El tamizado es un proceso no muy usado por las industrias aceiteras, debido a que no es tan importante este proceso. De otro modo, si se trabaja a escala laboratorio este proceso es importante, para determinar el tamaño de partícula con el que se trabaja.

El tamizado se realiza haciendo pasar la semilla molida, sobre una superficie provista de orificios del tamaño deseado. El aparato puede estar formado por barras fijas o en movimiento, por placas metálicas perforadas, o por tejidos de hilos metálicos. El

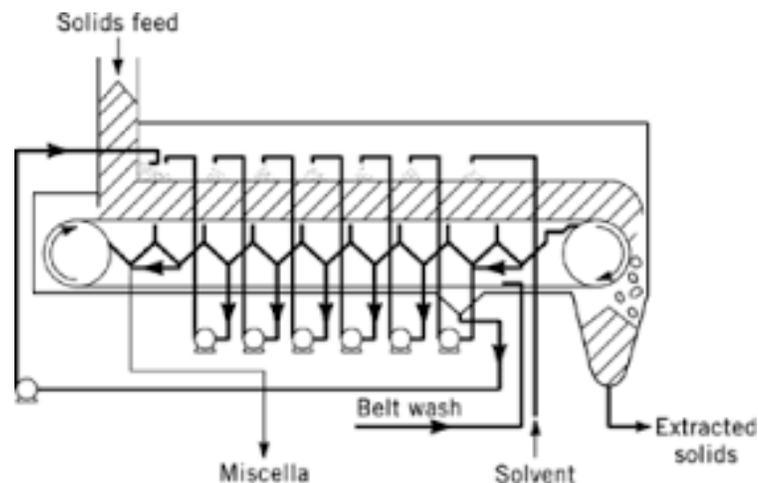
tamizado consiste en la separación de una mezcla de partículas de diferentes tamaños en dos o más fracciones, cada una de las cuales estará formada por partículas de tamaño más uniforme que la mezcla original.

1.7.2 EXTRACCIÓN POR SOLVENTE

- EXTRACCIÓN CON EXTRACTORES POR PERCOLACIÓN

El procedimiento de percolación se lleva a cabo mediante una lluvia del solvente de manera tal que llegue a toda la masa, pero sin llenar todos los espacios vacíos existentes entre las semillas. Se realiza una verdadera percolación cuando el solvente envuelve a todas las partículas de la semilla con una película de líquido en continuo recambio.

Figura 1-5. Extractor por percolación



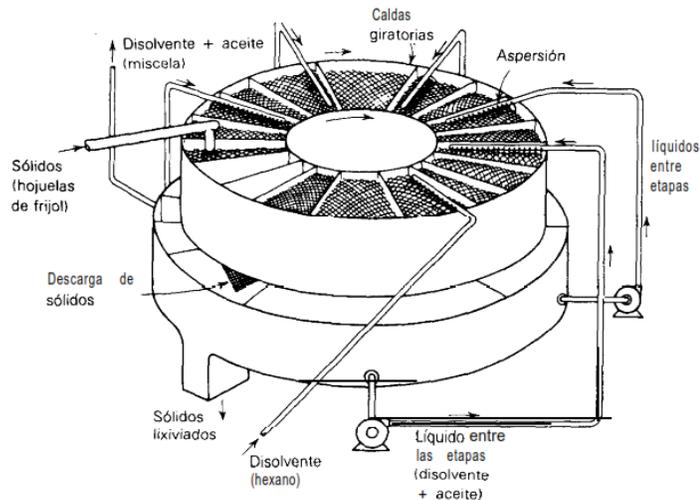
Fuente: Treybal, R. E. (1990).

- EXTRACCIÓN CON EXTRACTORES DE INMERSION

En este extractor los sólidos son agitados por inmersión en el solvente; en este caso, el material pulverizado es bien extraído al estar sumergido totalmente en el solvente, dado el elevado contacto que existe entre ambos (Treybal, R. E. 1990).

Este equipo se mueve continuamente de forma que permite la introducción y descarga continua de los sólidos.

Figura 1-6. Extractor por inmersión



Fuente: Treybal, R. E. (1990).

El principal inconveniente de este sistema es la separación de material particulado (finas) de la micela. Por lo general, demanda la instalación de equipos auxiliares, como ciclones, filtros y centrifugadoras.

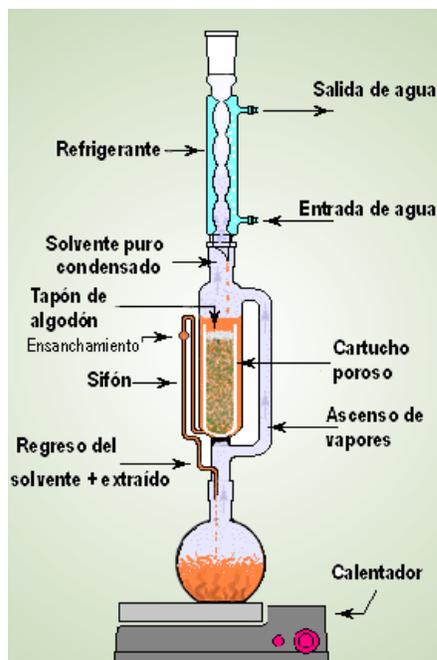
- EXTRACCIÓN POR EL MÉTODO SOXHLET

Es un proceso donde se pone en contacto la semilla molida con el solvente; la mayor parte de las extracciones con solventes se las realiza en un equipo soxhlet (escala laboratorio) o extractores (industria). Lo que hace el extractor soxhlet es realizar un sinfín de extracciones de manera automática, con el mismo solvente que se evapora y condensa llegando siempre de manera pura al material (escala laboratorio).

La extracción soxhlet se fundamenta en las siguientes etapas: 1) colocación del solvente en un balón (Se pueden emplear distintos solventes como hexano, acetato de etilo, benceno, etanol y éter de petróleo). 2) ebullición del solvente que se evapora

hasta un condensador a reflujo. 3) el condensado cae sobre un recipiente que contiene la muestra sólida. 4) ascenso del nivel del solvente cubriendo toda la muestra solida hasta el punto que se produce el reflujo. 5) el solvente con el material extraído vuelve al balón. 6) se vuelve a producir este proceso la cantidad de veces necesarias para que la muestra quede agotada (Núñez, 2008).

Figura 1-7. Extracción por el método soxhlet



Fuente: Núñez, 2008

1.7.3. ACEITE CRUDO

Para obtener el aceite crudo, la mezcla aceite-solvente es sometida a un proceso de destilación, que recupera el aceite contenido, mediante evaporización y condensación del solvente, aprovechando los diferentes puntos de ebullición de cada una de las sustancias. Posteriormente el aceite es almacenado en un lugar fresco.

1.8. TEORÍA DE EXTRACCIÓN SÓLIDO-LIQUÍDO POR SOLVENTE

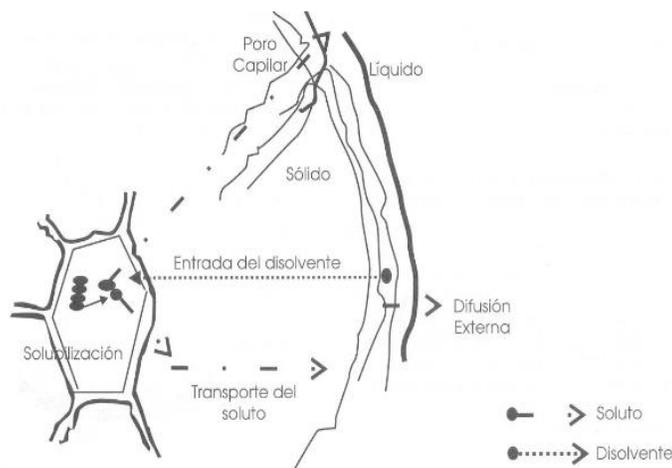
1.8.1. DEFINICIÓN

La extracción del aceite de una semilla oleaginosa por medio de solvente es un procedimiento que se usa en la casi totalidad de las plantas que trabajan estos productos. El proceso consiste en la disolución de un componente que forma parte de un sólido, empleando un solvente adecuado en el que es insoluble el resto del sólido.

Desde el punto de vista de la ingeniería, la extracción es una operación unitaria multicomponente, no estacionaria (Treybal, 1990). Para extraer el aceite de las semillas, deben producirse cuatro pasos bien definidos (Álvarez, 2001):

- a) La entrada del solvente a la matriz del sólido.
- b) El solvente debe difundir dentro del sólido y disolver el aceite.
- c) El transporte del soluto hacia el exterior de la matriz de sólido.
- d) La migración del soluto extraído de la superficie externa del sólido dentro del volumen de la solución.

Figura 1-8. Esquema de las etapas principales durante la extracción S-L



Fuente: Álvarez, 2001

Todos los estudios efectuados en este sentido y todas las ecuaciones dadas para el estudio del mecanismo de la extracción han dado solamente datos teóricos que, sin embargo, distan mucho de la realidad (Bernardini, 1971).

1.8.2. TRANSPORTE DE MASA EN LA EXTRACCIÓN

El éxito de un proceso de extracción es una función de qué tan rápido se disuelva el compuesto a extraer y del equilibrio que alcanza en la fase del disolvente. Diferentes fenómenos están involucrados en el paso del soluto desde el sólido hasta el seno del solvente: el aceite difunde a través de los poros internos hasta la superficie del sólido (transporte de masa interna) y luego pasa al seno del líquido por un mecanismo convectivo producido por la diferencia de concentración entre la solución ocluido en los poros y en el seno de la disolución (transporte externo) (Grasso, 2013).

Para analizar la transferencia de masa en el proceso de extracción, se utiliza la ecuación de la velocidad de transferencia de masa (Grasso, 2013; Treybal, 1990):

$$N_A = K_s A (C_s - C_{si}) \quad \text{Ec. 1-1}$$

Donde:

N_A = Velocidad de transferencia de masa

K_s = Coeficiente de transferencia de masa

A = Área total disponible para la transferencia de masa

C_s = Es la concentración promedio de aceite contenido en el sólido

C_{si} = Concentración de aceite en la interface

La velocidad de transferencia es igual a la variación de la concentración multiplicada por el volumen del sólido a una variación respecto al tiempo:

$$N_A = V_s \frac{dc}{dt} \quad \text{Ec. 1-2}$$

Reemplazando la Ec. 1-2 en la Ec. 1-1.

$$V_s \frac{dc}{dt} = k_s A (c_{si} - c_s) \quad \text{Ec. 1-3}$$

Integrando la ecuación 1-3 se tiene el siguiente resultado.

$$\int_{C=C_0}^{C=C} \frac{dc}{c_{si} - c_s} = \frac{k_s A}{V_s} \int_{t=0}^{t=t} dt$$

$$\frac{c_{si}-c}{c_{si}-c_0} = e^{\left(\frac{k_s A t}{V_s}\right)} \quad \text{Ec. 1-4}$$

Donde:

C_0 = Concentración del aceite después del tiempo “t”

C = Concentración de aceite contenida según bibliografía

C_{si} = Concentración de aceite en la interface

K_s = Coeficiente de transferencia de masa

V_s = Volumen del sólido

A = Área de transferencia de masa

t = Tiempo de extracción

1.8.3. DIFUSIVIDAD EN LA EXTRACCIÓN

La difusión es una propiedad de transporte importante para predecir el coeficiente de transferencia de masa, el cual es útil para diseñar equipos de transferencia de masa. Aunque pareciera que el principio de la extracción con solvente es simple, en realidad involucra un mecanismo complejo, especialmente para materiales que contienen aceite, debido a la estructura celular de los cuerpos vegetales (Álvarez, 2001).

La difusión desde las células ilesas es el paso más lento en el proceso de extracción. Cuando los sólidos microestructurales se consideran como un sistema mixto de células dañadas e intactas, la extracción del soluto puede concebirse como constituido por dos procesos difusionales: Uno que representa la extracción rápida en las células con paredes celulares dañadas y el otro con transferencia más lenta del soluto desde las células intactas (Álvarez, 2001).

1.8.4. DETERMINACIÓN DEL COEFICIENTE DE DIFUSIÓN

La estimación del coeficiente de difusión es importante para determinar la velocidad de transferencia de masa. En los materiales celulares, las macromoléculas pueden estar enlazadas químicamente a la matriz sólida, pero la velocidad de estas reacciones

puede ser limitada por la difusión. Para entender estos procesos se requiere conocimiento sobre la naturaleza y propiedades de los efectos gobernados por la difusión. La difusión es un proceso físico mediante el cual cierta masa es transferida bajo la influencia de gradientes de concentración (Grasso, 2013).

El modelo matemático para determinar el coeficiente de difusión según (Álvarez, 2001) está definida por la segunda ley de Fick para estado no estacionario:

$$\left(\frac{\partial c}{\partial \theta}\right) = D \left(\frac{\partial^2 c}{\partial z^2}\right) \quad \text{Ec. 1-5}$$

Donde:

c = Concentración de soluto a la distancia z del origen y al tiempo θ .

θ = Tiempo.

D = Coeficiente de difusión, cantidad de material que pasa por un plano de unidad de área en un unidad de tiempo debido a una gradiente de concentración de la unidad.

Para obtener la difusión de acuerdo a la ley de Fick ciertas condiciones deben ser establecidas (Fan y col., 1948 citado en Álvarez, 2001).

- D debe ser constante e independiente del espesor.
- La forma de la lámina debe ser razonablemente homogénea.
- La distribución del aceite en la célula debe ser uniforme y la difusión a través de la orillas de la placa debe ser despreciable.
- El grosor de la muestra debe ser uniforme y el mismo para todas las muestras que son extraídas al mismo tiempo.

Si la lámina es porosa y las condiciones anteriores se cumplen, una de las soluciones encontradas para la ecuación (1-1) para una partícula esférica (Crank, 1957), que corresponde al flujo en una sola dirección, solución correspondiente a las condiciones límite de:

$$C = 0, \quad 0 < z < d, \quad q \geq 0, \quad C = dC_o$$

La relación entre las concentraciones c_i del aceite en el disolvente puede convertirse a una relación entre las cantidades de aceite por unidad de volumen del sólido q_i :

$$\frac{q_\theta}{q_0} = \frac{6}{\pi^2} \sum_{n=1}^{n=\infty} \frac{1}{n^2} \exp^{-n^2 \left(\frac{\pi^2 D \theta}{d^2} \right)} \quad \text{Ec. 1-6}$$

Donde:

θ = Tiempo de extracción, s.

q_0 = Cantidad inicial de aceite en el sólido cuando $q = 0$

q_θ = Cantidad de aceite por unidad de sólido a q min, g/g s.s.

d = Diámetro de la muestra sujeta a extracción, m.

D = Coeficiente de difusión m^2/s .

n = Índice de sumatoria.

La serie representada por la ecuación (1-2) converge rápidamente y así que pocos términos(n) son con frecuencia suficientes para los cálculos prácticos (Treybal, 1990).

$$\frac{q_\theta}{q_0} = \frac{6}{\pi^2} \left(e^{-\frac{\pi^2 D \theta}{d^2}} + \frac{1}{4} e^{-\frac{4\pi^2 D \theta}{d^2}} + \frac{1}{9} e^{-\frac{9\pi^2 D \theta}{d^2}} + \frac{1}{16} e^{-\frac{16\pi^2 D \theta}{d^2}} + \dots \dots \right) \quad \text{Ec. 1-7}$$

Considerando estado no estacionario y partículas de geometría esféricas, suspendidas en un medio de concentración constante sin restricción de volumen, el primer término es suficiente y la ecuación se reduce a:

$$\frac{q_\theta}{q_0} = \frac{6}{\pi^2} \left(e^{-\frac{\pi^2 D \theta}{d^2}} \right) \quad \text{Ec. 1-8}$$

Entonces:

$$\log \frac{q_{\theta}}{q_0} = a - 4,286 \frac{D}{d^2} \theta \quad \text{Ec. 1-9}$$

Donde:

a = Es una constante que se determina en el proceso experimental

1.9. FACTORES QUE INFLUYEN EN LA VELOCIDAD DE EXTRACCIÓN

- **Tiempo de extracción**

El tiempo de extracción tiene una importancia fundamental sobre la cantidad de aceite extraído de una semilla, donde la mayor parte de aceite se extrae en los primeros treinta minutos de la extracción (Bernardini, 1971). Para poder dejar la harina con un aceite residual inferior al 1% se requiere un tiempo muy largo, sin embargo cada semilla se comporta de distinto modo durante el proceso de extracción.

- **Tamaño de partícula**

Es importante tener un tamaño adecuado de las partículas sólidas, de tal manera que se tenga un material particulado, que alcance una buena superficie de contacto, sin ser un material muy fino que dificulte su manipulación e incremente la energía para la reducción de tamaño. La mayor área superficial favorece la velocidad de transferencia del material sólido al solvente, y facilita la difusión del soluto hacia el solvente por la menor distancia que recorre el soluto por el interior del sólido (Simons, 2010).

Es aconsejable que la gama de tamaño de partículas sea pequeña y homogénea, para que cada partícula requiera el mismo tiempo de extracción y se debe evitar la producción de gran cantidad de finos, ya que este puede alojarse en los intersticios de las partículas de mayor tamaño, impidiendo así el flujo del disolvente.

- **Tipo de solvente**

El solvente debe ser lo más selectivo posible, con una viscosidad lo suficientemente baja para facilitar su flujo a través del sólido y de bajo punto de ebullición para que el extracto pueda concentrarse por la evaporación del solvente.

Por lo general, se utiliza un solvente relativamente puro, pero a medida que transcurre la extracción, la concentración del soluto aumenta y la velocidad de extracción disminuirá progresivamente, debido al aumento de la viscosidad de la disolución (Simons, 2010).

- **Temperatura del solvente**

El aumento de temperatura del solvente favorece la solubilidad y el aumento de la extracción del aceite; así mismo se observó que sobrepasando la temperatura de 50°C se produce una disminución del poder extracción del solvente en algunos tipos de semilla (Bernardini, 1971).

1.10. SELECCIÓN DEL MÉTODO DE EXTRACCIÓN POR SOLVENTE

De acuerdo a las referencias bibliográficas que se tienen, se puede realizar la extracción de aceite con solvente: por el método soxhlet y por extractores de inmersión o percolación. En nuestro medio no se cuenta con extractores de inmersión o percolación, pero sí con el equipo soxhlet; de este modo se realizara la extracción utilizando el equipo soxhlet.

Además, el método soxhlet permite tener mayor rendimiento en la extracción y tener un producto con buenas características organolépticas y excelentes propiedades fisicoquímicas (Lafont, J. J., 2011).

El método soxhlet es muy utilizado en las investigaciones, debido a que este nos permite controlar variables importantes como ser: temperatura, tiempo y tamaño de partícula, valores que pueden ser plasmados para el diseño de una planta piloto. Además, la mayor parte de las industrias aceiteras utilizan este método a mayor escala.

1.11. SELECCIÓN DEL SOLVENTE PARA LA EXTRACCIÓN DE ACEITE DE CHÍA

En 2011, Lafont, J. J. realizó la “Extracción y caracterización fisicoquímicas del aceite de la semilla del Marañón” con los distintos solvente: éter de petróleo, etanol y hexano el cual muestra las siguientes conclusiones:

- La extracción de aceite, presenta un mayor rendimiento usando hexano como solvente, debido a que el hexano, al no poseer grupos funcionales en su estructura química, es fácil la liberación y recuperación durante el proceso. Vale la pena destacar que las características organolépticas del aceite obtenido con hexano presenta un color transparente y brillante e inodoro.
- El rendimiento y las características con el éter de petróleo y etanol es inferior comparado con el hexano; además, presenta un color amarillo opaco y un olor muy desagradable, lo cual tal vez se debe a su menor recuperación.

En la siguiente tabla I-4 se muestran ventajas y desventajas de los distintos tipos de solvente que se pueden emplear en el proceso de extracción.

Tabla I-4. Ventajas y desventajas de solventes a utilizar en la extracción del aceite de chía

PROCESO	SOLVENTES	DISPONIBILIDAD DEL REACTIVO	VENTAJAS	DESVENTAJAS
<i>Extracción sólido-líquido</i>	Hexano	Disponible	<ul style="list-style-type: none"> - Mayor rendimiento en el proceso de extracción. - No provoca alteraciones en los componentes del aceite. - Mayor selectividad que otros solventes 	<ul style="list-style-type: none"> - Riesgo de incendio y exposición si no se maneja con cuidado. - Contaminación al medio ambiente.
	Éter de petróleo	Disponible	<ul style="list-style-type: none"> - Más económico que otros solventes. - Menos inflamable. 	<ul style="list-style-type: none"> - Riesgo de incendio y explosión. - Menor rendimiento en el proceso de extracción.
	Etanol	Disponible	<ul style="list-style-type: none"> - Barato - Fácil de conseguir - No contamina el medio ambiente. 	<ul style="list-style-type: none"> - Es difícil la separación del solvente, cuando se lo aplica como solvente en la extracción de aceite. - Atrapa adicionalmente componentes.

Fuente: Elaboración propia

Tabla I-5 Rango de valores para la matriz de decisión

Costo		Selectividad		Separación del solvente	
Muy alto	0	Pésima	0	Pésima	0
Alto	2	Mala	2	Mala	2
Medio	4	Regular	4	Regular	4
Bajo	6	Buena	6	Buena	6
Muy bajo	8	Muy buena	8	Muy buena	8
Sin costo	10	Excelente	10	Excelente	10

Fuente: Elaboración propia

Con estos parámetros y en base a la matriz de decisión se elegirá el solvente más apropiado para la extracción de aceite de chía.

1.11.1. MATRIZ DE DECISIÓN PARA LA SELECCIÓN DEL SOLVENTE EN LA EXTRACCIÓN DE ACEITE DE CHÍA

En la siguiente tabla I-6 se muestra la matriz de decisión.

Tabla I-6 Matriz de decisión para la selección del solvente en la extracción de aceite de chía.

A= Hexano B= Éter de petróleo C= Etanol	Porcentaje de valoración (%)	Alternativas de solventes								
		A			B			C		
Costo	35	Medio	4	140	Medio	4	140	Muy bajo	8	280
Selectividad	40	Excelente	10	400	Muy buena	8	320	Regular	4	160
Separación del solvente	25	Excelente	10	250	Muy buena	8	200	Mala	2	50
Total	100	790			660			490		

Fuente: Elaboración propia

De acuerdo a la tabla presentada anteriormente se observa que los tres solventes, están disponibles en el laboratorio de química. De modo que se tendrá que hacer énfasis en las ventajas y la selectividad de cada solvente; el hexano tiene mayor rendimiento que el éter de petróleo y el etanol, además no altera la composición de aceite extraído y tiene una mayor selectividad. Sin embargo el éter de petróleo y el etanol tienen menor rendimiento en la extracción, pero el etanol es más económico que los dos solventes anteriores, la desventaja es que tiene la dificultad de separación del aceite de modo que esto alteraría la composición del aceite extraído.

De acuerdo a la matriz de decisión y los resultados bibliográficos se empleará el hexano como solvente, debido que este tiene mayor rendimiento, selectividad y es fácil la recuperación del mismo.

1.12. CALIDAD DE LOS ACEITES

Entre las propiedades que definen la calidad de un aceite están: punto de fusión, densidad, índice de refracción, índice de acidez, índice de yodo, índice de peróxidos, índice de saponificación y otros.

1.12.1. DENSIDAD

Determina la masa de la unidad de volumen, expresada en gramos por centímetro cúbico, a una temperatura dada (Madrid, 1988).

1.12.2. ÍNDICE DE REFRACCIÓN

El índice de refracción de una sustancia dada es la razón de la velocidad de un rayo de luz en el vacío a la velocidad de la luz a través de la sustancia. Por conveniencia práctica se refiere a la relación aire-sustancia (Madrid, 1988).

1.12.3. ÍNDICE DE SAPONIFICACIÓN

El índice de saponificación expresa el peso en mg de hidróxido de potasio necesario para saponificar 1 g de asa (Madrid, 1988).

1.12.4. ÍNDICE DE YODO

El índice iodo es una medida de la instauración de ácidos grasos. Se expresa convencionalmente por el peso de iodo absorbido por cien partes en peso de la muestra asa (Madrid, 1988).

1.12.5. ÍNDICE DE PERÓXIDO

Se denomina índice de peróxido a los mili equivalentes de oxígeno activo contenidos en un kilogramo de la materia ensayada, calculados a partir del yodo liberado del

yoduro de potasio operando en las condiciones que se indican en la metódica (Madrid, 1988).

1.12.6. ÍNDICE DE ACIDEZ

Es una expresión convencional del contenido en tanto por ciento de los ácidos grasos libres. También se denomina grado de acidez (Madrid, 1988).

CAPÍTULO II
PARTE EXPERIMENTAL

2. INTRODUCCIÓN

La parte experimental del presente trabajo de investigación, “**Obtención de aceite de chía (*Salvia Hispánica*) mediante solvente**”, se realizó en el laboratorio de Química de la Universidad Juan Misael Saracho.

2.1. CARACTERIZACIÓN DE LA MATERIA PRIMA

La materia prima utilizada en la presente investigación es la semilla de chía (*Salvia Hispánica*), producida en el departamento de Santa Cruz de la Sierra. Para la caracterización de la materia prima se realizaron los análisis físico-químicos en el laboratorio CEANID.

Los resultados del análisis físico-químico de la materia prima se exponen en la siguiente tabla II-1.

Tabla II-1. Composición de la semilla de chía

PARÁMETROS	UNIDAD	NORMA	RESULTADO
Cenizas	%	NB 39034:10	4,18
Calcio total	mg/100	Absorción Atómica	709
Fibra	%	gravimétrico	9,01
Fósforo total	mg/100	SM 4500-P-D	715
Hidratos de carbono	%	Cálculo	32,12
Humedad	%	NB 313010:05	7,90
Materia grasa	%	NB 313019:06	33,16
Proteína total	%	NB/ISO 8968-1:08	21,49

Fuente: CEANID, 2016 (Ver anexo A)

2.2. DISEÑO EXPERIMENTAL

El diseño experimental es una serie de pruebas en las cuales se inducen variables de entrada de un proceso o sistema, de manera que, sean posibles observar e identificar las causas de los cambios en la respuesta de salida (Montgomery, 1991).

2.2.1. DISEÑO FACTORIAL

Los diseños factoriales, son ampliamente utilizados en experimentos en los que intervienen varios factores para estudiar el efecto conjunto de estos sobre una respuesta. Se conocen métodos generales para el análisis de diseño factorial, sin embargo existen varios casos del diseño factorial general que resulta importante en el trabajo de investigación y porque constituye la base para otros diseños de gran valor práctico (Montgomery, 1991).

El más importante de estos casos especiales ocurre cuando se tiene K factores, cada uno con “n” niveles. Estos factores pueden ser cuantitativos como sería el caso de los valores de temperatura, presión o tiempo. También puede ser cualitativo como sería de dos máquinas, dos operadores, los niveles “superiores” e “inferiores” de un factor (Montgomery 1991).

Una réplica completa de tal diseño requiere que se recopilen: $2 \times 2 \times \dots \times 2 = 2^k$ observaciones que según Montgomery, es un diseño factorial conocido como: 2^k

Donde:

K= Número de factores

2= Número de niveles

2.2.2. DISEÑO EXPERIMENTAL DEL PROCESO DE OBTENCIÓN DE ACEITE DE CHÍA

Para el proceso de obtención de aceite de chía se manejan dos factores; Temperatura (A) y tiempo de extracción (B). La variable respuesta es la cantidad de producto o aceite extraído. (Rendimiento aproximado según bibliografía es de 27 a 33%).

En este diseño no se toma en cuenta el tamaño de la partícula, de modo que se realizó una prueba preliminar para seleccionar el tamaño de partícula a utilizar en este experimento. (Observar Anexo B)

Para los dos factores se tomó distintos niveles:

- Temperatura: Se trabajó con tres niveles para poder verificar el comportamiento de la variación de la temperatura respecto al tiempo.
- Tiempo: Se trabajó con cuatro niveles para poder determinar la máxima cantidad extraída respecto al tiempo.

Por lo tanto el diseño corresponde a un modelo experimental:

$$3^1 * 4^1 = 12 \text{ pruebas}$$

Se realizo 12 pruebas con réplica de cada factor.

Los factores:

A= Temperatura

B= Tiempo de extracción

Tabla II-2. Parámetros para el proceso de obtención de aceite de chía

Temperatura (°C)	55-65-75
Tiempo (h)	2-4-6-8

Fuente: Elaboración propia

Bajo (-) = Es el valor pequeño con el que se trabaja

Medio (0) = Es el valor medio con el que se trabaja

Alto (+) = Es el valor alto con el que se trabaja

Tabla II-3. Rangos del proceso de obtención de aceite de chía

Rangos	Bajo (-)	Medio (0)	Alto (+)
Temperatura (°C)	55	65	75
Niveles			
	1	2	3
Tiempo (h)	2	4	6
			8

Fuente: Elaboración propia

Tabla II-4. Matriz de variables para el proceso de obtención de aceite de chía

Muestra	A (Temperatura)	B (Tiempo de extracción)	Respuesta I Aceite (%)	Respuesta II Aceite (%)
1	-1	1	Y1	Y1
2	-1	2	Y2	Y2
3	-1	3	Y3	Y3
4	-1	4	Y4	Y4
5	0	1	Y5	Y5
6	0	2	Y6	Y6
7	0	3	Y7	Y7
8	0	4	Y8	Y8
9	1	1	Y9	Y9
10	1	2	Y10	Y10
11	1	3	Y11	Y11
12	1	4	Y12	Y12

Fuente: Elaboración propia

Respuesta (Y) = % de aceite extraído

2.3. DESCRIPCIÓN DE LOS EQUIPOS Y MATERIALES UTILIZADOS EN LA OBTENCIÓN DEL ACEITE DE CHÍA

En el presente trabajo de investigación se utilizó los equipos y materiales que se describen a continuación.

2.3.1. EXTRACTOR SOXHLET

El extractor soxhlet es un equipo que está compuesto por una serie de materiales (refrigerante, balón, calentador, extractor y mangueras), utilizado para la extracción de la materia grasa presente en una muestra sólida.

El refrigerante de vidrio mide aproximadamente 30 cm de largo en cuyo extremo se encuentra la entrada del agua de enfriamiento y en paralela la salida del mismo. El extractor de vidrio tiene dos brazos; el brazo de vapor que asciende hasta llegar a la parte superior donde se encuentra la cámara del sólido que está contenido dentro de un cartucho de 10 gramos de capacidad. El otro brazo en forma de U sobrepuesta es el retorno del solvente de la cámara de sólido hasta el balón donde se encuentra el solvente. El balón es de 250 ml de capacidad en el cual este se introduce dentro del calentador termostatzado que tiene un nivel de temperatura de un mínimo, medio y máximo.

Este equipo está conformado por seis extractores, cada uno independiente del otro, sin embargo, el agua de refrigeración está conectada en serie para evitar el consumo excesivo de agua.

Figura 2-1. Extractor soxhlet



Fuente: Elaboración propia

2.3.2. TAMIZ VIBRATORIO

El tamiz vibratorio se utilizó para la clasificación granulométrica de la muestra. Es un equipo de fácil manejo de modo que está sujeto a la mesa de trabajo sin la necesidad de sujetar. Está compuesto por un juego de mallas de 4, 2, 1, 0.5, 0.25, 0.065 mm y una bandeja de recipiente de muestra.

Figura 2-2. Tamiz vibratorio



Fuente: Elaboración propia

2.3.3. BALANZA ANALÍTICA

La balanza analítica se utilizó para el pesaje de la muestra durante todo el proceso de la extracción del aceite de semilla de chía. Esta balanza consta de una pantalla digital y tiene una precisión de 0.001g.

Figura 2-3. Balanza analítica



Fuente: Elaboración propia

2.3.4. MOLINO

El molino manual de carácter doméstico se utilizó para la reducción de tamaño de la materia prima (semilla de chía) para poder de esta manera aumentar la superficie de contacto facilitando así el proceso de extracción.

Figura 2-4. Molino manual



Fuente: Elaboración propia

2.3.5. ESTUFA

La estufa se utilizó para evaporar todo el solvente residual que quedó después de la destilación de la mezcla solvente-aceite. Este equipo es automatizado en el cual se introduce los parámetros de trabajo.

Figura 2-5. Estufa



Fuente: Elaboración propia

2.3.6. MATERIALES DE LABORATORIO

Tabla II-5. Materiales de laboratorio

Material	Especificación	Cantidad
Extractor soxhlet	Mediano	6
Balón	250 ml	8
Soporte universal	-	1
Mangueras	-	6
Pinzas doble nuez	-	6
Probeta	100ml	1
Probeta	50ml	1
Tubos de ensayo	-	6
Vidrio reloj	Mediano	6
Cajas petri	Mediano	2
Cucharilla	Pequeña	1
Codos		4
Cartuchos	10 g	8
Embudo	Pequeño	1
Frascos de vidrio	5ml	16
Termómetro	100°C	2

Fuente: Elaboración propia

2.3.7. REACTIVO

- n-Hexano: Reactivo químico utilizado como solvente en la extracción del aceite de chía.

El n-Hexano (C_6H_{14}) es un líquido incoloro y de olor característico e inmiscible en el agua. En la tabla siguiente se muestra las especificaciones del n-Hexano.

Tabla II-6. Especificación del n-Hexano

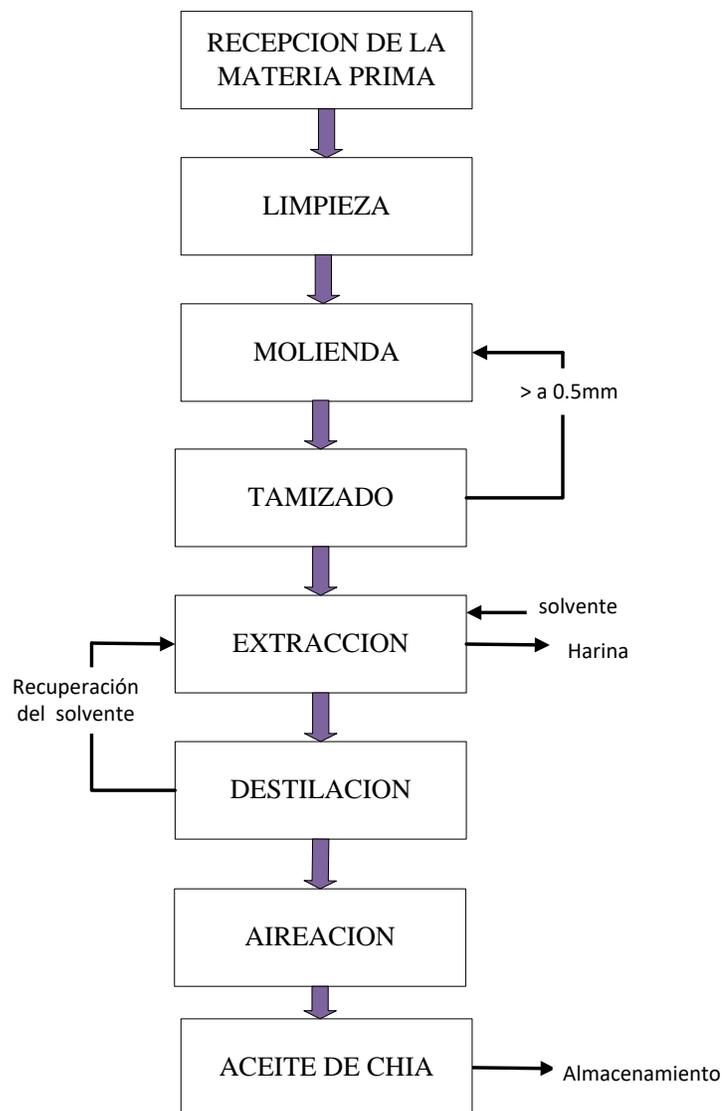
Propiedades físico químicas	
Aspecto	Transparente e incoloro
Olor	Característico
Densidad a 20°C	0.66 /cm ³
Punto de ebullición	(63-69)°C
Punto de fusión	-95°C
Punto de inflamación	-22°C
Temperatura de ignición	240°C
Límite de explosión	(1.1/7.4) % volumen
Solubilidad	Inmiscible con agua

Fuente: Elaboración propia

2.4. DESCRIPCIÓN DEL PROCESO DE OBTENCIÓN DE ACEITE DE CHÍA

El proceso de extracción de aceite de chía se presenta en el siguiente diagrama de flujo.

Figura 2- 6. Diagrama de flujo del proceso de extracción de aceite de chía



Fuente: Elaboración propia

2.4.1. RECEPCIÓN DE LA MATERIA PRIMA

La materia prima que se utilizó para la obtención de aceite fue la semilla de chía con nombre científico *Salvia Hispanica L*, adquirida de Cabexse una empresa encargada de cultivo de chía y sésamo.

2.4.2. LIMPIEZA

La limpieza se realizó de forma manual, para lo cual se usó una caja petri en cuyo interior se introdujo la semilla de chía (Figura 2-7.) y se eliminaron las partículas extrañas como piedrecillas.

Figura 2-7. Limpieza de la semilla de chía



Fuente: Elaboración propia

2.4.3. MOLIENDA

El proceso previo a la molienda es el secado, pero debido que la semilla de chía contiene 7,9% de humedad no es necesario realizar el secado del mismo, por ello es directamente sometido a la molienda.

El objetivo de la molienda es producir pequeñas partículas a partir de otras más grandes. Las partículas más pequeñas son deseables por su gran superficie de contacto. El área superficial de una unidad de masa de partículas aumenta mucho cuando las partículas disminuyen de tamaño.

La semilla de chía se llevó a un molino manual en el que se introdujo 100 gramos, de modo que las partículas obtenidas después de la molienda no son uniformes, es necesario que pase por una tamizadora, para obtener partículas de un tamaño uniforme

Figura 2-8. Molienda de la materia prima



Fuente: Elaboración propia

2.4.4. TAMIZADO

La semilla molida se sometió a un proceso de tamizado empleando diferentes tamices con tamaño de mallas de 2, 1, 0.5, 0.25 y 0.0065mm. Se tomó 80 gramos de semilla molida y se introdujo la misma en el tamiz vibratorio, ordenando las mallas de mayor a menor, se tamizó durante 15 minutos; se observó mayor retención en los tamices de malla 1mm y 0.5mm quedando una mínima parte en el tamiz de malla 0.25mm.

2.4.5. EXTRACCIÓN

La extracción de aceite de chía se llevó a cabo en el extractor soxhlet usando n-hexano como solvente, en el cual su punto de ebullición en las condiciones atmosféricas de Tarija es de 65°C.

Primeramente se pesó 10 gramos de semilla molida (0.5mm), con la ayuda de una espátula se introdujo dentro del cartucho. Se utilizó algodón para cerrar el cartucho con la finalidad de evitar que la semilla molida tienda a flotar y sea arrastrada por el solvente en el proceso de extracción (Figura 2-8). Los cartuchos se codificaron de acuerdo a las muestras experimentales y se introdujeron dentro del extractor.

Figura 2-9. Cartuchos con harina de chía dentro del extractor



Fuente: Elaboración propia

Posteriormente se introdujo el solvente n-hexano dentro del balón trabajando con una relación de 1:15, es decir, 150 ml de solvente por 10 g de harina de chía. Esta relación es muy importante de manera que cuando el vapor de n-hexano ascienda a la cámara donde está el cartucho, el balón no quede seco y se pueda evitar ocasionar una explosión.

Una vez que el equipo de extracción está armado se procedió a calentar el solvente hasta su punto de ebullición; los vapores del mismo ascienden por el cuello del balón, pasando por el brazo del extractor y llegando hasta el refrigerante donde el vapor se condensa por contacto del agua fría, la misma desciende en forma de gotas dentro de la cámara donde se encuentra el cartucho; en esta etapa es donde entran en contacto la harina de chía con el solvente, a medida que el condensado va cayendo, la cámara se

va llenando con solvente, una vez llegado al tope del sifón la mezcla aceite-solvente retorna al balón. Se repite el mismo proceso la cantidad de veces necesarias hasta que la muestra quede agotada.

Figura 2-10. Extracción de aceite de semilla de chía



Fuente. Elaboración propia

Terminado el proceso de extracción se obtiene la materia desaceitada denominada harina y la mezcla aceite-solvente se procede a destilar para recuperar el solvente empleado.

Figura 2-11. Harina de chía agotada



Fuente: Elaboración propia

2.4.6. DESTILACIÓN

La mezcla solvente-aceite se procede a destilar en el equipo de destilación simple usando el mismo calentador y refrigerante del extractor soxhlet. El balón que contiene la muestra es conectado con una cabeza de destilación que tiene una entrada al balón y dos salidas, una al refrigerante y otra al termómetro que mide la temperatura del proceso. La salida del refrigerante está conectada mediante codo con un balón recolector de solvente (Figura 2-11).

Figura 2-12. Destilación de la mezcla solvente-aceite



Fuente: Elaboración propia

El proceso de destilación consiste en separar el solvente del aceite, debido a su gran volatilidad y su diferencia de punto de ebullición. El proceso se llevó a cabo a una temperatura de 70°C; transcurridos 10 minutos de inicio del proceso, el solvente empieza a evaporarse pasando por el refrigerante; posteriormente empieza a condensarse saliendo hacia el balón colector. El proceso dura aproximadamente 50 minutos, cuando se observa una recuperación casi completa del solvente.

2.4.7. AIREACIÓN

El balón con la muestra de aceite es llevado a una estufa para evaporar el hexano residual que hubiera quedado dentro del mismo. Este proceso se lleva a cabo durante dos horas a una temperatura de 100°C.

Figura 2-13. Aireación del solvente



Fuente: Elaboración propia

2.4.8. ALMACENAMIENTO

El producto final (aceite de chía) se procedió a almacenar en pequeños recipientes de vidrio bien cerrados para evitar su descomposición.

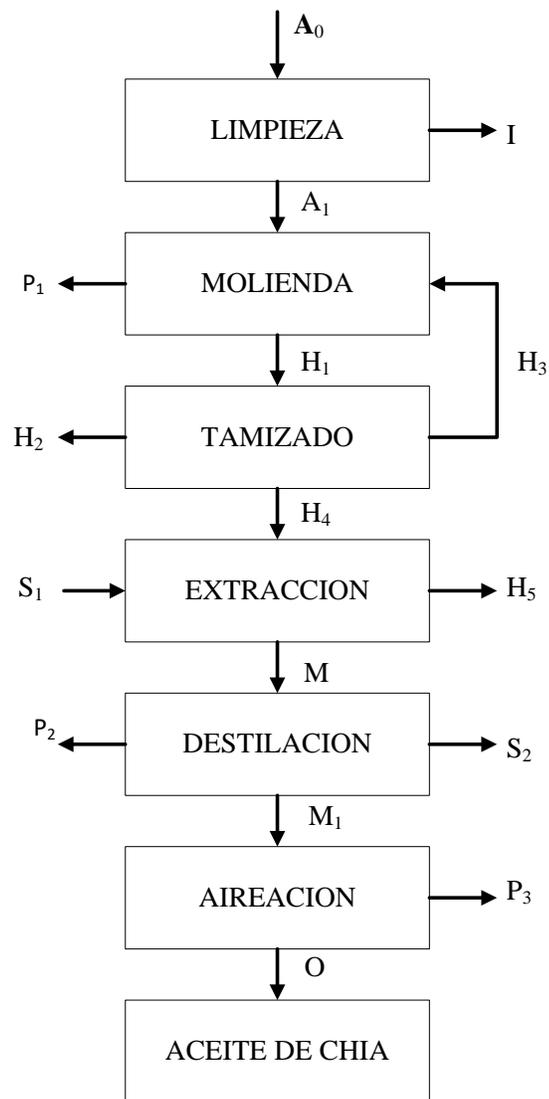
Figura 2-14. Almacenamiento del aceite de chía



Fuente: Elaboración propia

2.5. BALANCE DE MATERIA EN EL PROCESO DE EXTRACCIÓN DE ACEITE DE CHÍA

Figura 2-15. Balance de materia en el proceso de extracción de aceite de chía



Fuente: Elaboración propia

A_0 = Semilla de chía

I = Impurezas

A_1 = Semilla limpia

P_1 = Pérdida en la molienda

H_1 = Harina de chía

H_2 = Harina de chía (< 0.5mm de partícula)

H_3 = Harina de chía (> 0.5mm de partícula)

H_4 = Harina de chía (=0.5mm de partícula)

S_1 = Solvente (n-hexano)

H_5 = Harina de la chía después de la extracción

M = Mezcla de aceite y solvente

S_2 = Solvente recuperado

P_2 = Pérdida de solvente en la destilación

M_1 = Mezcla de aceite y trazas de solvente

P_3 = Pérdida de solvente

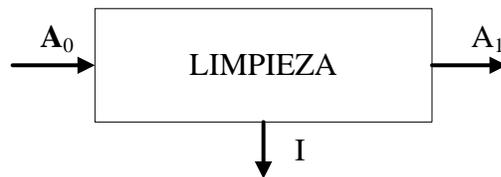
O = Aceite crudo de chía

2.5.1. BALANCE DE MATERIA EN LA LIMPIEZA

DATOS

A_0 (Entrada) = 25g

I (Impurezas) = 0,877g



$$A_0 = A_1 + I$$

$$A_1 = A_0 - I$$

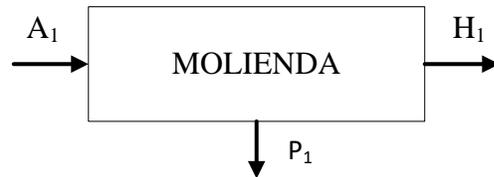
$$A_1 = 25g - 0.877g = 24.123g$$

2.5.2. BALANCE DE MATERIA EN LA MOLIENDA

DATOS

$$A_1 = 24.123g$$

$$P_1 (\text{Pérdida}) = 1.657g$$



$$A_1 = P_1 + H_1$$

$$H_1 = A_1 - P_1$$

$$H_1 = 24.123g - 1.657g = 22.466g$$

2.5.3. BALANCE DE MATERIA EN EL TAMIZADO

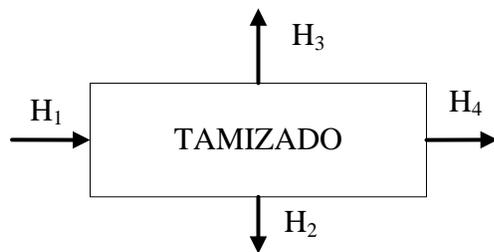
DATOS

$$H_1 = 22.466g$$

$$H_2 = 0.946g$$

$$H_3 = 11.136g$$

$$H_1 = H_2 + H_3 + H_4$$



$$H_4 = H_1 - H_3 - H_2$$

$$H_4(0.5mm) = 22.466g - 0.946g - 11.136g = 10.384g$$

2.5.3. BALANCE DE MATERIA EN LA EXTRACCIÓN

DATOS

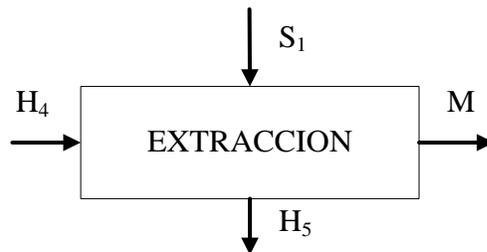
$$H_4 = 10.384g$$

$$\rho (\text{solvente}) = 0.6548 \text{ g/ml}$$

$$M (\text{solvente}) = 0.6548\text{g/ml} * 150\text{ml} = 98.22 \text{ g}$$

$$S_1 (\text{solvente puro}) = 98.22g$$

$$H_5 = 6.916g$$



$$H_4 + S_1 = H_5 + M$$

$$M = H_4 + S_1 - H_5$$

$$M = 10.384g + 98.22g - 6.916g$$

$$M = 101.688 \text{ g}$$

2.5.4. BALANCE DE MATERIA EN LA DESTILACIÓN

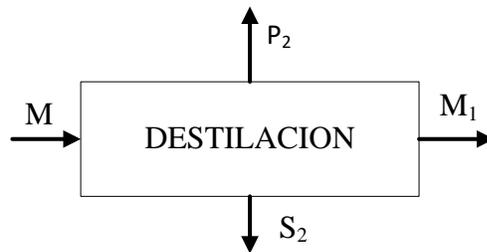
DATOS

$$M = 101.688g$$

$S_2 =$ Recuperación del solvente 80%

$$S_2 = S_1 * 0.7 = 98.220 * 0.7 = 78.576g$$

$$M_1 = 3.842g$$



$$M = P_2 + S_2 + M_1$$

$$P_2 = M - M_1 - S_2$$

$$P_2 = 101.688g - 3.842g - 78.576g$$

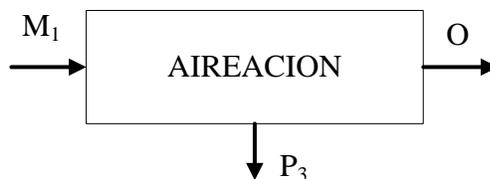
$$P_2 = 19.270g$$

2.5.5. BALANCE DE MATERIA EN EL PROCESO DE AIREACIÓN

DATOS

$$M_1 = 3.842g$$

$O = 3.314g$ (se determinó por diferencia de peso)



$$M_1 = P_3 + O$$

$$P_3 = M_1 - O$$

$$P_3 = 3.842g - 3.314g$$

$$P_3 = 0.528g$$

$$O \text{ (Aceite de chía)} = 3.314g$$

2.6. BALANCE DE ENERGÍA EN EL PROCESO DE EXTRACCIÓN DE ACEITE DE CHÍA

Se realizó el balance de energía solo en los procesos que lo requieren, como ser en la extracción y la destilación donde ocurre transferencia de energía en forma de calor.

Ecuación para realizar en balance total de energía:

$$\text{Calor saliente del sistema} - \text{Calor entrante al sistema} = \text{Acumulación} \quad (\text{Ec. 2-1})$$

En la ecuación 2-1 la acumulación es igual a cero debido a que la energía entrante es igual a la energía saliente, por lo tanto se tiene la siguiente ecuación 2-2.

$$Q_c = Q_g \quad \text{Ec. 2-2}$$

$$Q_c = \text{Calor cedido}$$

$$Q_g = \text{Calor ganado}$$

La ecuación para calcular lo ganado o perdido por una sustancia sin cambio de fase es la siguiente:

$$Q = mC_p(T_f - T_i) \quad \text{Ec. 2-3}$$

Donde:

Q= Calor

m= masa del cuerpo

C_p= Capacidad calorífica del cuerpo

T_f = Temperatura final

T_i = Temperatura inicial

La ecuación para calcular el calor ganado o perdido por una sustancia con cambio de fase es la siguiente:

$$Q_{latente} = m_c * \lambda_{vap} \quad \text{Ec. 2-4}$$

$Q_{latente}$ = Calor cedido o ganado durante un cambio de fase

m_c = masa del cuerpo

λ_{vap} = Lambda de vaporización del cuerpo

2.6.1. BALANCE DE ENERGÍA EN LA EXTRACCIÓN

Aplicando la ecuación 2-2 se realizó el cálculo de energía para un proceso de extracción en estado estacionario.

$$Q_{cal} = Q_{solv}$$

Donde:

Q_{cal} =Calor cedido por el calentador eléctrico

Q_{solv} =Calor ganado por el solvente

Para calcular el calor ganado por el solvente se aplica y desarrolla la ecuación 2-2.

$$Q_{solv} = Q_{sensible} + Q_{latente}$$

Donde:

Q_{solv} = Calor ganado por el solvente durante el proceso de extracción

$Q_{sensible}$ = Calor sensible ganado por el solvente

$Q_{latente}$ = Calor latente ganado por el solvente

Para calcular el calor sensible ganado por el solvente se aplica la ecuación 2-3.

$$Q_{sensible} = m_s C_{p_s} (T_f - T_i)$$

Donde:

Q = Calor sensible ganado por el solvente

m_s (masa del solvente) = 98.22g = 0.09822 kg

C_{p_s} (Capacidad calorífica del solvente) = 0.62 Kcal/kg °C (Perry, 1996)

T_f (Temperatura final de extracción) = 65 °C

T_i (Temperatura inicial de extracción) = 23°C

Reemplazando todos los valores en la ecuación anterior:

$$Q_{sensible} = 0.09822 \text{kg} * 0.62 \frac{\text{kcal}}{\text{kg} * ^\circ\text{C}} (65 - 23)^\circ\text{C}$$

$$Q_{sensible} = 2.558 \text{ kcal}$$

Para determinar el calor latente ganado por el solvente se aplica la ecuación 2-4.

$$Q_{latente} = m_s * \lambda_{vap}$$

Donde:

Q = Calor latente ganado por el solvente

m_s (masa del solvente que se evapora cada 2min) = 64g = 0.064 kg

λ_{vap} (Calor latente de evaporación del solvente a temperatura 65°C) = 80Kcal/kg
(Perry, 1996)

Reemplazando los datos en la ecuación anterior:

$$Q_{latente} = 0.064 \text{ kg} * 80 \frac{\text{kcal}}{\text{kg}}$$

$$Q_{latente} = 5.120 \text{ kcal}$$

El calor para evaporar el solvente cada 2 minutos es de 5.120 Kcal. El tiempo de extracción con mayor rendimiento es de 8 horas, la cantidad de veces que carga el soxhlet es de 240 veces en todo el proceso, entonces el calor necesario es de (5.120Kcal*240) 1228.800 Kcal.

Reemplazando los valores de $Q_{sensible}$ y $Q_{latente}$ en la ecuación del calor cedido al solvente:

$$Q_{solv} = Q_{sensible} + Q_{latente}$$

$$Q_{solv} = 2.558 \text{ Kcal} + 1228.8 \text{ Kcal}$$

$$Q_{solv} = 1231.358 \text{ kcal}$$

Reemplazando el valor de Q_{solv} en la ecuación de calor total cedido por el calentador durante el proceso de extracción:

$$Q_{cal} = Q_{solv}$$

$$Q_{cal} = 1231.358 \text{ kcal}$$

El calor total cedido por el calentador eléctrico durante el proceso de extracción del aceite de chía es de 1231.358 Kcal.

2.6.2. BALANCE DE ENERGÍA EN LA DESTILACIÓN

Aplicando y desarrollando la ecuación 2-2. En el proceso de destilación se tiene:

$$Q_{cal2} = Q_{solv2} + Q_{aceite}$$

Donde:

Q_{cal2} = Calor cedido por el calentador eléctrico en la destilación

Q_{solv2} = Calor ganado por el solvente

Aceite = Calor ganado por el aceite

Para determinar el calor ganado por el aceite durante el proceso de destilación se aplica la siguiente ecuación:

$$Q_{gA} = m_A C_{pA} (T_d - T_o)$$

Donde:

C_{GA} = Calor ganado por el aceite

M_i (masa del aceite) = 3.314g = 0.003314kg

C_{pa} (Calor específico del aceite) = 0.5 Kcal/kg°C

T_d (Temperatura de destilación) = 70°C

T_o (Temperatura inicial de destilación) = 25°C

Reemplazando todos los valores en la ecuación anterior:

$$Q_{gA} = 0.003314kg * 0.50 \frac{Kcal}{kg * ^\circ C} (70 - 25)^\circ C$$

$$Q_{gA} = 0.074565 Kcal$$

Para calcular el calor ganado por el solvente durante la destilación se aplica y desarrolla la ecuación 2-2.

$$Q_{solv2} = Q_{sensible2} + Q_{latente2}$$

Donde:

Q_{solv2} = Calor ganado por el solvente durante el proceso de destilación

$Q_{sensible2}$ = Calor sensible ganado por el solvente

$Q_{latente2}$ = Calor latente ganado por el solvente

Para calcular el calor sensible ganado por el solvente se aplica la ecuación 2-3.

$$Q_{sensible2} = m_s C_{p_s} (T_d - T_o)$$

Donde:

$Q_{sensible2}$ = Calor sensible ganado por el solvente

m_s (masa del solvente) = 98.22g = 0.09822kg

C_{p_s} (Capacidad calorífica del solvente) = 0.62 Kcal/kg °C (Perry, 1996)

T_d (Temperatura de destilación) = 70°C

T_o (Temperatura inicial de destilación) = 25°C

Reemplazando todos los valores en la ecuación anterior:

$$Q_{sensible} = 0.09822kg * 0.62 \frac{kcal}{kg * ^\circ C} (70 - 25)^\circ C$$

$$Q_{sensible} = 2.740kcal$$

Para determinar el calor latente ganado por el solvente se aplica la ecuación 2-4.

$$Q_{latente2} = m_s * \lambda_{vap}$$

Donde:

$Q_{latente2}$ = Calor latente ganado por el solvente

m_s (masa del solvente que se evapora) = 78.576g = 0.078576 kg

λ_{vap} (Calor latente de evaporación del solvente) = 80 Kcal/kg (Perry, 1996)

Reemplazando los datos en la ecuación anterior:

$$Q_{latente} = 0.078576 kg * 80 \frac{kcal}{kg}$$

$$Q_{latente} = 6.286 \text{ kcal}$$

Reemplazando los valores en la ecuación del calor total ganado por el solvente:

$$Q_{solv2} = (2.740 + 6.286)Kcal$$

$$Q_{solv2} = 9.026 \text{ Kcal}$$

Reemplazando los valores de calor ganado del aceite y del solvente se tiene el siguiente resultado:

$$Q_{cal2} = Q_{solv2} + Q_{aceite}$$

$$Q_{cal2} = (0.074565 + 9.026)Kcal$$

$$Q_{cal2} = 9.101 \text{ Kcal}$$

El calor total cedido por el calentador eléctrico durante el proceso de destilación es de 9.101 Kcal.

2.7. CARACTERIZACIÓN DEL ACEITE DE CHÍA

Para poder determinar las características fisicoquímicas del producto obtenido (aceite de chía), se realizaron análisis en el laboratorio CEANID dependiente de la Universidad Juan Misael Saracho y en el Centro de Ingeniería Química (CIQ) ubicada en la ciudad de Cochabamba.

2.7.1. ANÁLISIS FISICOQUÍMICOS DEL ACEITE DE CHÍA

Los resultados de los análisis físico-químicos del aceite de chía, obtenido en el ensayo experimental, se muestran en la siguiente tabla II-7.

Tabla II-7. Características fisicoquímicas del aceite de chía

PARÁMETRO	UNIDAD	RESULTADO
Acidez	%	0,64
Densidad relativa (20°C)		0,9320
Índice de peróxido	mEqO ₂ /kg	8,05
Índice de refracción (20°C)		1,4791
Índice de rancidez	Pos/neg	Negativo

Fuente: CEANID, 2016 (Ver anexo A)

2.7.2. DETERMINACIÓN DE CONTENIDO DE ÁCIDOS GRASOS EN EL ACEITE DE CHÍA

Los resultados de perfil de ácidos grasos en el aceite de chía se muestran en la tabla siguiente:

Tabla II-8. Perfil de ácidos grasos saturados e insaturados en el aceite chía

PERFIL DE ÁCIDOS GRASOS	UNIDADES	RESULTADOS
C16:0 Ácido Palmítico	%	6,65
C18:0 Ácido esteárico	%	2,82
C18:1 w9 Ácido oleico	%	3,39
C18:2 w6 Ácido linoléico	%	21,58
C18:3 w3 Ácido alfa-linolénico	%	65,56

Fuente: CIQ, 2016 (Ver anexo A)

CAPÍTULO III
RESULTADOS Y DISCUSIONES

3.1. ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO DE LA MATERIA PRIMA

El análisis granulométrico se llevó a cabo en el Laboratorio de Operaciones Unitarias (LOU) dependiente de la Universidad Autónoma Juan Misael Saracho.

Para moler la semilla de chía se usó un molino manual de discos el cual permite el rompimiento de la semilla; posteriormente se cargó 90 gramos de semilla molida al tamiz; los resultados se lo muestran en la siguiente tabla III-3.

Tabla III-1. Datos del análisis granulométrico de la semilla de chía

Abertura de malla (mm)	Peso de la malla vacía (g)	Peso de malla con muestra (g)	Rechazo	% Rechazo
1	433,3	483,094	49,794	55,327
0,5	443,9	482,527	36,727	40,808
0,25	417,9	421,379	3,479	3,865
0,063	389,5	389,6	0	0

Fuente: Elaboración propia

Debido a que la semilla de chía tiene un tamaño menor a 2mm se trabajó solo con las mallas de 1; 0,5; 0,25 y 0,063, teniendo mayor rechazo en la malla de 1mm 55,327%, en la malla de 0,5mm 40,808% y en la malla 0.25mm 3.865%.

Al tener mayor rechazo en las mallas 1, 0,5; y 0.25mm se hizo un estudio preliminar de extracción para seleccionar el tamaño óptimo de partícula, en el cual solo se trabajó con partículas de 1 y 0.5mm, no se incluyó el tamaño de 0.25mm, debido que este es un tamaño muy pequeño y puede conglomerarse formando una especie de masa la cual dificulta el proceso de extracción. (Ver anexo B)

Se optó por utilizar un tamaño de 0.5mm, por el cual se obtiene mayor rendimiento de extracción

3.2. ANÁLISIS ESTADÍSTICO DEL DISEÑO EXPERIMENTAL

El diseño experimental se realizó con el asesoramiento del docente (Ing. Ignacio Velásquez). Para llevar a cabo el análisis estadístico, se utilizó el programa **SPSS** (*Statistical Package for the Social Sciences*) para Windows, el cual permite obtener resultados más representativos y confiables.

Los resultados obtenidos de cada combinación tiempo y temperatura de extracción (T-t) facilitan obtener la variable respuesta más significativa en el proceso de extracción. La variable respuesta puede ser expresada en porcentaje de aceite de chía o también en masa de aceite de chía obtenido.

En la siguiente tabla III-4. se muestra los resultados obtenidos de cada experimento a diferentes temperaturas.

Tabla III-2. Datos experimentales del proceso de extracción de aceite de chía

FACTORES		RESPUESTA I		RESPUESTA II	
Temperatura (T)	Tiempo (t)	Aceite (g)	Aceite (%)	Aceite (g)	Aceite (%)
55°C	2	2,719	27,19	2,821	28,21
	4	3,091	30,91	3,187	31,87
	6	3,208	32,08	3,257	32,57
	8	3,289	32,89	3,281	32,81
65°C	2	2,849	28,49	3,008	30,08
	4	3,254	32,54	3,254	32,54
	6	3,303	33,03	3,289	32,89
	8	3,313	33,13	3,314	33,14
75°C	2	2,979	29,79	2,995	29,95
	4	3,163	31,63	3,103	31,03
	6	3,278	32,78	3,294	32,94
	8	3,293	32,93	3,308	33,08

Fuente: Elaboración propia

El proceso de extracción se realizó con un solo tamaño de partícula de 0,5mm; se empleó tres temperaturas para el proceso combinando con los distintos tiempos de extracción, abarcando desde 2 horas hasta 8 horas; el mayor porcentaje de aceite de

chía se obtuvo trabajando con una temperatura de 65°C (Temperatura de punto de ebullición) y con el tiempo mayor de extracción de 8 horas teniendo un rendimiento de 33,14%; este valor es muy cercano al resultado de análisis realizado en el CEANID y al que se tiene en la bibliografía. Esto demuestra que la semilla de chía tiene un alto contenido de aceite.

3.2.1. ANÁLISIS DE VARIANZA (ANOVA)

El análisis de varianza muestra la influencia de las variables en el proceso de extracción (tiempo y temperatura), sobre la variable respuesta (Rendimiento). Así mismo, se dan las interacciones entre las variables que influyen en dicho rendimiento. En la siguiente tabla III-3 se muestra los datos para el cálculo de análisis de varianza.

Tabla III-3. Datos para el cálculo del análisis de varianza

Temperatura (T)	Tiempo (t)	Temp tiemp	Rendimiento
-1	1	-1	27.19
-1	2	-2	30.91
-1	3	-3	32.08
-1	4	-4	32.89
0	1	0	28.49
0	2	0	32.54
0	3	0	33.03
0	4	0	33.13
1	1	1	29.79
1	2	2	31.63
1	3	3	32.78
1	4	4	32.93
-1	1	-1	28.21
-1	2	-2	31.87
-1	3	-3	32.57
-1	4	-4	32.81
0	1	0	30.08

0	2	0	32.54
0	3	0	32.89
0	4	0	33.14
1	1	1	29.95
1	2	2	31.03
1	3	3	32.94
1	4	4	33.08

Fuente: SPSS, 2016

La tabla III-3 muestra los datos introducidos al programa SPSS para el cálculo del ANOVA, cuyos resultados se muestran a continuación.

Tabla III-4. Factores inter-sujetos

Factores inter-sujetos		N
Temperatura	-1,00	8
	,00	8
	1,00	8
tiempo	1,00	6
	2,00	6
	3,00	6
	4,00	6

Fuente: SPSS, 2016

La tabla III-4 muestra el número de ensayos realizados por cada factor, siendo de 8 ensayos para la temperatura y 6 ensayos para el tiempo de extracción.

Tabla III-5. Análisis de varianza (ANOVA)**Pruebas de los efectos inter-sujetos**

Variable dependiente: RENDI

Origen	Suma de cuadrados tipo III	gl	Media cuadrática	F	Sig.
Modelo corregido	68,836 ^a	11	6,258	28,938	,000
Intersección	23971,760	1	23971,760	110852,071	,000
Temperatura	3,655	2	1,828	8,451	,005
tiempo	61,386	3	20,462	94,622	,000
Temperatura * tiempo	3,795	6	,633	2,925	,054
Error	2,595	12	,216		
Total	24043,192	24			
Total corregida	71,431	23			

a. R cuadrado = .964 (R cuadrado corregida = .930)

Fuente: SPSS, 2016

Se puede observar en la tabla III-5 que las variables analizadas (tiempo y temperatura) son significativas, teniendo un nivel de confianza del 95% y una significancia menor al 5%, la intersección Temp*tiemp no son significantes debido a que tiene una significancia mayor a 5% o 0,05; de tal modo los dos factores tiempo y temperatura influyen directamente en el rendimiento de aceite extraído y serán las variables utilizadas para el modelo matemático del proceso de extracción.

En la tabla III-6 se muestra las variables introducidas para el cálculo del modelo matemático en el proceso de extracción.

Tabla III-6. Variables introducidas para el modelo matemático**Variables introducidas/eliminadas**

Modelo	Variables introducidas	Variables eliminadas	Método
1	tiempo, Temperatura ^a	.	Introducir

a. Todas las variables solicitadas introducidas.

Fuente: SPSS, 2016

Tabla III-7. ANOVA^b para el modelo matemático

Modelo		Suma de cuadrados	gl	Media cuadrática	F	Sig.
1	Regresión	53,417	2	26,708	31,135	,000 ^a
	Residual	18,014	21	,858		
	Total	71,431	23			

a. Variables predictoras: (Constante), tiempo, Temperatura

b. Variable dependiente: RENDI

Fuente: SPSS, 2016

Tabla III-8. Coeficientes del modelo matemático

Modelo		Coeficientes no estandarizados		Coeficientes tipificados	t	Sig.	Intervalo de confianza de 95.0% para B	
		B	Error típ.	Beta			Límite inferior	Límite superior
1	(Constante)	28,330	,463		61,175	,000	27,367	29,293
	Temperatura	,350	,232	,166	1,512	,146	-,132	,832
	tiempo	1,310	,169	,849	7,745	,000	,958	1,661

a. Variable dependiente: RENDI

Fuente: SPSS, 2016

De la tabla III-8 se determinó los Coeficientes matemático del proceso de extracción; la ecuación es la siguiente:

$$\text{Rendimiento} = 28,33 + 0,35\text{Temperatura} + 1,31\text{tiempo}$$

La ecuación del rendimiento es más afectada por el tiempo debido a que cuando mayor sea el tiempo mayor rendimiento tendrá en el proceso.

3.3. DETERMINACIÓN DE LOS COEFICIENTES DE DIFUSIÓN EN LA EXTRACCIÓN DEL ACEITE DE CHÍA

Como se mostró en el capítulo anterior, el coeficiente de difusión se lo puede determinar usando la siguiente ecuación:

$$\text{Log} \frac{q_{\theta}}{q_0} = a - 4.286 \frac{D}{d^2} \theta$$

El valor de “a” es una constante que es determinada mediante los análisis experimentales, y los valores de D se obtienen mediante una regresión lineal de los valores experimentales de la cantidad de aceite retenido en la semilla después del tiempo θ de la extracción a la temperatura de cada prueba. Para cuantificar la cantidad de aceite que queda en la semilla después de un tiempo θ se realizaron cálculos basados en balance de masa durante el proceso de extracción.

3.3.1. DETERMINACIÓN DEL COEFICIENTE DE EXTRACCIÓN PARA CADA TEMPÉRATURA (55°C, 65°C Y 75°C)

En la siguiente tabla III-9. se muestra los resultados de los valores experimentales de cada prueba con la variación de temperatura y tiempo, para un solo tamaño de partícula (0,5mm).

Tabla III-9. Valores experimentales obtenidos para la determinación del coeficiente de difusión para cada temperatura.

Temperatura	tiempo	Aceite extraído (g)	q_{θ}/q_0	fracción de aceite retenido	$\text{Log}(q_{\theta}/q_0)$
55°C	0	0	0	1	0
	2	2,719	0,820	0,180	-0,745
	4	3,091	0,932	0,068	-1,168
	6	3,208	0,967	0,033	-1,487
	8	3,289	0,992	0,008	-2,089
65°C	0	0	0,000	1,000	0,000

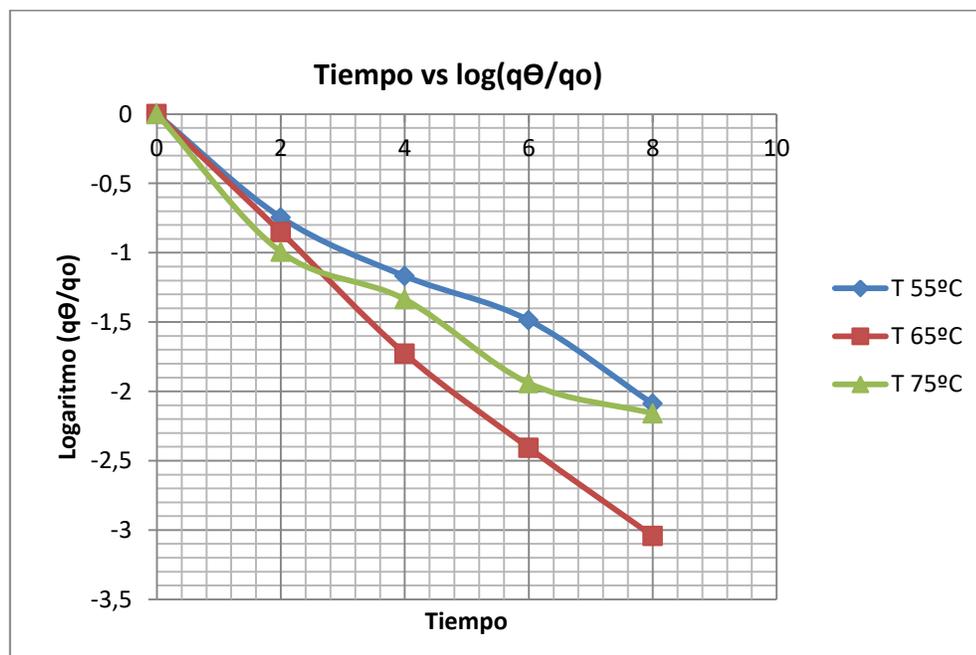
	2	2,849	0,859	0,141	-0,851
	4	3,254	0,981	0,019	-1,728
	6	3,303	0,996	0,004	-2,407
	8	3,313	0,999	0,001	-3,043
75°C	0	0	0,000	1,000	0,000
	2	2,979	0,898	0,102	-0,993
	4	3,163	0,954	0,046	-1,336
	6	3,278	0,989	0,011	-1,941
	8	3,293	0,993	0,007	-2,159

Fuente: Elaboración propia

Con estos datos experimentales se realizó la figura 3-2. para cada temperatura; con esta misma se determina la función.

$$\text{Log} \frac{q_{\theta}}{q_0} = a - b\theta$$

Figura 3-1. Tiempo vs logaritmo de aceite retenido ((q_{θ}/q_0) para cada temperatura



Fuente. Elaboración propia

Para determinar la función de la gráfica se introdujeron los datos al programa SPSS y se realizó la regresión lineal de la misma, cuyo resultado completo se lo puede ver en el anexo D.

Los resultados se muestran a continuación:

a) La función de la gráfica para una temperatura de 55°C es la siguiente:

$$\text{Log} \frac{q_{\theta}}{q_0} = -0,414 - 0,407\theta$$

$$b = 4,286 \frac{D}{d^2} = 0,407$$

$$D = \frac{0,407 * d^2}{4,286} = 6,583 * 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$$

b) La función de la gráfica para una temperatura de 65°C es la siguiente:

$$\text{Log} \frac{q_{\theta}}{q_0} = -0,240 - 0,709\theta$$

$$b = 4,286 \frac{D}{d^2} = 0,709$$

$$D = \frac{0,709 * d^2}{4,286} = 1,149 * 10^{-11} \text{ m}^2/\text{s}$$

c) La función de la gráfica para una temperatura de 65°C es la siguiente:

$$\text{Log} \frac{q_{\theta}}{q_0} = -0,441 - 0,495\theta$$

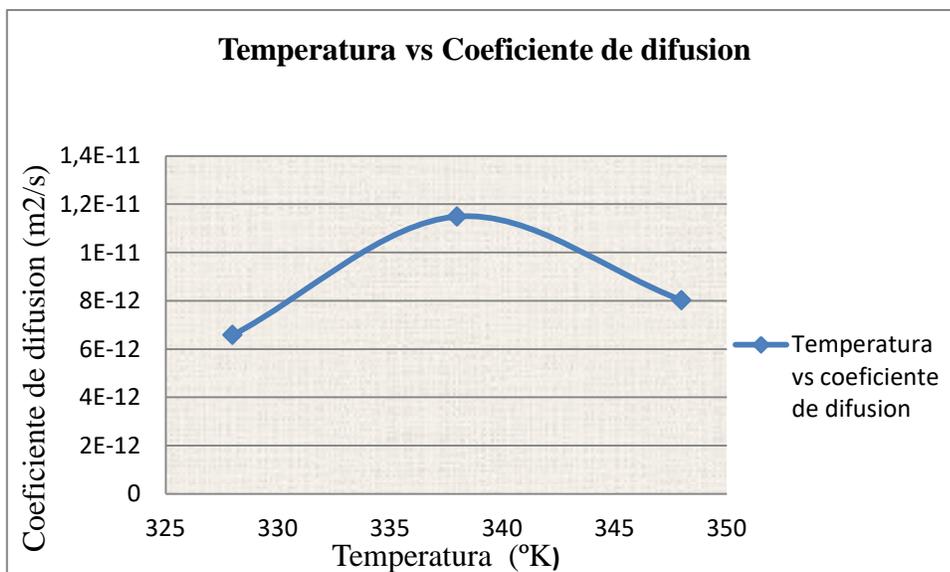
$$b = 4,286 \frac{D}{d^2} = 0,495$$

$$D = \frac{0,495 * d^2}{4,286} = 8,020 * 10^{-12} m^2/s$$

3.3.2. VARIACIÓN DEL COEFICIENTE DE DIFUSIÓN CON LA TEMPERATURA

El coeficiente de difusión está influenciado con la temperatura de modo que según teoría a mayor temperatura mayor difusión en el proceso, pero en esta experimentación se observó que no siempre es como se plantea en teoría, de manera que se tiene mayor difusión a una temperatura de 65°C, como se muestra en la figura 3-3.

Figura 3-2. Variación del coeficiente de difusión con la temperatura



Fuente: Elaboración propia

3.4. TRANSPORTE DE MASA EN EL PROCESO DE EXTRACCIÓN

Para calcular la transferencia de masa se usará la ecuación 1-4:

$$\frac{c_{si}-c}{c_{si}-c_0} = e^{\left(\frac{k_s At}{V_s}\right)} \quad \text{Ec. 1-4}$$

Donde:

C_0 = Concentración del aceite después del tiempo “t”

C = Concentración de aceite contenido según bibliografía

C_{si} = Concentración de aceite en la interface

K_s = Coeficiente de transferencia de masa

V_s = Volumen del sólido

A = Área de transferencia de masa

t = Tiempo de extracción

C_0 = 34.3 g de aceite en 100 g de semilla de chía (Ixtaina, 2010)

Suponiendo como componente mayoritario del aceite de chía el ácido alfa-linolénico, el cual tiene un peso molecular de 278 g/mol: En solo 10 g de semilla molida.

$$n = \frac{m}{pm}$$

$$n = \frac{3.43 \text{ g}}{278 \text{ g/mol}} = 0,012 \text{ mol} \approx \text{kmol/m}^3$$

$$t = 8h \approx 28800 \text{ s}$$

$$D = 0,5 \text{ mm}$$

$$A = \frac{\Pi}{4} D^2 \quad A = 1,962 * 10^{-7} \text{ m}^2$$

Según Grasso, la concentración en la interface se asume un valor del 27% de la concentración inicial.

$$C_{si} = 0,27 * 0,012 = 3.321 * 10^{-3} \text{ mol} \approx \text{kmol/m}^3$$

Una vez calculado la concentración en la interface, es necesario conocer el coeficiente de transferencia de masa, el cual se calcula con el coeficiente de difusión utilizando la siguiente ecuación:

$$k_s = \frac{\pi^2 D_{ef} V_s}{r^2 A} \quad \text{Ec.3-1}$$

Donde:

K_s = Coeficiente de transferencia de masa

D_{ef} = Coeficiente de difusión

V_s = Volumen del sólido

A = Área de transferencia de masa

r = Radio de la partícula solida

Reemplazando todos los valores en la ecuación 3-1:

$$k_s = \frac{\pi^2 1.149 * 10^{-11} \frac{m^2}{s} * 2.67 * 10^{-5} m^3}{2.5 * 10^{-4} m^2 * 1.962 * 10^{-7} m^2}$$

$$k_s = 6.173 * 10^{-5} \frac{m}{s}$$

Reemplazando en la ecuación 1-4:

$$\frac{3.321 * 10^{-3} \frac{kmol}{m^3} - c}{3.321 * 10^{-3} \frac{kmol}{m^3} - 0.012 \frac{kmol}{m^3}} = e^{\left(\frac{6.173 * 10^{-5} \frac{m}{s} * 1.962 * 10^{-7} m^2 * 28800s}{2.67 * 10^{-5} m^3} \right)}$$

$$c = 0.0122 \frac{kmol}{m^3}$$

$$c = 0.0122 \text{ mol}$$

$$m (\text{aceite}) = n * PM = 0.0122 \text{ mol} * 278 \frac{g}{mol} = 3.392 \text{ g}$$

$$R = \frac{3.392g}{10g} * 100\% = 33.92\%$$

El rendimiento teórico de extracción es del 33.92%, tomando como referencia 8 horas de extracción y un tamaño de partícula de 0.5 mm; haciendo la comparación del valor experimental en esta investigación con el laboratorio CEANID se tiene 33.16% de

rendimiento, por lo tanto los valores teórico como experimental se encuentran dentro de los valores esperados.

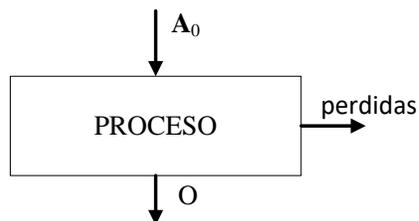
3.5. RENDIMIENTO DEL PROCESO DE EXTRACCIÓN

Para el rendimiento de todo el proceso de obtención de aceite de chía, se toma en cuenta la materia prima que entra al sistema hasta la obtención del aceite de chía.

Datos:

A_0 (materia prima) = 25g

O (aceite de chía) = 3.314g



$$R = \frac{3.314g}{25g} * 100\% = 13.256\%$$

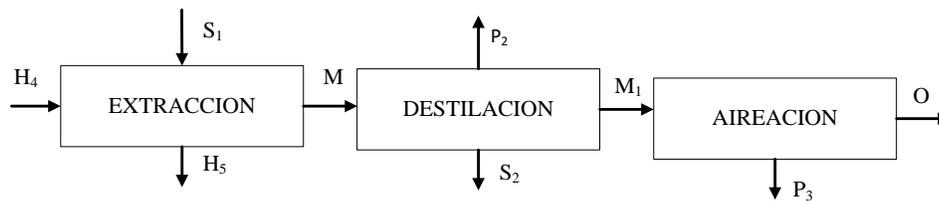
3.5.1. RENDIMIENTO DEL ACEITE EXTRAIDO

Para el cálculo del rendimiento de aceite de chía obtenido, nos enfocamos en la entrada de la materia sólida molida y la cantidad de aceite obtenido, en el cual se tiene los siguientes datos:

Datos:

H_4 = 10.384g

O = 3.314g (se determinó por diferencia de peso)



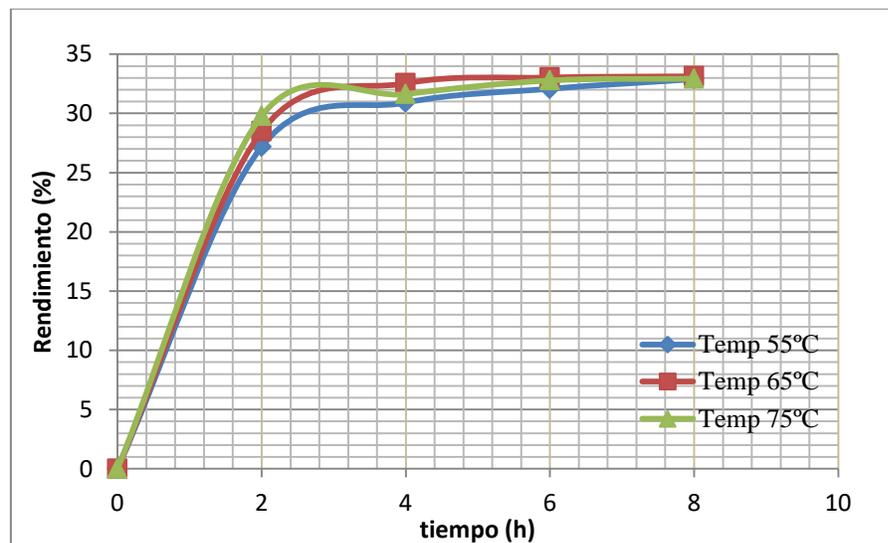
$$R = \frac{m_{aceite}}{masa\ solido} * 100\%$$

$$R = \frac{3.314g}{10.384g} * 100\% = 31.914\%$$

3.5.2. RENDIMIENTO DE ACEITE EXTRAIDO VS TIEMPO DE EXTRACCIÓN

En la figura 3-1 se muestra la gráfica de la variación del rendimiento según el tiempo de extracción a cada temperatura.

Figura 3-3. Rendimiento vs tiempo de extracción



Fuente: Elaboración propia

De acuerdo a la gráfica se puede observar que el rendimiento es favorecido con un mayor tiempo de extracción, esto debido a que el solvente está en mayor contacto con la semilla; si se analiza el rendimiento entre 4 y 6 horas de extracción el porcentaje de aceite se incrementa en un 0,49%, entre 6 y 8 horas se incrementa un 0,1%. Por lo tanto, el incremento de aceite obtenido en estos dos últimos ensayos no es significativo, de tal forma para escoger el tiempo óptimo se deberá tomar en cuenta la cantidad de aceite que se obtiene, el tiempo empleado de 4 horas es un parámetro óptimo de tal modo se demandará menor consumo de energía eléctrica.

3.6. PARÁMETROS ÓPTIMOS DEL PROCESO DE EXTRACCIÓN DE ACEITE DE CHÍA

Para seleccionar los parámetros óptimos del proceso de extracción de aceite de chía se enfocará en el rendimiento obtenido de aceite.

De tal manera que podemos observar en la figura 3-1. que el tiempo óptimo de extracción es de 4 horas, el cual demanda menos consumo de energía. Por otra parte, se tiene mayor rendimiento a una temperatura de 65°C y no a una temperatura de 75°C, que según teoría se debiera tener un mayor rendimiento a una mayor temperatura de extracción. Además, se tiene un mayor coeficiente de difusión a una temperatura de 65°C como se muestra en el apéndice 3.3.

De acuerdo al análisis realizado, los parámetros óptimos para tener un máximo rendimiento en la extracción son las siguientes.

Tabla III-10. Parámetros óptimos del proceso de extracción de aceite de chía

Parámetros óptimos	
Temperatura (°C)	65
Tamaño (mm)	0.5
Tiempo (h)	4
Coficiente de difusión (m ² /s)	1.149*10 ⁻¹¹

Fuente: Elaboración propia

3.7. COMPARACIÓN DE LAS CARACTERÍSTICAS DE LA SEMILLA DE CHÍA

En la tabla III-11 se observa la comparación de las características de la materia prima utilizada en el presente proyecto de investigación y la composición media que se encontró como referencia bibliográfica.

Tabla III-11. Comparación de la semilla de chía

Parámetros	Resultado del CEANID	Datos bibliográficos
Cenizas	4,18	4-6
Calcio total	709	714
Fibra	9,01	18-30
Fósforo total	715	1067
Hidratos de carbono	32,12	9-41
Humedad	7,90	---
Materia grasa	33,16	30-35
Proteína total	21,49	19-23

Fuente: Elaboración propia. (Guiotto, 2014)

En la anterior tabla se aprecia que el contenido de materia grasa, se encuentra en el rango establecido por datos bibliográficos, esta variación se debe a las zonas de cultivo de la semilla y al análisis realizado.

3.8. COMPARACIÓN DEL ACEITE DE CHÍA

- Comparación de las características físico-químicas del aceite de chía

En la tabla III-12 se muestra la comparación del aceite de chía frente a los datos bibliográficos.

Tabla III-12. Comparación de las características físico-químicas del aceite de chía

Parámetro	Resultado del CEANID	Datos bibliográficos	
		Segura, C. M. R., 2014	Ullmann, 1995
Índice de acidez	0,64	2.053	1.92
Densidad relativa (20°C)	0,9320	0.9241	0.9330
Índice de peróxido (meqO ₂ /Kg)	8,05	17.5	-----
Índice de refracción (20°C)	1,4791	1.4761	1.4753
Índice de rancidez	Negativo	-----	-----

Fuente: Elaboración propia

En la tabla III-12 se observa que los datos experimentales del análisis del aceite de chía, presentan valores cercanos en todos los parámetros frente a otros estudios realizados en bibliografía.

- Comparación del contenido de ácidos grasos del aceite de chía

En la tabla III-13 se muestra la comparación del perfil de ácidos grasos del aceite de chía.

Tabla III-13. Comparación del perfil de ácidos grasos del aceite de chía

Perfil de ácidos grasos	Resultados del CIQ	Segura, C. M. R., 2014
C16:0 Ácido Palmítico	6,65	7.47
C18:0 Ácido esteárico	2,82	0.29
C18:1 w9 Ácido oleico	3,39	0.31
C18:2 w6 Ácido linoléico	21,58	20.4
C18:3 w3 Ácido α -linoléico	65,56	68.52

Fuente: Elaboración propia.

En la tabla III-13 se observa que todos los ácidos grasos analizados, concuerdan con los datos bibliográficos de otros autores.

Además se observa que los ácidos grasos que más predominan en el aceite de chía son el linoléico 21,58% y el alfa-linolénico 65,56%, por lo que pertenece al grupo de aceites con ácidos linoléico-alfa-linolénico, junto a los aceites de lino y de canola, etc.

3.8.1. COMPARACIÓN DE LOS PRINCIPALES ÁCIDOS GRASOS DEL ACEITE DE CHÍA CON OTRAS ACEITES

En la tabla III-13 se muestra la comparación de los aceites similares al aceite de chía en composición de los principales ácidos grasos: oleico, linoléico y alfa-linolénico.

Tabla III-14 Comparación de los principales ácidos grasos del aceite de chía con otras similares

Aceites	Ácido oleico	Ácido linoléico	Ácido α-linoléico
Chía	3,39	21,58	65,56
Lino	20,1	17,1	51,0
Canola	65,7	14,6	8,3

Fuente: Elaboración propia

En la tabla III-14 se observa que los aceites de chía y lino tienen mayor porcentaje de ácido linoléico, que el aceite de canola. El aceite de chía es una fuente muy rica y viable de ácidos grasos omega-3.

CAPÍTULO IV
COSTO DEL PROYECTO

4.1. ESTIMACIÓN DE LOS COSTOS

Los costos considerados en el presente proyecto de investigación se muestran en las siguientes tablas:

Tabla IV-1. Costo de la materia prima y reactivo

Ítem	Detalle	Unidad	Cantidad	Costo unitario (Bs)	Costo total (Bs)
1	Semilla de chía	Kg	1	40	40
2	Hexano	litros	2,5	450	1125
TOTAL					1165

Fuente: Elaboración propia

Tabla IV-2. Costo de análisis físico-químico de la materia prima

Ítem	Detalle	Unidad	Cantidad	Costo unitario (Bs)	Costo total (Bs)
3	Cenizas	%	1	50	50
5	Calcio total	mg/100	1	125	125
6	Fibra	%	1	75	75
7	Fósforo total	mg/100	1	70	70
8	Hidratos de carbono	%	1	5	5
9	Humedad	%	1	25	25
10	Materia asa	%	1	60	60
11	Proteína total	%	1	85	85
TOTAL					495

Fuente: Elaboración propia

Tabla IV-3. Costo de análisis del producto final

Ítem	Detalle	Unidad	Cantidad	Costo unitario (Bs)	Costo total (Bs)
12	Acidez	%	1	30	30
13	Densidad relativa	1	25	25
14	Índice de peróxido	mEqo ₂ /kg	1	65	65
15	Índice de refracción	1	10	10
16	Índice de rancidez	Pos/neg	1	25	25
17	Ácidos grasos	%	1	1200	1200
TOTAL					1355

Fuente: Elaboración propia

Tabla IV-4. Costo de materiales directos e indirectos

Ítem	Descripción	Unidad	Cantidad	Costo unitario (Bs)	Costo total (Bs)
18	Fotocopias	Hojas	200	0.30	60
19	Impresión del trabajo	Hojas	900	0.50	450
20	Anillados	Anillado	6	7	42
21	Empastados	Empastado	3	50	150
TOTAL					702

Fuente: Elaboración propia

Tabla IV-5. Costo de servicio directo e indirecto

Ítem	Descripción	Unidad	Cantidad	Costo unitario (Bs)	Costo total (Bs)
22	Investigación en internet	Horas	100	3	300
23	Transporte	Pasaje	400	1	400
24	Mano de obra	Horas	400	15	6000
TOTAL					6700

Fuente: .Elaboración propia

Tabla IV-6. Consumo eléctrico en equipos utilizados

Ítem	Detalle	Descripción	Potencia (Kw)
25	Calentador	Calentamiento del solvente	2,00

	soxhlet		
26	Estufa	Aireación del aceite	2,70
27	Tamiz vibratorio	Análisis granulométrico	0,09
28	Balanza analítica	Pesaje de las muestras	0,22

Fuente: Elaboración propia

Tabla IV-7. Costo energético de los equipos

Ítem	Potencia (kW)	Tiempo (h)	Energía (kWh)	Costo (Bs)
25	2,00	192	384	230,4
26	2,70	48	129,6	77,76
27	0,09	24	2,16	1,296
28	0,22	10	2,2	1,32
TOTAL				310,776

Fuente: Elaboración propia

Los costos están calculados en base al costo de SETAR que es 0,60 Bs/kWh.

Tabla IV-8. Costo total de la investigación

Descripción	Costo total (Bs)
Costo de la materia prima y reactivo	1165
Costo de análisis físico-químico de la materia prima	495
Costo de análisis del producto final	1355
Costo de materiales directos e indirectos	702
Costo de servicio directo e indirecto	6700
Costo energético de los equipos	310,776
TOTAL	10727,776

Fuente: Elaboración propia

El costo total de la investigación de obtención de aceite de chía es **10727,776Bs.**

CAPÍTULO V

CONCLUSIONES Y

RECOMENDACIONES

5.1 CONCLUSIONES

Basados en los resultados del presente proyecto de investigación se pueden formar la siguientes conclusiones:

- La caracterización de materia prima realizada por el CEANID presenta los siguientes parámetros:

Humedad:	7,90%
Fibra:	9,01%
Materia grasa:	33,16%
Calcio total:	709mg/100
Fósforo total:	715mg/100
Proteína:	21,49%
Hidratos de carbono:	32,12%

- De acuerdo a la matriz de decisión se seleccionó hexano como solvente, el cual mostró un buen rendimiento de extracción de 33,14%, y es satisfactorio comparado frente a los resultados realizados por el CEANID con un porcentaje de materia grasa de 33,16%.
- Los resultados del diseño factorial utilizando el programa SPPS señalan que las variables T (Temperatura) y t (tiempo) influyen directamente en el proceso de extracción de aceite de chía; es decir, que las variables son estadísticamente significativa. El mismo muestra los siguientes resultados:

$$\mathbf{Rendimiento = 28,33 + 0,35Temperatura + 1,31tiempo}$$

Siendo el tiempo el de mayor significancia.

- En la extracción de aceite de chía, resulta más adecuado trabajar con una temperatura de ebullición del solvente (65°C), de modo que favorece los rendimientos en el proceso de extracción y en un tiempo tal que permita la extracción total del aceite de chía. Para este proceso los **parámetros óptimos** de trabajo son los siguientes:

Tiempo de extracción:	4horas
Tamaño de partícula:	0.5mm
Temperatura de extracción:	65°C
Relación sólido/liquído:	0,067 g/l

Por otra parte también se realizó el estudio del coeficiente de difusión donde se obtuvo el siguiente valor:

Coeficiente de difusión: $1.149 \cdot 10^{-11} \text{ m}^2/\text{s}$

- De los cálculos realizados para el coeficiente de difusión, se verifica que se produce una mayor difusión y transferencia de masa a una temperatura de 65°C, pudiendo así observar que no se tiene mayor difusión a una mayor temperatura, esto debido a que cada semilla de una planta diferente se comporta de diferente modo, variando todos los coeficientes de transporte como de difusión de acuerdo a la temperatura de extracción de su aceite.
- De acuerdo al resultado de los análisis físico-químicos que se realizaron al producto final, se presenta un índice de refracción de 1,4791% a 20°C, una densidad de 0,9320, un índice de acidez de 0,62, un índice de peróxido de 8,05meqO₂/Kg y un índice de rancidez negativo.
- Según los análisis de ácidos grasos contenidos en el aceite de chía, se establece que los ácidos más predominantes son: el ácido linoléico con un contenido de 21,58% y en mayor proporción el ácido alfa-linolénico con un contenido de 65,56%. De acuerdo a la bibliografía nos muestra que estamos dentro de los valores experimentados.

- Los cálculos realizados de balance de materia y energía, muestran que todo el proceso de obtención de aceite de chía tiene un rendimiento de 13,256%, y que se tiene mayor consumo de energía en la etapa de extracción con un valor de 1231.358 Kcal y un consumo menor en la etapa de destilación de 9.101 Kcal.
- El rendimiento de extracción de aceite de chía de 33,14% es un valor muy cercano comparado con el rendimiento teórico de extracción con un valor de 33.92%, el cual significa que la parte experimental del proceso de extracción de aceite se asemeja a la teoría de extracción.
- Según las estimaciones del costo de la materia prima, reactivos, los costos de análisis, los costos de los materiales directos e indirectos y los costos de energía eléctrica, se estima que toda la investigación asciende a 10727,776Bs,

5.2. RECOMENDACIONES

- Con estos datos se ha podido constatar que el aceite de chía contiene elevadas cantidades de ácido alfa linolénico, que podría ser incorporado en una mezcla de aceite girasol-chía, el cual incrementaría el contenido de omega 3, para poder ser utilizado como alimentación suplementaria, en general para todas las edades de los consumidores.
- Realizar un estudio más profundo sobre las otras propiedades (fibra y calcio) de la semilla de chía, que pueden ser favorables para aplicarse en otros subproductos, debido que estos parámetros se encuentran en mayor proporción y son bastante asimilables por el organismo humano.

- En base a los resultados obtenidos, es favorable realizar el estudio para implementar una planta piloto de obtención de aceite de chía, tomando en cuenta la ubicación de la misma, preferentemente cerca de la producción de materia prima, de modo que será más económica la producción de aceite.
- Buscar nuevas aplicaciones de la harina residual que queda después del proceso de extracción del aceite de chía; como por ejemplo, alimento balanceado para animales por el alto valor nutritivo.

